



HAL
open science

Conception de jeux sérieux en réalité mixte : application à l'apprentissage des fractions

Sofiane Touel

► **To cite this version:**

Sofiane Touel. Conception de jeux sérieux en réalité mixte : application à l'apprentissage des fractions. Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain. Le Mans Université, 2024. Français. NNT : 2024LEMA1035 . tel-04921181

HAL Id: tel-04921181

<https://theses.hal.science/tel-04921181v1>

Submitted on 30 Jan 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE DE DOCTORAT

De
LE MANS UNIVERSITÉ
Sous le sceau de
LA COMUE ANGERS – LE MANS

ÉCOLE DOCTORALE N° 641
*Mathématiques et Sciences et Technologies du numérique,
de l'Information et de la Communication*
Spécialité : Informatique

Par
Sofiane TOUEL

Conception de jeux sérieux en réalité mixte : application à l'apprentissage des fractions

Thèse en informatique, présentée et soutenue à Laval, le 12 décembre 2024.
Unité de recherche : Laboratoire d'Informatique de l'Université du Mans (LIUM)
Numéro National de Thèse (NNT) : 2024LEMA1035

Composition du Jury :

Présidente :	Valérie MAQUIL	Associate Researcher, Luxembourg Institute of Science & Tech.
Rapporteurs :	Nour EL MAWAS	Professeure des Universités, Université de Lorraine
	Jean-Pierre JESSEL	Professeur des Universités, Université Toulouse III Paul Sabatier
Examineurs :	Valérie MAQUIL	Associate Researcher, Luxembourg Institute of Science & Tech.
	Mathieu MURATET	Maître de Conférences, INSEI, Paris
Dir. de thèse :	Sébastien GEORGE	Professeur des Universités, Le Mans Université
Encadrante :	Iza MARFISI	Professeure des Universités, Le Mans Université
Invité :	Nicolas PELAY	Docteur en didactique des mathématiques, Plaisir Maths

Remerciements

Je souhaite avant tout exprimer ma profonde gratitude envers Dieu, sans qui rien de tout cela n'aurait été possible. Comme le dit le verset 39:9 : « **Dis : 'Sont-ils égaux, ceux qui savent et ceux qui ne savent pas ?' Seuls les doués d'intelligence se rappellent.** » Ce qui souligne l'importance cruciale du savoir et de la quête de la connaissance, valeurs qui ont guidé mon parcours académique. La thèse m'a permis de contribuer modestement à cet édifice universel du savoir, pour améliorer l'apprentissage des enfants, aider à construire un monde meilleur et une génération instruite et responsable. Je vois cette thèse comme un arbre dans une forêt de savoir, car « Quand on plante un arbre, on ne le plante pas pour soi. ».

Originaire d'Afrique, où les opportunités sont très rares, transcender le plafond de verre peut s'avérer une tâche herculéenne. Pourtant, comme le disait Nelson Mandela, « **Cela semble toujours impossible jusqu'à ce qu'on le fasse** ». C'est pourquoi cette maxime, teintée d'ironie, incarnait parfaitement mon état d'esprit : « **Tu n'as aucune chance, alors saisis-la !** » Face à l'improbable, j'ai préféré croire que la roue tourne, surtout si on la lance. J'étais donc déterminé, armé de patience, avide de savoir et de connaissances. Après un long cheminement nourri par cette soif d'apprendre, j'ai finalement atteint le terme de ce périple ardu.

Cet aboutissement a été possible grâce à mes encadrant·e·s, pour qui je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance. Ils ont cru en moi, m'ont considéré comme un pair et m'ont permis de m'émanciper. J'étais autonome et mon opinion comptait réellement. Ils ont déployé tous les efforts pour que je réussisse.

J'éprouve une profonde gratitude envers mon directeur de thèse, Sébastien, véritable encyclopédie vivante, doté d'une humilité, d'une rigueur et d'une ouverture d'esprit exceptionnelle. Son sérieux et sa ponctualité m'ont profondément marqué. Il a été le phare éclairant ma route, le repère qui m'a permis de mener à bien mes travaux de recherche. Plus qu'un simple directeur de thèse, c'est une personne dévouée et engagée qui n'hésite pas à se mobiliser pour son doctorant. Je lui serai éternellement reconnaissant pour les efforts qu'il a déployés afin que mon inscription en thèse soit possible même à distance.

Je remercie également Iza, mon encadrante, mais que je considère comme une grande sœur. Malgré le décalage horaire, elle n'a pas hésité à s'adapter et à s'impliquer. Elle est si inspirante et accessible ; elle a su m'encourager et me motiver. Elle a endossé le rôle de mentor. Son soutien indéfectible et sa confiance en mes capacités m'ont permis de surmonter les moments de doute et de persévérer. Sa capacité à expliquer des concepts complexes avec clarté a enrichi mon apprentissage et renforcé ma confiance en moi.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers Nicolas pour sa participation, notamment au début de la thèse, avec son association *Plaisir Math*. Merci aux enseignant·e·s qui ont collaboré avec nous, ainsi qu'à leurs élèves. Leur engagement et leur enthousiasme ont été une source d'inspiration et ont grandement contribué à la réussite de ce projet. Je remercie mes collègues chercheur·euse·s et doctorant·e·s qui m'ont aidé, partageant leurs connaissances et

offrant leur soutien tout au long de ce voyage académique. Leur camaraderie a rendu ce parcours plus enrichissant et moins solitaire. Merci aux élèves stagiaires du LIUM qui ont contribué au développement de l'interface graphique, apportant leur énergie et leur expertise au projet. Je suis également reconnaissant envers mes employeurs, qui m'ont soutenu et permis d'avoir un horaire flexible lorsque cela était nécessaire. Leur compréhension a été inestimable pour concilier travail et recherche.

Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude envers mon comité de suivi, composé de Ludovic et Mathieu. Leurs conseils constructifs et avisés, ainsi que leur suivi attentif, ont été d'une grande aide tout au long de ce parcours. Ils ont su m'orienter avec perspicacité et bienveillance, contribuant significativement à l'avancement de mes travaux. Leur expertise et leur disponibilité m'ont permis de surmonter les défis rencontrés et d'approfondir mes réflexions.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers les membres du jury, Madame Nour El Mawas, Monsieur Jean-Pierre JESSEL, Madame Valérie MAQUIL et Monsieur Mathieu MURATET, pour avoir accepté de jouer un rôle crucial en évaluant mon travail. Leur participation à cette phase déterminante de mon parcours universitaire est pour moi un grand honneur. L'expertise et les perspectives variées qu'ils apportent à cette discussion vont indubitablement enrichir l'évaluation de mes recherches. Je suis reconnaissant pour le temps qu'ils dédieront à l'examen de ma thèse et suis impatient de recevoir leurs observations et recommandations pertinentes.

Je souhaite adresser une reconnaissance particulière à mes parents, qui ont été mon refuge et mon exutoire.

Ma mère, de ses enfants, j'ai toujours été le mouton noir ; Dieu sait combien elle nous aime, elle n'a jamais cessé de croire en moi. Elle est douée de sens et de raison, la personne qui me fait garder les pieds sur terre. Elle a été la lune qui éclairait mes nuits ; nos appels tardifs où elle m'encourageait et priait pour moi sont inestimables. Son amour et sa sagesse m'ont guidé tout au long de ce parcours.

Mon père, bien que je lui en aie fait des cheveux blancs et des rides au creux de son visage, il a tout mis en œuvre pour que je puisse réussir. Pour moi, c'est l'homme qui tient tête au destin. Il a été un guide inestimable, ma plus grande source d'inspiration. Son soutien indéfectible m'a marqué à tout jamais.

Mes parents m'ont soutenu lors de mon expatriation et m'ont inculqué que parfois il faut persévérer et aller au-delà pour trouver des opportunités ; **« Il faut souvent forer en profondeur pour atteindre les puits de pétrole »**. Ils ont tout mis en œuvre pour que leurs enfants accèdent à un niveau d'études supérieur au leur. Ils avaient placé la barre très haut, mais ils m'ont fait la courte échelle. Merci aux meilleurs parents du monde.

Je remercie mon épouse, ma confidente, ma meilleure amie, une femme si forte, si courageuse et bienveillante, qui a été une présence des plus agréables à travers les hivers interminables québécois. Elle a adouci mes longues soirées d'études. Comme le disait Aznavour, **« La misère est moins pénible au soleil »** ; pour moi, mes épreuves ont été moins pénibles grâce à

elle. Merci à elle de supporter parfois mon tempérament indomptable. Elle est ma moitié, ma partenaire indéfectible, qui s'est occupée de tout le reste pour que je puisse me consacrer pleinement à ma thèse. Elle est mon pilier, celle sur qui je peux toujours compter. Son soutien inébranlable et son amour profond m'ont porté à travers les moments les plus difficiles. Elle m'a soutenu avec une force et une dévotion inégalée, me donnant le courage de persévérer. Sans elle, ce voyage aurait été infiniment plus ardu. Une thèse se construit en famille ; tous les membres y participent, chacun·e y contribue. Merci d'avoir cru en moi ; derrière chaque grand homme se trouve une grande femme.

Je remercie mon enfant d'avoir illuminé ma vie et de m'avoir donné une raison supplémentaire de poursuivre mon travail et d'atteindre l'aboutissement. Depuis son arrivée, mes nuits de sommeil sont courtes, mais mon bonheur est immense. C'est mon quinquet, ma lumière. Je lui dédie ce travail de thèse, espérant que, une fois adulte, cela l'inspirera à poursuivre ses propres rêves et à croire en ses capacités. Sa présence a enrichi ma vie d'une joie indescriptible, me rappelant chaque jour l'importance de persévérer et de donner le meilleur de moi-même.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers mon frère et sa famille. Mon frère m'a montré la voie en partant étudier au bout du monde sans hésitation. Son courage, sa détermination et son ambition ont été une source constante d'inspiration pour moi. Sa persévérance et sa joie de vivre contagieuse m'ont encouragé à repousser mes limites, à embrasser l'inconnu avec confiance et à poursuivre mes rêves les plus audacieux.

Un clin d'œil à Yumi, qui a veillé avec moi dans le silence de la pénombre de la nuit.

Tout au long de ce périple, j'ai été animé par une détermination inébranlable, semblable à la « **force qui va** » évoquée par Victor Hugo. Face aux défis considérables, m'efforçant de garder l'humilité nécessaire pour apprendre et grandir, en me souvenant que « **la vraie sagesse est de reconnaître sa propre ignorance** », comme le disait Socrate.

Je n'aurais jamais cru que faire une thèse pourrait être aussi romanesque. La thèse a été pour moi une expérience profondément formatrice, élargissant mon horizon et enrichissant ma compréhension du monde. Comme l'a si bien dit Marcel Proust, « **Le véritable voyage de découverte ne consiste pas à chercher de nouveaux paysages, mais à avoir de nouveaux yeux** ». Ce parcours m'a enseigné l'importance de la persévérance, de la résilience et de la foi en soi, ainsi que l'humilité. J'ai compris que les obstacles sont autant d'occasions de se surpasser et que chaque défi relevé a été une pierre ajoutée à l'édifice de mon développement personnel.

Enfin, je souhaiterais rendre hommage à mon défunt professeur T.Victor qui, contrairement à Socrate disant « **Je sais que je ne sais rien** », me répétait souvent : « **Je ne sais pas grand-chose, mais ce que je sais, je le sais très bien.** » Cette sagesse humble et profonde m'a profondément marqué, m'incitant à maîtriser pleinement chaque connaissance acquise et à aspirer à l'excellence dans tout ce que j'entreprends.

Je remercie toutes les personnes qui ont contribué à cette œuvre. Chacune d'entre elles a joué un rôle crucial dans la réalisation de ce travail, et je suis profondément reconnaissant pour leur soutien et leurs encouragements.

Je suis immensément fier de mon travail, presque fier comme Artaban, tant le chemin fut long. Comme on dit, « **À vaincre sans péril, on triomphe sans gloire** »; chaque bataille, chaque enjeu était périlleux en raison des conditions particulièrement difficiles de cette thèse. Aujourd'hui, en écrivant ces lignes, je ressens une profonde satisfaction et une gratitude sincère. Ce n'est pas seulement l'aboutissement d'un long périple, mais le commencement d'un nouveau chapitre, enrichi par les leçons apprises et les expériences vécues.

SOMMAIRE

Introduction 8

Chapitre 1. Problématique et objet de recherche	9
1.1 Problématique.....	10
1.1.1 Les enjeux de l'apprentissage des fractions chez les élèves.....	10
1.1.2 Les atouts des jeux sérieux en Réalité Mixte pour l'apprentissage des fractions	12
1.1.3 Les défis à surmonter.....	13
1.2 Démarche de recherche, propositions et hypothèses.....	13
1.2.1 Propositions et démarche de recherche	14
1.2.2 Développement de l'application du <i>Chaudron Magique</i>	15
1.2.3 Hypothèses de recherche.....	16
1.3 Conclusion.....	19
1.4 Plan de la thèse.....	19
1.4.1 Approche chronologique et itérative.....	20

Chapitre 2. États de l'art	21
2.1 État de l'art des applications de Réalité Mixte pour l'enseignement des mathématiques	22
2.1.1 Méthode d'analyse de la littérature	22
2.1.2 Analyse des applications RM existantes en mathématiques	24
2.1.3 Synthèse de l'état de l'art	40
2.1.4 La perspective des enseignants sur la RA pour la géométrie.....	43
2.1.5 État de l'art systématique sur les outils de RA pour les mathématiques.....	43
2.1.6 Analyse globale	44
2.2 État de l'art sur mes méthodes et les modèles de conception de Jeu sérieux	47
2.2.1 Méthode	47
2.2.2 Analyse globale des modèles de jeu existants	54
2.3 Conclusion.....	55

Chapitre 3. Proposition d'une démarche de recherche et d'un modèle de conception de jeux sérieux en RM	57
3.1 Proposition d'une démarche de recherche	58
3.1.1 L'Atelier des potions : un jeu de plateau pour l'apprentissage des fractions.....	59
3.1.2 Conception d'une extension numérique pertinente.....	60
3.1.3 Implication progressive des concepteurs dans la conception d'une application de réalité mixte.....	62
3.1.4 Développement de prototypes pour soutenir les phases de co-conception	63
3.2 Proposition d'un modèle de conception de jeux sérieux en RM.....	65
3.2.1 Positionnement du modèle proposé par rapport à la littérature.....	65
3.2.2 Présentation globale du modèle de conception de jeux sérieux en RM	66
3.2.3 Objectifs pédagogiques	68
3.2.4 Structure pédagogique.....	71
3.2.5 Mise en œuvre technique.....	75
3.2.6 Scénario ludique.....	80
3.2.7 Informations complémentaires sur Le Chaudron Magique	84
3.3 Conclusion	85

Chapitre 4. Expérimentations	87
4.1 Hypothèses de recherche	88
4.1.1 Hypothèse 1 : Le Chaudron Magique facilite l'apprentissage des fractions par rapport à une approche de cours traditionnel.	88
4.1.2 Hypothèse 2 : Le Chaudron Magique rend les élèves plus autonomes	88
4.1.3 Hypothèse 3 : Le <i>Chaudron Magique</i> accroît le plaisir et fait baisser l'anxiété	89
4.2 Expérimentations	89
4.2.1 Sécurité des données et consentement	89
4.2.2 Première pré-expérimentation.....	90
4.2.3 Expérimentation 1 : étude qualitative et quantitative RM vs. Classique	92
4.2.4 Expérimentation 2 : étude à moyen terme sur l'usage du <i>Chaudron Magique</i>	101
4.3 Conclusion	106
Chapitre 5. Conclusions et perspectives	108
5.1 Conclusions générales.....	109
5.2 Perspectives.....	112
5.2.1 Perspective 1 : améliorer le jeu et approfondir les expérimentations	112
5.2.2 Perspective 2 : mener une étude comparative entre Le Chaudron Magique avec et sans RM.....	115
5.2.3 Perspective 3 : munir Ekko d'une intelligence artificielle générative.....	117
5.2.4 Perspective 4 : développer un outil auteur fondé sur le modèle de conception de jeux en RM et étendre son utilisation à d'autres disciplines éducatives	119
Bibliographie	122
Annexes	130

Introduction

L'apprentissage des fractions représente un domaine complexe et délicat dans l'enseignement des mathématiques, caractérisé par la nature abstraite des fractions et leurs multiples représentations. Ces aspects posent des défis significatifs pour les élèves, souvent associés à une anxiété mathématique et à des difficultés d'apprentissage persistantes (Jordan *et al.* 2013; Fuchs *et al.* 2016). Pourtant, la maîtrise des fractions est cruciale, car elle constitue un fondement pour comprendre des concepts mathématiques plus avancés, jouant un rôle essentiel dans la réussite éducative globale (Bailey, Siegler et Geary 2014).

L'émergence de la Réalité Mixte (RM) comme outil pédagogique offre de nouvelles perspectives pour l'enseignement et l'apprentissage des fractions. À travers la conception et le développement du jeu en RM *Le Chaudron Magique*, ce travail de recherche explore les potentialités de cette technologie pour faciliter l'apprentissage des fractions, en mettant l'accent sur la motivation, l'autonomie, et la réduction de l'anxiété chez les apprenants.

L'approche méthodologique de cette recherche s'inscrit dans le cadre du *Design-Based Research* (DBR), une méthode de recherche itérative et collaborative qui permet de concevoir, tester et affiner les outils numériques pour l'éducation en contexte réel. Des études récentes, comme celles de T. Anderson et Shattuck (2012) ou encore McKenney et Reeves (2018), mettent en avant que le DBR favorise une collaboration étroite entre chercheurs et praticiens pour développer des solutions pratiques, mais aussi théoriques. En particulier, le DBR a montré son potentiel à intégrer efficacement la technologie, telle que la RM, dans les pratiques pédagogiques (Wang et Hannafin 2005).

L'importance de cette recherche réside dans sa contribution à la fois théorique et pratique. D'un point de vue théorique, elle enrichit la littérature sur l'utilisation de la RM dans l'éducation, offrant des connaissances sur les manières dont cette technologie peut transformer l'apprentissage des mathématiques. D'un point de vue pratique, elle fournit des recommandations concrètes pour la conception et l'implémentation de solutions éducatives en RM.

Chapitre 1. Problématique et objet de recherche

Cette thèse s'inscrit dans le domaine des Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH) avec des contributions essentiellement en Informatique, mais elle a aussi été menée en étroite collaboration avec des didacticiens des mathématiques.

Dans ce chapitre, nous examinons les défis inhérents à l'apprentissage d'un domaine particulier des mathématiques : les fractions. Nous soulignons la nécessité de surmonter des obstacles didactiques pour rendre cet enseignement plus accessible. Nous proposons ensuite des hypothèses de recherche ciblant l'efficacité des jeux sérieux en RM pour améliorer l'apprentissage, l'autonomie des élèves et réduire leur anxiété face aux mathématiques.

1.1 Problématique

1.1.1 Les enjeux de l'apprentissage des fractions chez les élèves

À l'école, toutes les matières sont importantes, mais les **mathématiques** rassemblent des connaissances dont découlent la plupart des autres sciences. Selon l'étude de Watts *et al.* (2014), les compétences des enfants âgés de quatre à cinq ans prédiraient leurs compétences scientifiques à l'adolescence. Une autre étude (Sarama et Clements 2009) montre que réussir en mathématiques entraîne généralement une réussite future dans d'autres domaines comme la lecture.

Les fractions représentent un domaine particulièrement complexe des mathématiques, souvent source d'anxiété et de confusion pour les élèves (Chen 2019). De plus, les fractions découragent souvent les élèves et les poussent à ne pas aimer les mathématiques (Rouche 1998). Cette difficulté est exacerbée par la nature abstraite des fractions, nécessitant une compréhension approfondie des nombres et de leurs relations. Empson *et al.* (2011) soulignent l'importance de développer des approches pédagogiques qui facilitent une telle compréhension conceptuelle des fractions chez les élèves. Ils proposent des stratégies qui encouragent les apprenants à explorer les fractions dans divers contextes mathématiques, en insistant sur l'importance de méthodes d'enseignement actives.

Mercier (2004) a mis en lumière quatre défis principaux dans l'assimilation des fractions : (1) la compréhension du symbole fractionnaire (comprendre le numérateur, le dénominateur, et leur relation), (2) la difficulté avec les opérations sur les fractions (par exemple l'addition, avec des règles souvent abstraites pour les élèves), (3) la distinction entre les nombres entiers et les fractions (introduisant un nouveau type de nombre), et enfin (4) les **différentes manières de représenter les fractions**. Examinons plus précisément ce dernier point.

La manière dont les élèves représentent les fractions est influencée par leurs connaissances préalables et les types d'activités d'apprentissage proposés (Coquin et Camos 2006). Une grande partie des exercices présente les fractions comme une portion d'un tout, conduisant à une prédominance de cette représentation chez les élèves (Alahmadati 2016). C'est typiquement cette représentation que l'on utilise dans les exercices où il faut découper des gâteaux ou des pizzas en 4 parts égales par exemple. Selon Mercier et Alahmadati (Mercier 2004), il existe neuf façons de représenter les fractions, incluant la fraction comme portion d'un tout, partie d'un ensemble, un nombre, un rapport, un opérateur, un quotient (p/q), une mesure, un nombre sur une droite graduée et une probabilité. Ces représentations sont interconnectées et ne sont pas exclusives à une fonction spécifique des fractions. Chaque représentation possède ses avantages et ses obstacles didactiques pour la compréhension du concept de fraction. Il est aussi important de noter que la grande majorité des exercices


proposés dans les manuels scolaires ne concerne que deux ou trois de ces types de représentation, comme illustrés dans la Figure 1.1.

EXERCICES 6E


N4.A FRACTION ET PARTAGE FICHE 4

1 À partir de représentations

a. Hachure une surface représentant $\frac{5}{4}$ de l'aire du rectangle unité.



b. Place le point d'abscisse $\frac{6}{4}$ sur la demi-droite graduée suivante.



c. Écris ces nombres sous la forme : un nombre entier + une fraction inférieure à 1.

• $\frac{5}{4} = \dots + \dots$ • $\frac{6}{4} = \dots + \dots$

Figure 1.1. Exemples d'exercices en 6^{ème}, fraction et partage (Direction générale de l'enseignement scolaire 2023)

Notre recherche se focalise sur l'enseignement du concept de fraction au cycle 3 en France (CM1, CM2, et 6^{ème}). D'après les spécialistes de l'enseignement de la discipline, il est essentiel que les élèves commencent par comprendre la fraction comme **une portion d'un tout** (Alahmadati 2016) avant d'explorer d'autres représentations. La représentation des fractions sur **une droite graduée**, introduite ultérieurement, est particulièrement importante. Cette nouvelle représentation, qui associe les fractions à des nombres rationnels pouvant être placés sur une droite graduée, soulève des défis spécifiques liés à la conceptualisation des fractions comme nombres. Elle est étroitement liée à la notion de mesure, car positionner une fraction sur une ligne graduée revient à définir une distance depuis zéro correspondant à la fraction. Cette dualité entre les représentations de mesure et de nombre sur une ligne graduée est également soulignée dans le programme officiel de l'Éducation Nationale pour le cycle 3 (Direction générale de l'enseignement scolaire 2023).

Le passage de la représentation des fractions, sous la forme de portion d'un tout à un nombre sur une droite graduée, est donc un moment particulièrement crucial pour l'apprentissage des fractions, qui soulève plusieurs défis conceptuels (Mercier, 2004). Comprendre cette nouvelle forme de représentation est indispensable pour maîtriser d'autres compétences mathématiques telles que les estimations et les approximations. Cette compétence aide également à appréhender l'ordre et l'équivalence entre les fractions, un aspect fondamental de l'apprentissage des fractions souligné par le Bulletin officiel spécial n°11 du 26 novembre 2015 (« Le Bulletin officiel de l'éducation nationale, de la jeunesse et des sports », s. d.).

1.1.2 Les atouts des jeux sérieux en Réalité Mixte pour l'apprentissage des fractions

Les jeux sérieux offrent des solutions prometteuses pour apprendre de façon active et ludique (Gresalfi *et al.* 2018). Clark *et al.* (2016) avancent que les jeux conçus avec des objectifs pédagogiques explicites peuvent avoir un impact significatif sur l'acquisition de compétences mathématiques, y compris pour des concepts aussi complexes que les fractions. Leur recherche souligne aussi la capacité des jeux sérieux à augmenter l'engagement des élèves et à favoriser une compréhension plus profonde des sujets mathématiques. Ces impacts varient selon les scénarios du jeu, les conditions d'utilisations et les guides fournis avant l'utilisation.

Parmi les innovations numériques récentes, la Réalité Mixte (RM) semble particulièrement prometteuse pour l'enseignement des mathématiques. Comme défini par Drascic et Milgram (Drascic et Milgram 1996; Milgram et Kishino 1994), et résumé par la Figure 1.2, la RM se trouve au centre du continuum entre la réalité (objets tangibles) et la réalité virtuelle (100 % numérique). En d'autres termes, ce terme est utilisé pour nommer tout types de dispositif dans lequel il y a une combinaison d'éléments réels et virtuels interconnectés. Il comprend donc les applications de Réalité Augmentée (RA) et celle de Virtualité Augmentée.

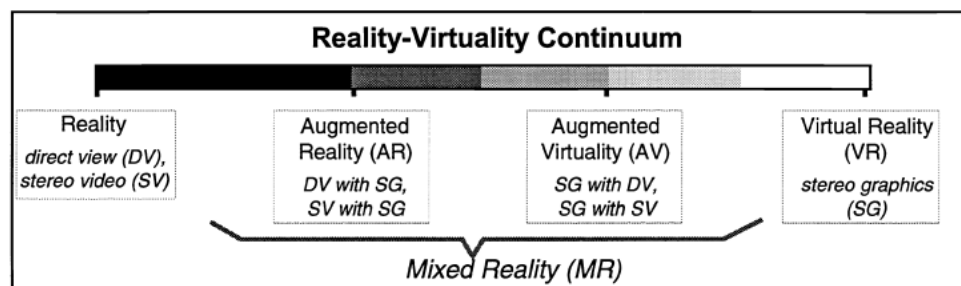


Figure 1.2. Représentation simplifiée du continuum de la virtualité de la réalité (Drascic et Milgram, 1996)

Le potentiel éducatif de la RM provient de plusieurs facteurs. Premièrement, la manipulation d'objets réels entraîne des expériences sensorimotrices sur lesquelles la cognition prend racine, faisant explicitement référence à la théorie de la cognition incarnée (Varela, Thompson, et Rosch 1991). Une conséquence de cette manipulation est une réduction significative la charge mentale (Wilson 2002). La manipulation d'objets motive également les apprenants et les encourage à réaliser leurs activités (Liou *et al.* 2017). De plus, l'étude de Chandler et Tricot (2015) démontre l'impact positif de l'activité physique qui accompagne cette manipulation d'objets, en particulier pour les jeunes enfants. Le mouvement physique semble être particulièrement pertinent pour l'apprentissage des mathématiques. Différents types de gestes (pointage, représentation et gestes métaphoriques) permettent d'externaliser des concepts mathématiques et d'améliorer leur mémorisation (Alibali et Nathan 2012). Enfin, la RM permet de créer des activités multimodales (visuohaptiques) qui ont un potentiel pédagogique supérieur aux activités unimodales (ex. visuelles seulement) pour les enfants (Kalenine, Pinet, et Gentaz 2011). La RM permet, par exemple, d'afficher différents types d'informations contextualisées directement sur des objets physiques (*e.g.* modèle 3D animé du système solaire, noms d'organes du corps humain, etc.). La RM peut aussi donner plus d'autonomie aux élèves en affichant des informations pour les guider (*e.g.* informations contextuelles ou guide pas à pas sur les actions à réaliser) ou encore valider les activités une

fois qu'elles ont été réalisées (*e.g.* validation de la position des objets). Certaines études montrent également que les élèves utilisant la RM ont une meilleure compréhension et mémorisation du cours, par rapport à ceux utilisant uniquement des livres (Weng *et al.* 2019). De plus, il a été montré que la RM améliore l'implication et l'engagement des apprenants dans le domaine militaire (Hughes *et al.* 2005). Le même effet est confirmé dans le domaine des sciences par l'étude de Kun-Hung Cheng sur 267 collégiens (Cheng 2018).

Cependant, les études précédentes ont également révélé quelques points négatifs, par exemple certains élèves pensent que la RM réduit leur imagination (Cheng 2018). De plus, les équipements utilisés (tablettes, casques, projecteurs) peuvent être coûteux et entraîner une complication dans l'organisation des activités (Lin *et al.* 2011). Cet équipement peut être fastidieux à mettre en place pour les enseignants, mais aussi à utiliser pour les élèves (*e.g.* porter un casque pendant une longue période).

1.1.3 Les défis à surmonter

Bien que les jeux sérieux en RM semblent être très prometteurs pour l'apprentissage des fractions, leur conception et leurs usages en classe soulèvent plusieurs défis.

Le premier concerne la difficulté de concevoir des jeux qui, non seulement, engagent les élèves dans l'activité, mais les aident aussi à atteindre des objectifs d'apprentissage spécifiques à travers une intégration réfléchie des contenus éducatifs (Dondlinger 2007).

Le deuxième défi concerne les problématiques techniques inhérentes à la RM. Ainsi, des problèmes de performance sont possibles, liés à la puissance GPU et à la batterie des équipements. Par ailleurs, plusieurs travaux de recherche discutent de l'importance de développer des outils informatiques qui sont non seulement techniquement viables, mais également pédagogiquement efficaces, soulignant la nécessité de trouver un équilibre entre innovation technologique et utilisabilité (Rutten, Van Joolingen, et Van Der Veen 2012; Palaigeorgiou *et al.* 2018). Les affordances, c'est-à-dire les possibilités d'action offertes par ces environnements en RM, doivent être soigneusement pensées afin que les apprenants puissent interagir de manière intuitive avec les objets physiques et virtuels, facilitant ainsi l'apprentissage sans ajouter de complexité inutile. Enfin, il ne faut pas négliger le temps nécessaire pour l'installation du matériel en classe, ce qui ajoute une charge supplémentaire à l'enseignant.

Le troisième défi concerne la conception de scénarios ludiques qui maintiennent l'engagement des apprenants. Une attention particulière doit être portée aux mécaniques de jeu et à la narration. L'objectif est de créer des expériences enrichissantes qui stimulent l'intérêt sans surcharger ou décourager les élèves. Une collaboration interdisciplinaire entre enseignants, didacticiens, développeurs et expert en jeu sérieux est cruciale pour surmonter les défis de la conception de jeux sérieux en RM et pour exploiter pleinement le potentiel éducatif de cette technologie.

1.2 Démarche de recherche, propositions et hypothèses

Dans le cadre de cette thèse, l'objectif est de répondre aux défis identifiés précédemment en explorant deux axes de recherche :

- Le premier axe de recherche consiste à proposer une démarche de conception afin de **faciliter la collaboration interdisciplinaire**, incluant des informaticiens, des didacticiens des mathématiques, des experts en jeu sérieux, mais surtout des enseignants et leurs élèves. Le but est de proposer

une méthode pour soutenir cette collaboration, afin d'articuler les compétences variées nécessaires à la création de jeux sérieux en RM. Cette collaboration vise à établir une interaction synergique et une prise de décision partagée entre tous les acteurs du projet.

- Le deuxième axe de recherche consiste à **élaborer un modèle de conception pour les jeux sérieux en RM**, visant à faciliter l'intégration des composantes ludiques, interactives et pédagogiques. Ce modèle doit favoriser l'engagement des apprenants et soutenir l'atteinte des objectifs pédagogiques. Dans cette architecture, il est crucial de définir clairement comment chaque élément contribue à une expérience d'apprentissage cohérente et immersive, tout en assurant la flexibilité nécessaire pour adapter le jeu aux besoins éducatifs spécifiques.

Ces axes de recherche convergent vers la situation désirée : un environnement d'apprentissage où les technologies de RM sont utilisées pour soutenir l'apprentissage des fractions et le rendre plus motivant et moins anxiogène pour les élèves. L'objectif est néanmoins d'apporter des contributions plus larges, aussi bien pour la méthode que pour le modèle de conception, qui dépassent le contexte de l'apprentissage des fractions et qui pourront bénéficier à d'autres situations.

1.2.1 Propositions et démarche de recherche

La conception de jeux éducatifs en RM représente un défi à la fois technique et pédagogique, nécessitant une approche réfléchie pour maximiser leur efficacité et optimiser l'expérience utilisateur (en travaillant notamment sur les affordances). Dans ce contexte, deux propositions émergent comme des solutions potentielles pour aborder les complexités inhérentes à la création de ces outils pédagogiques innovants. Elles seront détaillées dans le chapitre 3.

1.2.1.1 Proposition 1 : Démarche de recherche collaborative et itérative inspirée du Design-Based Research et des méthodes Agiles

Nous faisons l'hypothèse que l'innovation dans la conception de jeux sérieux en RM peut être significativement soutenue par l'adoption d'une démarche de recherche collaborative et itérative, qui s'inspire de la méthode du *Design-Based Research* (DBR) et intègre des principes des méthodes Agiles. Cette combinaison vise à créer une synergie, alliant rigueur méthodologique et flexibilité opérationnelle. En effet, le DBR se concentre sur l'intervention et le développement de théories à partir de pratiques éducatives concrètes (Collins, Joseph, et Bielaczyc 2004). Celui-ci fournit un cadre solide pour l'exploration des potentiels pédagogiques de la RM. De plus, l'intégration des méthodes Agiles, avec leurs cycles de développement courts et itératifs, facilite le prototypage rapide et la révision des applications en fonction des retours des utilisateurs (Cochrane, Davis, et Mackey 2016). Le développement de prototypes nous semble particulièrement important pour découvrir de nouvelles façons d'utiliser la RM, une interaction innovante que la plupart des enseignants ne connaissent pas et qu'il est difficile d'appréhender sans tester. Cette approche est illustrée dans l'étude *MUVES* (Cochrane, Davis, et Mackey 2016) qui met en lumière l'importance de l'adaptation continue et de l'amélioration dans un contexte proche lié à un développement innovant d'un environnement virtuel multi-utilisateurs.

1.2.1.2 Proposition 2 : Modèle de conception de jeux sérieux en Réalité Mixte

Nous proposons un modèle dédié à la conception de jeux sérieux en RM pour aider les concepteurs à répondre aux défis spécifiques de ce type d'environnements EIAH. Ce modèle a pour vocation d'être utilisé par toutes les parties prenantes, pendant la démarche de conception présentée ci-dessus. Il propose notamment un cadre structuré pour optimiser l'utilisation des ressources matérielles disponibles, en tenant compte du budget limité des écoles qui ne permet pas l'acquisition d'équipements coûteux. Il prend également en considération les contraintes de l'espace physique et les conditions matérielles, tout en veillant à ce que les objectifs pédagogiques restent prioritaires dans le processus de conception.

1.2.2 Développement de l'application du *Chaudron Magique*

Notre démarche de recherche collaborative et itérative, ainsi que le modèle de conception de jeu sérieux en RM proposés ont été utilisés pour développer le *Chaudron Magique*. Il s'agit d'un jeu en RM, conçu en collaboration avec une équipe pluridisciplinaire, spécifiquement pour l'apprentissage des fractions. Il peut être utilisé pendant des ateliers en autonomie se déroulant en classe ou à la maison. Il propose un univers fictionnel magique dans lequel les élèves sont invités à créer des animaux fantastiques en utilisant des fractions. Ekko, un fantôme bienveillant, est là pour les assister et répondre à leurs questions. À travers des interactions avec le chaudron magique et son magimètre (nom donné à la droite numérique dans l'univers du jeu), les élèves sont amenés à comprendre et à manipuler des fractions de manière concrète et visuelle. Les défis proposés évoluent en complexité, encourageant les élèves à approfondir leur compréhension des fractions tout en renforçant leurs compétences en résolution de problèmes.

Comme on peut le voir sur la figure 1.3, le jeu intègre des pièces de jeu tangibles, qui représentent les fractions sous la forme de portion d'un tout. En plaçant ces pièces sous la tablette, l'application peut afficher leur valeur sous la forme de nombre rationnel (p/q) ainsi que la somme des pièces sur la droite numérique. Le Chaudron Magique utilise donc la RM pour afficher, de façon dynamique et simultanée, ces différentes formes de représentation des fractions. De plus, un système en RM permet de reconnaître les pièces sélectionnées et de faire des corrections automatiques des activités. Le Chaudron Magique a gagné la 3^e place de la compétition internationale du Serious Game Society en 2022, dans la catégorie Recherche.

La façon dont le Chaudron Magique a été conçue en suivant la démarche de recherche collaborative et le modèle de conception de jeux sérieux en RM, est décrite en détail dans le chapitre 3.

À travers plusieurs expérimentations du *Chaudron Magique* en classe, nous proposons donc de tester trois hypothèses principales en lien avec les défis spécifiques à l'apprentissage des fractions.



Figure 1.3 : Le jeu du Chaudron Magique

1.2.3 Hypothèses de recherche

1.2.3.1 Hypothèse 1

Comme nous l'avons indiqué dans l'introduction, l'apprentissage des fractions constitue une étape fondamentale, mais complexe dans le parcours éducatif des enfants. La transition de la représentation des fractions comme une partie d'un tout vers leur placement sur une droite graduée est souvent perçue comme un obstacle majeur par les élèves du cycle 3 (de 9 à 12 ans). Cette difficulté est soulignée par les enseignants, comme le témoigne Anaïs, une des enseignantes qui a intégré le projet dès la première phase : « On observe une rupture nette dans la compréhension des élèves lorsqu'ils sont confrontés à la droite graduée ». Ce constat met en lumière l'importance de développer des outils pédagogiques innovants pour faciliter cette transition.

Dans ce contexte, nous posons **l'hypothèse H1 : l'utilisation du jeu le Chaudron Magique en RM soutient le processus d'apprentissage des fractions par rapport à une approche de cours traditionnel.**

Cette hypothèse s'appuie sur des fondements théoriques et empiriques qui reconnaissent les atouts pédagogiques des jeux sérieux et de la RM pour l'éducation. En effet, les jeux numériques sont reconnus pour leur capacité à accroître la motivation et l'engagement des élèves, en rendant l'apprentissage plus interactif et engageant (Dondlinger 2007). Par ailleurs, l'approche du *Rational Number Project* souligne que la compréhension des fractions est améliorée lorsque les élèves sont exposés à plusieurs représentations et que des liens sont établis entre ces différentes représentations (Behr *et al.* 1983 ; Cramer et Post 2002). Cette multiplicité des représentations est facilitée par les applications numériques, qui permettent de visualiser simultanément une même fraction sous différentes formes (Liou *et al.* 2017; Andrea *et al.* 2019), enrichissant ainsi l'expérience d'apprentissage des élèves.

De son côté, la RM offre l'avantage de s'appuyer sur des objets physiques familiers pour faciliter le transfert de connaissances et la compréhension des fractions. En transformant ces objets en éléments interactifs intégrés dans une expérience d'apprentissage augmentée, la RM permet une manipulation concrète qui facilite l'apprentissage de concepts abstraits (Wilson 2002; Fugate, Macrine, et Cipriano 2019). De plus, la perception augmentée, procurée par la RM, contribue à une meilleure compréhension des concepts complexes (Da Costa, Szilas, et Mueller 2019), tandis que son potentiel à renforcer la motivation et l'engagement des élèves a également été mis en évidence (Chen 2019).

La vérification de cette hypothèse, par le biais d'expérimentations en situation écologique, permettra d'évaluer l'efficacité des jeux sérieux en RM pour l'enseignement des fractions. Il s'agira notamment de comparer l'intérêt pédagogique du *Chaudron Magique* face à des activités classiques. L'objectif est de réaliser une analyse quantitative en comparant les résultats des élèves d'une même classe avant et après l'utilisation du Chaudron Magique. De plus, une seconde comparaison sera effectuée avec une autre classe qui aura suivi une séance éducative traditionnelle au lieu d'utiliser le Chaudron Magique, ce qui donnera des indications sur les impacts du *Chaudron Magique* sur l'apprentissage des élèves, en plus des avis d'enseignants qui sont collectés via des questionnaires et des entretiens.

1.2.3.2 Hypothèse 2

L'enseignement des fractions au cycle 3 présente un défi majeur tant pour les élèves que pour les enseignants. La complexité de ce concept et le manque de temps pour un accompagnement individualisé soulignent l'importance de développer des stratégies pédagogiques favorisant l'autonomie des élèves.

Dans cette perspective, nous proposons **l'hypothèse H2 : les rétroactions dans le jeu Chaudron Magique en RM rendent les élèves plus autonomes, en validant et corrigeant les différentes activités et en proposant une aide en temps réel.**

Les rétroactions sont possibles dans le jeu et, en validant et corrigeant les activités en temps réel, offrent une aide précieuse qui permet aux élèves de progresser de manière autonome. Cette approche s'inscrit dans la continuité des recherches actuelles qui mettent en avant les bénéfices des technologies éducatives sur l'autonomie des élèves. Zorrilla et Álvarez (2008) ont notamment démontré que les applications numériques scénarisées permettent aux élèves

de naviguer à travers les apprentissages sans l'assistance constante de l'enseignant. De plus, la RM, en intégrant des aides contextualisées, facilite le déblocage des élèves face à des difficultés spécifiques, tout en permettant une validation automatique des exercices, ce qui renforce leur capacité à apprendre de manière autonome (Palaigeorgiou *et al.* 2018).

La vérification de l'hypothèse H2 sera entreprise à travers les analyses qualitatives des réponses des enseignants via des questionnaires ciblés, comparant l'autonomie des élèves avant et après l'introduction du *Chaudron Magique* en classe. L'utilisation de méthodologies quantitatives permettra de quantifier la fréquence à laquelle les élèves requièrent l'assistance de l'enseignant lors de l'utilisation de l'application. De plus, des questions ouvertes pour les enseignants serviront à explorer d'autres avantages potentiels de la Réalité Mixte, notamment l'amélioration de l'interaction entre élèves et le renforcement des compétences pédagogiques, en favorisant une approche où l'enseignant devient davantage un facilitateur qu'un simple évaluateur. Notre démarche expérimentale s'appuie ainsi sur un cadre d'analyse rigoureux pour évaluer l'impact de la RM sur l'autonomie des élèves dans l'apprentissage des fractions. En se fondant sur des données empiriques, cette recherche contribuera à enrichir la littérature sur les technologies éducatives et à offrir des pistes concrètes pour l'amélioration des pratiques pédagogiques en EIAH.

1.2.3.3 Hypothèse 3

Au sein du cycle 3, l'apprentissage des fractions est identifié comme une source significative de stress pour les élèves, risquant de compromettre leur appréciation, non seulement des mathématiques, mais aussi des disciplines scientifiques en général.

Dans cette optique, nous formulons **l'hypothèse H3 : l'utilisation du jeu Le Chaudron Magique en RM accroît le plaisir et contribue à baisser l'anxiété des enfants pour l'apprentissage des fractions.**

Cette hypothèse repose sur des travaux de recherche qui ont démontré les bienfaits des jeux numériques sur la motivation des élèves, en rendant l'apprentissage moins anxigène (Chen 2019). De plus, il a été observé que les interactions permises par la RM augmentent également la motivation des élèves et réduisent le stress lié à l'apprentissage, en créant une expérience immersive et engageante qui facilite l'acquisition de connaissances complexes de manière ludique.

Pour évaluer cette hypothèse, plusieurs méthodes seront employées. Tout d'abord, un questionnaire destiné aux enseignants permettra de recueillir leur perception de l'impact du jeu le *Chaudron Magique* en RM sur le niveau de stress et de motivation des élèves, en comparaison avec les observations des années précédentes et d'un groupe témoin. Cette démarche vise à saisir l'évolution de l'attitude des élèves vis-à-vis des fractions, en intégrant une dimension comparative essentielle pour l'analyse des résultats. Ensuite, un questionnaire adressé aux élèves avant et après l'intervention avec le *Chaudron Magique* évaluera leur perception des fractions et leur expérience d'apprentissage. L'objectif est de mesurer les variations dans leur niveau d'intérêt et d'anxiété vis-à-vis des fractions, grâce à des questions formulées de manière indirecte et directe. Cette approche bimodale enrichira la compréhension des effets du jeu en RM sur le vécu émotionnel et cognitif des élèves.

1.3 Conclusion

Ce chapitre présente le contexte de la thèse, partant de défis didactiques liés à l'apprentissage des fractions. Cette matière est particulièrement complexe pour les élèves, d'un point de vue conceptuel, et génère de l'anxiété. Même si les jeux sérieux en RM offrent de nombreux atouts pédagogiques qui pourraient y répondre, leur conception nécessite de trouver des solutions adaptées pour surmonter plusieurs obstacles. Tout d'abord, la conception de jeux sérieux en RM nécessite une collaboration étroite entre différents acteurs, y compris des enseignants, didacticiens, développeurs et experts en jeu sérieux. Le deuxième obstacle concerne l'usage de la RM de façon efficace pour répondre aux défis didactiques des fractions. Il s'agit aussi de prendre en compte des contraintes organisationnelles et matérielles auxquelles font face les enseignants pour leur proposer des outils faciles à mettre en place dans leurs classes.

Ces défis nous ont amenés à travailler sur deux axes de recherche. Le premier vise à proposer une démarche de recherche collaborative pour faciliter la conception de ce type de jeux sérieux avec des interactions innovantes, en intégrant une équipe de chercheurs pluridisciplinaires, des enseignants et leurs élèves. Le deuxième axe vise à proposer un modèle de conception de jeux sérieux en RM pour prendre en compte plus facilement toutes les contraintes techniques et organisationnelles des écoles, mais surtout pour développer des scénarios ludiques captivants qui intègrent efficacement les objectifs pédagogiques et exploitent le potentiel de la RM. Ces deux propositions ont été utilisées pour développer le jeu en RM du *Chaudron Magique*.

Les hypothèses de recherche, formulées dans ce chapitre, ont été définies pour tester l'impact du *Chaudron Magique* pour l'apprentissage des fractions en situation écologique. Par extensions, elles permettent aussi de valider l'intérêt des deux propositions. L'objectif ultime est de fournir des preuves empiriques (par exemple : via des observations, questionnaires, etc.) qui appuieront l'intégration des jeux sérieux en RM dans les curriculums scolaires, en tant qu'outil pédagogique innovant capable d'améliorer les résultats d'apprentissage et d'engager les élèves dans un parcours éducatif plus enrichissant et épanouissant.

Ainsi, ce chapitre pose les bases d'une recherche qui explore les frontières de l'innovation pédagogique en utilisant la RM comme levier pour transformer l'enseignement des fractions. La généralisation de cette étude à d'autres domaines disciplinaires sera abordée dans la conclusion de la thèse.

1.4 Plan de la thèse

Dans cette première partie de la thèse, nous avons abordé les difficultés liées à l'apprentissage des fractions et examinons comment les jeux sérieux en RM, peuvent aider à rendre cet apprentissage plus interactif et engageant. Pour finir, nous mettons en avant trois hypothèses et les défis à surmonter.

Le deuxième chapitre présente deux états de l'art. Le premier porte sur les applications en RM pour l'apprentissage des mathématiques. Le deuxième porte sur les modèles de conception de jeu sérieux.

Le troisième chapitre présente les deux propositions majeures de cette thèse, à savoir, une démarche de recherche collaborative et itérative inspirée du *Design-Based Research* et des méthodes Agiles et un modèle de conception de jeux sérieux en RM. Il détaille ensuite comment ces deux propositions ont été utilisées pour créer le jeu du *Chaudron Magique*.

Le quatrième chapitre présente l'expérimentation du *Chaudron Magique* dans des contextes réels pour vérifier les hypothèses établies. Les résultats de ces tests sont analysés pour mesurer l'impact du jeu sur la compréhension des fractions, l'autonomie et l'engagement des élèves.

Le dernier chapitre récapitule les principales contributions de la thèse, discute des limites et identifie des perspectives de recherche futures.

1.4.1 Approche chronologique et itérative

Il est important de souligner que le travail de recherche présenté dans cette thèse n'a pas suivi un ordre strictement linéaire. La première étape a consisté à concevoir le jeu sérieux en RM, Le *Chaudron Magique*, afin d'explorer concrètement les défis liés à l'intégration de la RM dans un cadre pédagogique.

Ce travail initial a permis d'identifier des besoins spécifiques et des contraintes pratiques, tout en ouvrant la voie à une réflexion plus globale. À travers des cycles itératifs, basés sur les principes du *Design-Based Research*. Cette expérience nous a amené à adapter cette démarche de conception, notamment en la combinant avec des méthodes *Agiles* mais aussi a formaliser un modèle de conception de jeux sérieux en RM. Il s'agit des deux propositions de cette thèse.

Pour ce manuscrit, nous avons choisi de présenter la démarche de conception et le modèle avant la description détaillée du jeu afin de faciliter la compréhension du lecteur. En effet, le modèle est utilisé comme un cadre explicatif pour analyser les différentes composantes du jeu et leur interaction avec les objectifs pédagogiques.

Chapitre 2. États de l'art

Dans ce chapitre, nous proposons, d’abord, un état de l’art des applications de RM existantes dans le domaine de l’enseignement des mathématiques, afin de comprendre leurs différentes caractéristiques et leurs impacts sur l’apprentissage. Ensuite, nous proposons un état de l’art des méthodes et modèles de conception de jeu sérieux.

2.1 État de l’art des applications de Réalité Mixte pour l’enseignement des mathématiques

2.1.1 Méthode d’analyse de la littérature

En décembre 2021, nous avons réalisé un état de l’art en suivant la méthode PRISMA (Moher *et al.* 2009) qui signifie *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*. Il s’agit d’un ensemble de directives destiné à améliorer la transparence, la rigueur et la qualité des revues systématiques et des méta-analyses. L’un des éléments clés de cette méthode est le diagramme de flux PRISMA, qui illustre le processus de sélection des études à travers plusieurs étapes distinctes :

- *Identification* : à cette étape, toutes les études potentielles sont collectées à partir de diverses bases de données et autres sources.
- *Screening* : après suppression des doublons, les études sont passées au crible pour éliminer celles qui ne répondent pas aux critères de sélection
- *Eligibility* : le texte intégral des articles est évalué en profondeur pour vérifier leur conformité aux critères d’inclusion prédéfinis.
- *Included* : les études qui remplissent les critères sont incluses dans la synthèse qualitative ou quantitative pour l’analyse finale.

La recherche initiale a été réalisée en utilisant *Google Scholar*, qui indexe les articles des principaux éditeurs (*i.e.*, Springer, IEEE, HAL archives ouvertes, etc.). Même si nous nous intéressons principalement aux applications en RM conçues pour l’apprentissage des fractions pour les élèves (idéalement ceux du primaire et du collège), nous avons élargi l’état de l’art aux mathématiques en général et sans limiter l’âge des apprenants, en raison de la rareté des applications spécifiques. Les mots-clés utilisés pour cette recherche étaient donc :

- (« teaching » OU « learning » OU « school »),
- ET (« math » OU « fraction » OU « geometry »),
- ET (« augmented reality » OU « mixed reality »).

Comme indiqué dans la figure 2.1, cette recherche a permis d’identifier 177 articles pertinents (*identification*), qui ont été réduits à 90 articles uniques. Ces articles ont ensuite été passés au crible selon les titres et résumés pour vérifier leur pertinence par rapport aux critères de la recherche. Cela a permis d’exclure 50 articles qui ne répondaient pas aux critères, laissant 40 articles pour une évaluation plus approfondie (*screening*). Les 40 articles restants ont été évalués en profondeur en examinant le texte intégral pour vérifier leur conformité aux critères d’inclusion. Les critères d’inclusion étaient : études publiées après 2015 et proposant un prototype fonctionnel en RA ou RM. Lors de cette étape, 32 articles ont été exclus (*eligibility*). Il restait donc 8 articles conformes aux critères d’inclusion (*inclusion*).

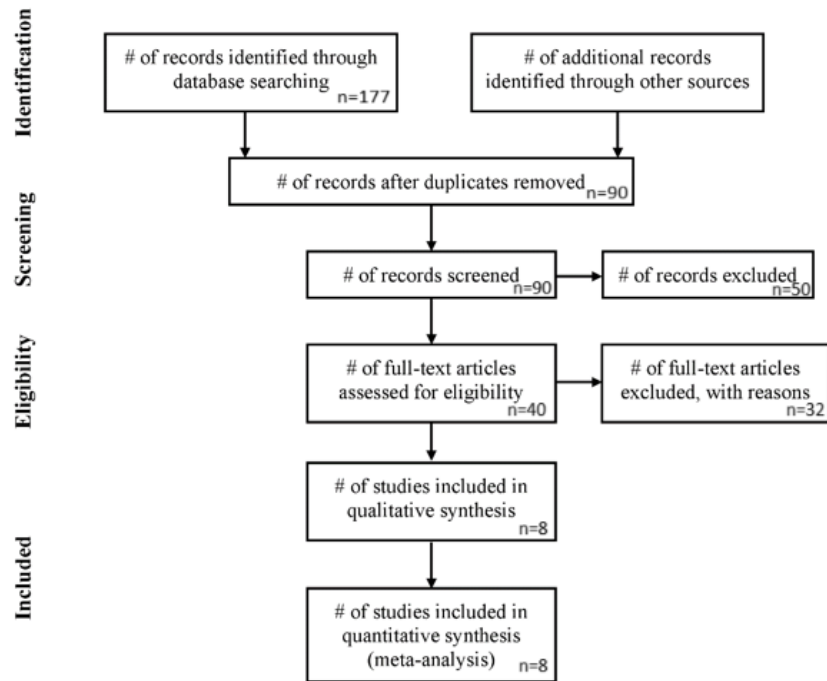


Figure 2.1. PRISMA : 1^{er} état de l'art sur les applications en RM pour les maths

En 2024, nous avons mis à jour notre état de l'art en utilisant les mêmes critères, mais avec l'aide de l'Intelligence Artificielle (IA) générative qui, selon l'étude de Zimmerman (Zimmermann *et al.* 2024), permet d'accélérer le processus de recherche dans une base de données vaste et hétérogène et d'avoir des informations pertinentes avec une précision globale de 70 %. Les résultats sont très dépendants de la donnée en entrée et il suggère donc d'avoir des validations et supervisions humaines. De plus, il ne permet pas toujours de dresser une vision globale du domaine de recherche, ce qui doit être fait manuellement.

Nous avons opté pour un modèle d'IA générative basé sur le modèle *Scholar GPT*. Ce dernier a accès à plusieurs sources de données telles que *Google Scholar*, *PubMed*, *JSTOR*, *Arxiv*, etc. Cette recherche reprend les mêmes critères que précédemment, mais avec une année supérieure ou égale à 2022, afin de compléter le premier état de l'art. Nous avons aussi demandé à *Scholar GPT* d'utiliser la méthode PRISMA que nous détaillons dans l'annexe (Prompt : Etat de l'art), nous lui avons également demandé de nous fournir un maximum d'articles, comme indiqué dans la figure 2.2.

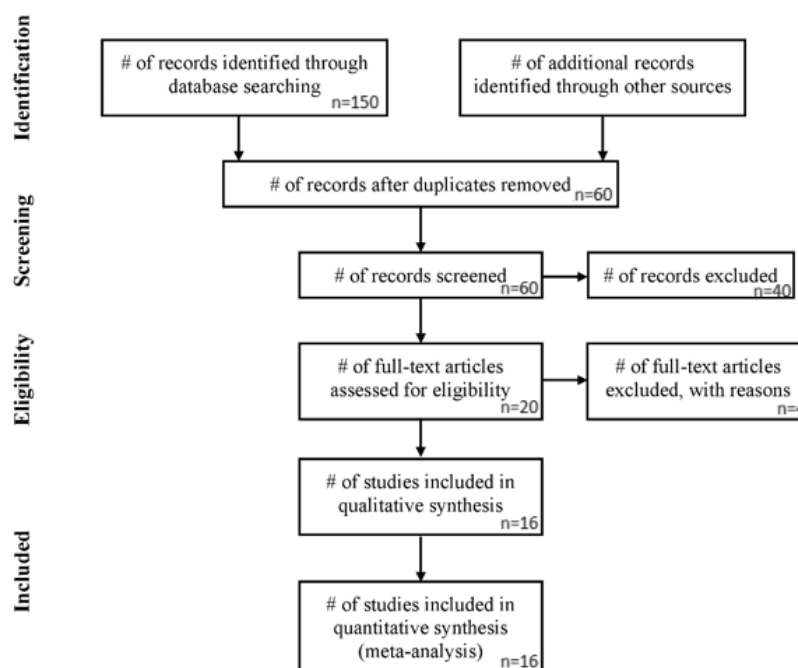


Figure 2.2. PRISMA : 2^e état de l'art sur les applications en RM pour les maths

Ce deuxième état de l'art a permis d'avoir initialement 150 articles (*identification*). Ensuite, après avoir supprimé les doublons et les articles moins pertinents en fonction du titre et du résumé, nous sommes arrivés à 60 articles (*screening*). Enfin, après une évaluation complète des articles, *Scholar GPT* a trouvé 20 articles admissibles selon nos critères (*eligibility*). Finalement, après une relecture manuelle, 16 articles ont été retenus pour leur pertinence et l'accès libre à leur contenu complet (*inclusion*).

En combinant les 8 articles pertinents du premier état de l'art et les 16 articles du deuxième état de l'art, nous obtenons donc **24 articles, dont 22 applications et 2 revues systématiques**.

Dans les sections suivantes, nous analysons les applications présentées dans les 22 articles selon quatre critères. Nous identifions d'abord le contexte dans lequel elles ont été créées et leurs **objectifs pédagogiques**. Ensuite, nous identifions la **nature des interactions en RM** qu'elles offrent. Puis, nous listons les **équipements** nécessaires et les logiciels utilisés pour développer ces applications. Enfin, si l'application a été testée, nous présentons **les avantages et les limites identifiés par les auteurs**.

Concernant les revues systématiques, elles seront présentées, par la suite, afin d'appuyer notre analyse d'état de l'art.

2.1.2 Analyse des applications RM existantes en mathématiques

2.1.2.1 *Magic Boosed*

L'application *Magic Boosed* (Andrea *et al.* 2019) provient d'Indonésie. Son objectif est d'améliorer la perception spatiale des formes géométriques pour les enfants de 7 à 12 ans. Les élèves doivent répondre à des questions de géométrie de base (*e.g.* quelle est la surface de cette figure 3D ?). L'application les aide en fournissant des informations en RA (*e.g.* objets 3D, hauteur, formules), mais sans interaction (figure 2.3). Les élèves sont équipés d'un manuel d'exercices papier et d'un smartphone avec l'application. L'article ne fournit pas d'informations sur la technologie de RA utilisée.

Selon les auteurs, les expérimentations menées avec deux enseignants et huit élèves ont montré que l'application augmente la motivation et l'intérêt des élèves et facilite les échanges entre eux et l'enseignant.



Figure 2.3. Magic Boosed

2.1.2.2 Math Anxiety

Math Anxiety est une étude taïwanaise (Chen 2019) visant à réduire l'anxiété liée à l'apprentissage des mathématiques pour les enfants de 6 à 15 ans. Huit QCM sur tablette ont été distribués dans la classe pour passer en revue des sujets tels que les fractions et la géométrie. En plus d'afficher des objets 3D en RA, l'application déclenche également des vidéos lorsqu'elle reconnaît des objets réels pour aider les élèves à répondre aux quiz. Ces objets virtuels ne sont pas interactifs (figure 3.4). Les quiz sont imprimés sur des feuilles de papier et les élèves utilisent des tablettes. L'application sur ces tablettes a été développée avec *HP Reveal*¹ (*Aurasma*) et *Augment*².

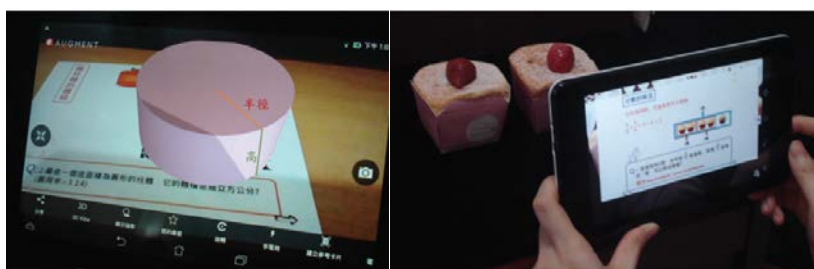


Figure 2.4. Math Anxiety

L'expérience, menée auprès de 137 élèves, a montré que l'application avec RA diminue l'anxiété mathématique, augmente l'attention, la motivation, la confiance et la satisfaction des élèves par rapport à l'application mobile sans RA. Les auteurs ont indiqué qu'ils aimeraient ajouter des interactions et des objets 3D virtuels ainsi qu'utiliser des outils plus efficaces que *HP Reveal* et *augment* car ils ne pouvaient pas personnaliser le contenu et les interactions en fonction de leurs besoins.

¹ <https://www.auganix.org/hud/aurasma/>, consulté le 28/08/2024

² <https://www.augment.com/>, consulté le 28/08/2024

2.1.2.3 Virtual Objects vs. Physical Objects

Cette étude turque compare l'utilisation d'objets virtuels en RA avec l'utilisation d'objets physiques pour l'apprentissage de la géométrie (Gecu-Parmaksiz et Delialioglu 2019). L'objectif est d'apprendre aux enfants de 5 à 6 ans à reconnaître les formes géométriques 2D (e.g. triangle, carré) et 3D (e.g. sphère, cube). Les enfants doivent classer les cartes avec des images de formes géométriques. Ils peuvent utiliser l'application de RA pour visualiser les formes géométriques en 3D, changer leur taille, leur position, leur orientation et les manipuler (figure 2.5). Cette application a été développée avec *Augment*.

L'expérimentation, menée auprès de 72 enfants, a montré que l'application avait efficacement soutenu le processus d'apprentissage et suscité l'enthousiasme. Les auteurs soutiennent qu'il serait avantageux d'ajouter une rétroaction pour aider les enfants à comprendre les caractéristiques des formes manipulées.



Figure 2.5. Virtual Objects vs. Physical Objects

2.1.2.4 The Fraction Marathon

The Fraction Marathon utilise de droites graduées pour enseigner les fractions (addition et soustraction) aux enfants grecs de 11 ans (Palaigeorgiou *et al.* 2018). Le scénario du jeu met en scène plusieurs coureurs interrompus dans leur course de 2 km à cause de la pluie. Les élèves doivent replacer les coureurs là où ils se sont arrêtés. Leur position est donnée sous forme de fraction par rapport au point d'arrivée, d'autres coureurs ou d'éléments de la scène (e.g. $2/3$ du chemin entre le coureur jaune et le panneau vert). Les élèves peuvent mesurer la taille entre deux objets en redimensionnant et en déplaçant la droite numérique affichée en RA (figure 2.6). Ils peuvent également mettre à jour l'unité fractionnaire avec un bouton physique. Si les élèves font une erreur, ils perdent des points et sont invités à cliquer sur le bouton d'aide. Cela déclenche une vidéo avec des instructions vocales qui les guident sur la façon de manipuler la droite et résoudre le problème. De plus, le jeu valide automatiquement si la position des coureurs est la bonne ou non. Le jeu comprend un stade en

bois miniature, un projecteur, une caméra, un ordinateur portable, deux tableaux *Makey Makey*³ (un kit d'invention électronique qui permet de connecter des objets du quotidien au programme informatique sans programmer). La technologie utilisée pour développer le jeu n'est pas indiquée dans l'article.

Suite à une étude menée auprès de 28 élèves, les auteurs affirment que le jeu capte leur attention et les amuse. Les mécanismes de correction et d'aide ont été particulièrement efficaces pour leur donner plus d'autonomie. Les auteurs pensent qu'il serait plus efficace de présenter le jeu sans mentionner les fractions pour réduire le stress en début de partie. Ils souhaitent également agrandir l'espace de jeu afin que plus d'enfants puissent jouer en même temps et trouver une solution matérielle moins coûteuse.



Figure 2.6. The Fraction Marathon

2.1.2.5 Ready to Learn Initiative

L'*initiative Ready to Learn* (Radu, McCarthy, et Kao 2016) vise à étudier le potentiel de la RA pour l'apprentissage des mathématiques aux États-Unis. Ce projet propose, entre autres, une application de RA pour introduire des fractions aux enfants de 6 à 9 ans. Les enfants placent des objets réels sur une droite numérique et l'application mesure automatiquement la position de l'objet et l'affiche sous forme de fraction. Les enfants peuvent changer le dénominateur de la fraction et l'application met automatiquement à jour le numérateur (figure 2.7). L'application nécessite une feuille de papier avec des marqueurs et une tablette avec l'application. Celle-ci a été développée avec une version Web de *Scratch 2*⁴ (programmation visuelle basée sur des blocs).

Même s'il n'a pas été testé avec des élèves, trois enseignants ont pu évaluer le prototype et ont noté qu'il présentait un bon potentiel pédagogique et que la présence d'interactions avec des objets 3D serait susceptible de capter l'attention de leurs élèves.

³ <https://makeymakey.com/>, consulté le 28/08/2024

⁴ <https://scratch.mit.edu/>, consulté le 28/08/2024



Figure 2.7. Ready to Learn Initiative

2.1.2.6 The Village

The Village est un projet grec destiné à enseigner des fractions aux enfants du primaire, âgés de 6 à 12 ans (Kazanidis, Palaigeorgiou, et Bazinas 2018). Le scénario du jeu met en scène un enfant, rendant visite à ses grands-parents, dans leur village partiellement détruit. À l'aide de deux personnages virtuels, le but du jeu est de réparer l'infrastructure du village (*e.g.* tuyau, pont, ... représentés par des Lego), en mesurant la partie endommagée (en rouge) avec une droite numérique. Les joueurs peuvent ajuster la taille, le numérateur et le dénominateur de la droite numérique en RM en manipulant des tournevis et des boutons. Le jeu détecte automatiquement si la partie endommagée de l'infrastructure est correctement mesurée (figure 2.8). Le jeu se compose d'un plateau *Makey Makey*, d'un projecteur et d'accessoires. Le jeu a été développé avec *Scratch* (programmation visuelle basée sur des blocs).

Ce jeu n'a pas été testé dans un contexte pédagogique. Les perspectives des auteurs sont d'utiliser des appareils mobiles afin de simplifier le jeu.



Figure 2.8. The Village

2.1.2.7 Robot Game

Le jeu de robot, projet uruguayen, vise à enseigner des additions aux enfants de 5 à 6 ans (Marichal *et al.* 2017). Les joueurs doivent placer des blocs physiques de différentes longueurs devant la tablette pour étendre le bras d'un robot, afin qu'il attrape une vis. Le système fournit une rétroaction continue, en

adaptant la longueur du bras en fonction des blocs devant la tablette. Pour utiliser le jeu, les enfants ont besoin d'une tablette, d'un support pour tablette, ainsi que d'un miroir et d'un ensemble de blocs en bois (figure 2.9). Le jeu a été développé avec la plateforme open source *CETA*, *OpenCV*⁵, *libgdx*⁶ et les bibliothèques *TopCode*⁷.

Après avoir testé le jeu avec 19 enfants, les auteurs soutiennent qu'il favorise une décharge cognitive, augmente l'engagement et responsabilise les enfants grâce au système de rétroaction. Leurs perspectives sont d'utiliser une technologie de reconnaissance d'images plus performante et d'ajouter des animations et des conseils du robot.

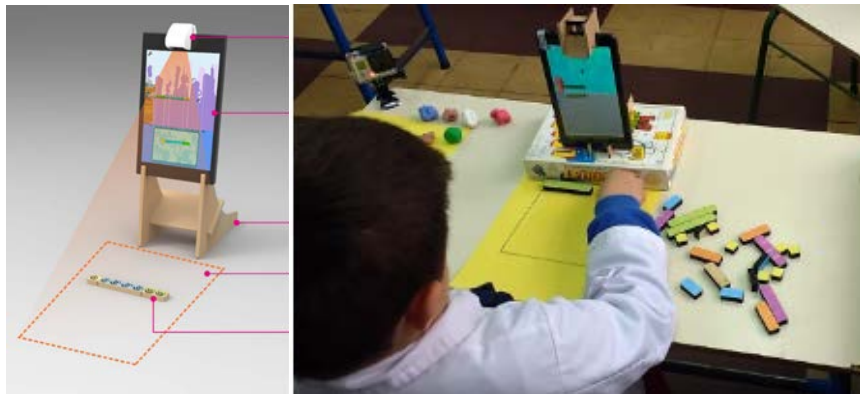


Figure 2.9. Robot Game

2.1.2.8 MaR-T

L'étude turque *MaR-T*, vise à aider les enfants de 3 à 5 ans à comprendre les nombres non symboliques et à comparer des valeurs (Beşevli *et al.* 2019). Les enfants doivent aider Momo, un personnage fictif, à rentrer à la maison en plaçant des objets dans les endroits désignés pour lui permettre de franchir les obstacles (*e.g.* rivière, fossé) (figure 2.10). Momo leur demande de pointer du côté où il y a le plus d'objets ou de mettre leur main au milieu s'il y en a autant des deux côtés. Si les enfants donnent la bonne réponse, ils sont félicités, sinon Momo pose des questions telles que « Pourquoi pensez-vous que ce côté a plus d'objets que l'autre ? ». Ce jeu nécessite une caméra et un projecteur et a été développé avec *OpenCV*, *Royale SDK*⁸, les bibliothèques *Lottie*⁹ et *Bodymovin*¹⁰.

Après avoir testé le jeu avec dix enfants, les auteurs affirment que les interactions avec Momo aident les enfants à rester concentrés. Les systèmes de rétroaction et de récompense semblent également aider les enfants à terminer les activités selon l'analyse qualitative exploratoire.

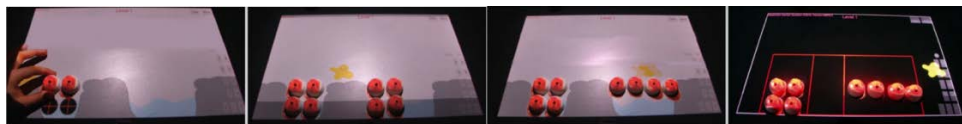


Figure 2.10. The Village

⁵ <https://opencv.org/>, consulté le 28/08/2024

⁶ <https://libgdx.com/>, consulté le 28/08/2024

⁷ <https://github.com/TIDAL-Lab/TopCodes>, consulté le 28/08/2024

⁸ <https://3d.pmdtec.com/en/royale-software/>, consulté le 28/08/2024

⁹ <https://lottiefiles.com/>, consulté le 28/08/2024

¹⁰ <https://aescripts.com/bodymovin/>, consulté le 28/08/2024

2.1.2.9 AR Geometrical

L'application *AR Geometrical* a été développée en Malaisie (Hanid *et al.* 2022). Son objectif est d'améliorer la compréhension des concepts géométriques pour les élèves de 12 à 13 ans. Les élèves doivent résoudre des problèmes géométriques en utilisant des éléments de la pensée computationnelle (e.g. abstraction, décomposition, algorithmes). L'application aide en fournissant des visualisations virtuelles de polygones et des outils pour manipuler ces formes dans des situations réelles, permettant ainsi une meilleure compréhension et résolution des problèmes. Les élèves sont équipés de smartphones ou de tablettes compatibles avec l'application de RA (figure 2.11).



Figure 2.11. AR Geometrical

Les expérimentations menées auprès de 31 élèves ont montré que l'application améliore la capacité des élèves à résoudre des problèmes géométriques en utilisant la pensée computationnelle. Les auteurs notent une augmentation de la motivation, de la confiance et de la satisfaction des élèves par rapport aux méthodes traditionnelles.

2.1.2.10

AR - Geometrie Turquie

Ce projet a été développé en Turquie (Cetintav et Yilmaz, s. d.) et vise à étudier l'impact des applications RA sur l'apprentissage des mathématiques, plus précisément en géométrie, chez des élèves de collège de huitième année (13 à 14 ans). Le but était d'améliorer la réussite académique, les compétences d'apprentissage autorégulé et la motivation des élèves. Il permet de visualiser des formes géométriques en 3D sur des QRCode (figure 2.12). L'outil a été développé avec Unity¹¹, Tinkercad¹² et le kit de développement logiciel Vuforia¹³.

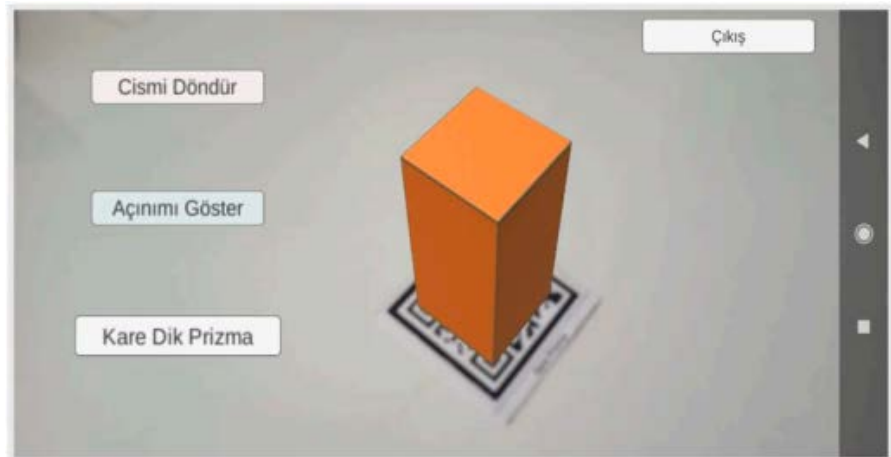


Figure 2.12. AR - Geometrie

L'outil a été testé sur 40 élèves (20 élèves en groupe de contrôle et 20 élèves en groupe expérimental). Les résultats ont montré une amélioration significative des scores de réussite académique, des compétences d'apprentissage autorégulé et de la motivation dans le groupe expérimental par rapport au groupe de contrôle.

2.1.2.11

GeoAR

L'application *GeoAR* a été développée en Malaisie (Abdul Hanid *et al.* 2022). Ce projet visait à intégrer les applications RA avec la pensée computationnelle pour enseigner des sujets de géométrie, en ciblant spécifiquement les élèves de 12 à 13 ans, dans deux écoles secondaires. L'étude avait pour objectif d'améliorer la pensée computationnelle, les compétences en visualisation et la réussite en géométrie des élèves (figure 2.13). Les outils de développement utilisés incluaient le logiciel *Unity* pour la création de contenu de RA, ainsi que le plugin *Vuforia* pour la détection d'images dans des situations réelles.

¹¹ <https://unity.com/>, consulté le 28/08/2024

¹² <https://www.tinkercad.com/>, consulté le 28/08/2024

¹³ <https://developer.vuforia.com/>, consulté le 28/08/2024



Figure 2.13. GeoAR

L'étude a impliqué un total de 124 élèves, répartis également en un groupe de contrôle et un groupe de traitement. Les résultats ont démontré que l'intégration des applications de RA avec la pensée computationnelle avait un effet positif significatif sur la pensée computationnelle, les compétences en visualisation et la réussite en géométrie des élèves. Le groupe de traitement a affiché une amélioration notable par rapport au groupe de contrôle dans les tests post-intervention. Ces résultats suggèrent que l'approche combinée de la RA et de la pensée computationnelle est efficace pour améliorer les compétences académiques en géométrie chez les élèves de collège.

2.1.2.12

ARGeoITS

Ce projet a été développé au Mexique et en Espagne (Uriarte-Portillo *et al.* 2023). Le projet vise à améliorer l'apprentissage des concepts géométriques chez les élèves de collège en utilisant une application de RA intégrée à un système de tutorat intelligent (ITS) nommé *ARGeoITS* (figure 2.14). Le but de ce projet est d'augmenter la motivation et la performance académique des élèves en géométrie. Pour ce faire, l'application combine des éléments virtuels avec l'environnement réel des élèves, facilitant ainsi la visualisation des formes géométriques et l'interaction avec les contenus éducatifs. Les outils utilisés pour développer cette application incluent *Unity* pour la création des contenus de RA et *Vuforia* pour la détection d'images en situation réelle.

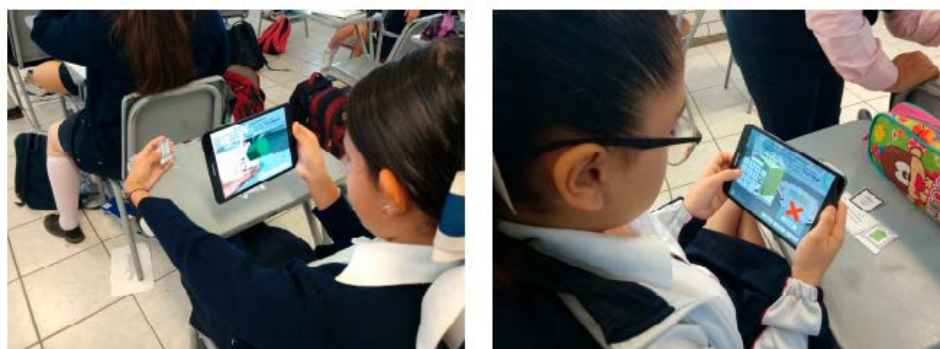


Figure 2.14. ARGeoITS : Intelligent Augmented Reality for Learning Geometry

L'application a été testée sur un échantillon de 106 élèves de collège (âgés de 13 à 15 ans) répartis en deux groupes : un groupe de contrôle utilisant seulement l'application de RA (*ARGeo*) et un groupe expérimental utilisant l'application intégrée au système de tutorat intelligent (*ARGeoITS*). Les résultats de l'étude montrent que les élèves utilisant *ARGeoITS* ont obtenu des scores significativement plus élevés en termes d'apprentissage et de motivation par

rapport à ceux utilisant uniquement *ARGeo*. L'application *ARGeoITS* s'adapte aux besoins individuels des élèves grâce à un moteur de logique floue qui ajuste les exercices en fonction de la performance précédente des élèves, offrant ainsi une expérience d'apprentissage personnalisée et interactive.

2.1.2.13 *Spatial Ability in Geometry*

Ce projet a été développé en Indonésie (Yanuarto et Iqbal 2022) et vise à améliorer les capacités spatiales mathématiques des élèves de collège, entre 12 et 15 ans, plus précisément en géométrie en utilisant une application de RA. L'application permet de visualiser des formes géométriques en 3D, améliorant ainsi les capacités spatiales des élèves (figure 2.14). Les outils logiciels utilisés pour développer cette application incluaient *Unity*, *Blender*¹⁴ et divers logiciels graphiques et de programmation.



Figure 2.14. The Augmented Reality Learning Media App

Les résultats ont montré que l'utilisation de la RA comme support pédagogique avait une influence positive sur l'efficacité des leçons en classe en termes de compréhension de leçon et d'apprentissage. Les tests préliminaires ont montré une amélioration notable des scores des élèves entre les pre-test et post-test.

2.1.2.14 *EUCLIDA*

Ce projet a été développé en Indonésie et en Malaisie (Putri *et al.* 2023). Ce projet vise à améliorer la compréhension des concepts géométriques chez les élèves en utilisant des cartes de RA intégrées, connues sous le nom de cartes *EUCLIDA*. Le but principal est de rendre l'apprentissage des concepts géométriques plus concret et interactif pour les élèves, en particulier en ce qui concerne la géométrie spatiale. Les cartes *EUCLIDA* sont des cartes imprimées avec des images géométriques bidimensionnelles qui, lorsqu'elles sont scan-nées à l'aide d'un smartphone, se transforment en objets géométriques tridi-mensionnels (figure 2.15). Les outils de développement utilisés incluaient *Adobe Animate*¹⁵ pour les animations, *Blender* pour la modélisation 3D, et *Affinity Design*¹⁶ pour la conception des cartes.

¹⁴ <https://www.blender.org/>, consulté le 28/08/2024



Figure 2.15. EUCLIDA

L'étude a impliqué des tests sur un échantillon de 30 étudiants, qui ont montré une forte acceptation et une facilité d'utilisation de la part des élèves. Les résultats indiquent également que l'utilisation de la RA peut améliorer significativement la compréhension et l'engagement des élèves dans l'apprentissage des mathématiques, rendant les concepts abstraits plus accessibles et intéressants.

2.1.2.15

ETNICAR TG 4.0

Ce projet a été développé en Indonésie et vise à explorer le potentiel de la RA comme ressource didactique et pédagogique pour l'apprentissage de la géométrie en trois dimensions (figure 2.16). Le but principal de cette étude est de fournir une alternative aux méthodes d'enseignement traditionnelles, en particulier pendant la pandémie de COVID-19, où l'enseignement en ligne est devenu essentiel. L'application mobile utilisée dans cette étude, appelée ETNI-CAR TG 4.0, incluait des menus pour jouer avec la RA, apprendre la géométrie à travers des vidéos et de la RA, et évaluer les connaissances acquises.

¹⁵ <https://www.adobe.com>, consulté le 28/08/2024

¹⁶ <https://affinity.serif.com>, consulté le 28/08/2024



Figure 2.16. ETNICAR TG 4.0

L'étude a impliqué trois enseignants de mathématiques et 26 élèves de trois écoles. Les participants étaient des élèves âgés de 13 à 15 ans. Les résultats de l'étude ont montré que l'utilisation de la RA était bénéfique en tant que ressource didactique et pédagogique. Les élèves ont montré une meilleure compréhension des concepts géométriques et ont adopté une attitude positive envers l'apprentissage. Les enseignants ont également noté que cette méthode facilitait l'interaction directe avec les objets géométriques, rendant les concepts abstraits plus concrets et engageants pour les élèves.

2.1.2.16

Ethnomathématique AR-Géométrie

Ce projet a été développé en Indonésie (Abdullah *et al.* 2022) et vise à intégrer la RA dans l'enseignement des mathématiques avec une approche ethnomathématique pour les élèves d'écoles islamiques (madrasah). L'objectif est de rendre l'apprentissage des concepts géométriques plus interactif et pertinent en liant les mathématiques à la culture locale. L'application permet aux élèves de diriger la caméra de leur smartphone vers des marqueurs, faisant apparaître des objets 3D sur l'écran, accompagnés d'informations et d'audio explicatifs (figure 2.17). Le développement de l'application a impliqué l'utilisation d'outils comme *Unity* et *Vuforia* pour créer et intégrer des objets 3D représentant des formes géométriques basées sur le patrimoine culturel de Yogyakarta, comme le Palais de Yogyakarta et le Temple Ratu Boko.



Figure 2.17. Ethnomathematics AR APP

L'étude a utilisé la méthode ADDIE (Analyse, Design, Développement, Implémentation et Évaluation), bien que limitée aux quatre premières phases. Au stade de l'analyse, les chercheurs ont mené des entretiens avec 41 enseignants de mathématiques pour identifier les problèmes rencontrés dans

l'enseignement de la géométrie. L'étude a impliqué un échantillon de 72 élèves de différentes écoles, répartis en groupes de contrôle et de traitement. Les résultats ont montré une amélioration notable de la compréhension des concepts géométriques et une motivation accrue des élèves par rapport à l'enseignement conventionnel. Les élèves ont trouvé l'application facile à utiliser et ont pu répéter les leçons à la maison, ce qui a été particulièrement utile pendant la pandémie de COVID-19.

2.1.2.17 *Cooking Math*

Ce projet a été développé en Grèce (Volioti *et al.* 2023), vise à intégrer la RA dans l'enseignement des mathématiques aux élèves de sixième année du primaire (11 à 12 ans). L'objectif principal est de promouvoir l'apprentissage actif et d'améliorer la compréhension des concepts mathématiques à travers des jeux éducatifs interactifs (figure 2.18). L'application, nommée *Cooking Math*, utilise des recettes de cuisine comme cadre pour enseigner des sujets tels que les nombres entiers, les fractions, les nombres décimaux, les proportions, les pourcentages, et les concepts géométriques. Les élèves utilisent des appareils mobiles pour scanner des codes QR dans leurs manuels scolaires, ce qui lance des jeux éducatifs interactifs liés aux concepts mathématiques. L'application a été développée avec *Unity et Vuforia*, et est disponible en langue grecque.

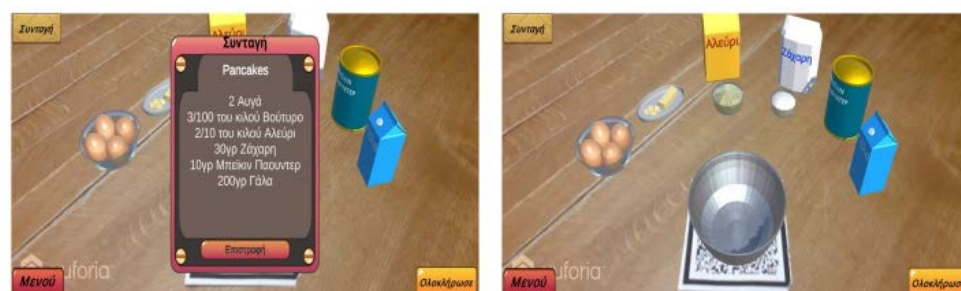


Figure 2.18. *Cooking Math* : Exercice de fractions

Pour évaluer l'utilisabilité de l'application, une étude pilote a été réalisée avec trois groupes distincts : 65 étudiants de philosophie et d'éducation, 74 étudiants en ingénierie, et 35 élèves de sixième année de l'école primaire publique de Florina. Les résultats de l'étude, obtenus à l'aide du questionnaire *System Usability Scale (SUS)* et d'entretiens semi-structurés, ont montré des scores d'utilisabilité satisfaisants, avec des feedbacks positifs sur l'engagement et l'intérêt des élèves pour l'apprentissage des mathématiques grâce à la RA. Les étudiants de philosophie et d'éducation ont souligné la valeur pédagogique de la technologie, tandis que les étudiants en ingénierie ont proposé des améliorations pour rendre l'application plus intuitive.

2.1.2.18 *AR Geogebra*

Le projet a été développé en Indonésie et Malaisie (Buchori, Sulianto, et Osman 2023). L'objectif principal de ce projet est de combler le manque d'utilisation de technologies tridimensionnelles et de RA dans l'enseignement de la géométrie au niveau primaire. L'application AR Geogebra vise à rendre l'enseignement de la géométrie plus engageant et interactif, en permettant aux élèves de visualiser et d'interagir avec des objets géométriques en 3D (figure 2.19).

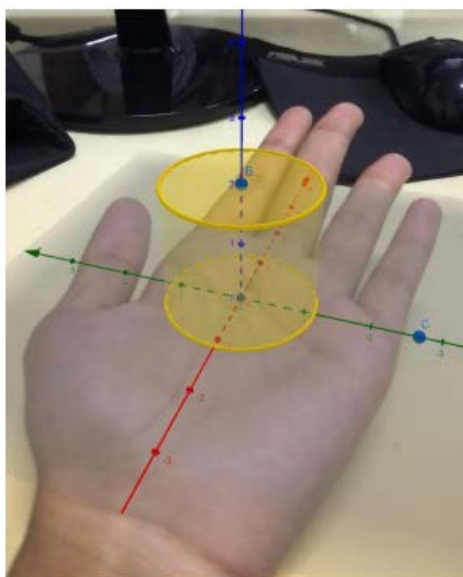


Figure 2.19. AR Geogebra

L'étude a été réalisée avec 33 élèves. Les résultats post-test ont montré, indiquant une amélioration significative des compétences géométriques des élèves utilisant *AR Geogebra*. L'application a été jugée efficace pour améliorer les compétences des élèves en géométrie, augmentant ainsi leur motivation et leur engagement dans le processus d'apprentissage. Les élèves ont exprimé une grande satisfaction quant à l'utilisation de cette technologie.

2.1.2.19

AR Geometrie – Indonésie

Le projet a été développé en Indonésie (Nevarini, Agustiani, et Zahra 2023). L'objectif principal de ce projet est d'explorer l'utilisation de la RA pour augmenter la motivation des élèves dans l'apprentissage de la géométrie, en particulier pour les concepts géométriques plats comme les triangles. L'étude a impliqué l'utilisation de la technologie RA pour intégrer des objets virtuels en deux dimensions (2D) et trois dimensions (3D) dans l'environnement réel, rendant l'apprentissage plus interactif et engageant (figure 2.20). Les chercheurs ont utilisé des codes-barres intégrant des éléments de RA représentant le pont Musi 6 de Palembang. L'étude a suivi un design de recherche de type validation qualitative, impliquant des expérimentations pilotes et des enseignements expérimentaux. Les outils de développement comprenaient l'utilisation de la plateforme *Assemblr*¹⁷ pour créer les éléments de RA et le site QR Code Monkey pour générer les codes-barres nécessaires.

L'application a été testée auprès des élèves d'une école secondaire (13 à 15 ans). Les résultats ont montré une augmentation significative de la motivation des élèves lorsqu'ils utilisaient la RA pour apprendre la géométrie. Les élèves ont manifesté un grand intérêt et une forte motivation, facilitant ainsi la compréhension des concepts géométriques. Les vidéos explicatives intégrées ont également aidé les enseignants à gagner du temps et à clarifier les activités à réaliser, rendant le processus d'apprentissage plus fluide et compréhensible pour les élèves.

¹⁷ <https://www.assemblrworld.com/>, consulté le 28/08/2024



Figure 2.20. AR Geometrie

2.1.2.20

Battle against the Colossus et Save the Planet

Le projet a été développé conjointement en Espagne et en Italie (Rebollo *et al.* 2022) et vise à rendre l'apprentissage des tables de multiplication de façon moins répétitive et ennuyeuse pour les enfants de l'enseignement primaire, en utilisant des jeux interactifs en RA. L'application propose deux mini-jeux : *Battle against the Colossus*, un jeu de combat au tour par tour, et *Save the Planet*, un jeu de lancer d'objets. Les enfants doivent résoudre des opérations de multiplication pour progresser dans les jeux. Les mini-jeux sont visualisés en RA, ce qui permet aux enfants de voir les opérations et les jeux dans leur environnement réel, augmentant ainsi l'engagement et la motivation pour l'apprentissage (figure 2.21). Le développement de l'application a suivi les principes de la conception centrée sur l'utilisateur. Les jeux ont été conçus en tenant compte des préférences des enfants pour les genres de jeux, identifiées via des enquêtes auprès des parents, des enseignants et des enfants eux-mêmes. L'application a été développée en utilisant *Unity 2019.2.3* avec le plugin *Vuforia* pour la gestion de la RA et la détection de surface (Ground Plane).

Une étude pilote a été menée avec 37 enfants âgés de 8 à 9 ans, répartis en deux groupes : un groupe expérimental de 18 enfants utilisant l'application RA et un groupe de contrôle de 19 enfants utilisant des méthodes traditionnelles d'exercices de multiplications. Les résultats ont montré que les enfants utilisant l'application RA ont trouvé l'apprentissage plus agréable et engageant, avec une amélioration notable de leurs compétences en multiplication. Le groupe expérimental a montré une meilleure rétention et une plus grande motivation par rapport au groupe de contrôle.



Figure 2.21. Jeux de Battle against the Colossus et Save the Planet !

2.1.2.21 AR-GLA

Le projet a été développé en Inde (Gargrish, Mantri, et Kaur 2022) et a pour objectif d'améliorer la rétention en mémoire de concepts géométriques chez les étudiants en utilisant une application de RA. L'application, nommée *Geometry Learning Assistant* (AR-GLA), a été conçue pour les élèves de niveau K-12, et l'étude a spécifiquement impliqué des élèves d'environ 17 à 18 ans. Le but est de faciliter la visualisation des objets multidimensionnels et d'améliorer la rétention à long terme de concepts géométriques. Les étudiants pouvaient manipuler des objets en 3D en utilisant leurs appareils mobiles pour scanner des marqueurs, ce qui affichait des objets virtuels superposés dans l'environnement réel (figure 2.22). Les outils de développement utilisés incluaient *Unity* pour la programmation et *Vuforia* pour le suivi des images.



Figure 2.22. AR-GLA

L'étude a impliqué un échantillon de 54 étudiants, répartis en deux groupes : l'un utilisant l'application en RA et l'autre utilisant des simulations interactives. Les résultats ont montré que l'apprentissage basé sur la RA fournissait une meilleure rétention des concepts par rapport à l'apprentissage basé sur les simulations interactives.

2.1.2.22 BRICKxAR/T

Le projet a été développé aux États-Unis (Shaghaghian *et al.* 2022) et vise à faciliter l'apprentissage des transformations géométriques et de leurs représentations mathématiques à travers une application éducative de RA nommée

BRICKxAR/T. L'objectif est d'aider les étudiants, de 18 à 22 ans, à comprendre intuitivement les matrices de transformation et les équations trigonométriques associées à travers un environnement d'apprentissage ludique. L'application utilise des modèles LEGO physiques et virtuels pour permettre aux étudiants de manipuler des objets en 3D et d'observer en temps réel les transformations géométriques et les fonctions mathématiques correspondantes (figure 2.23). Cette approche favorise un apprentissage incarné, où les mouvements physiques des étudiants sont synchronisés avec les visualisations mathématiques, renforçant ainsi leur compréhension des concepts géométriques et algébriques. Le développement de l'application a été réalisé en utilisant *Unity* pour la programmation et *ARKit*¹⁸ pour le suivi des images, avec une interface utilisateur sur *iOS*.

Une étude pilote a été menée avec 7 étudiants de premier cycle en ingénierie et en architecture. Les résultats ont montré une amélioration significative des scores mathématiques des étudiants après avoir utilisé l'application, avec une augmentation moyenne. Les étudiants ont trouvé les activités faciles à faire selon le questionnaire de : *NASA-TLX* et utile pour apprendre les matrices de transformation, comme indiqué sur le questionnaire *MSLQ*.

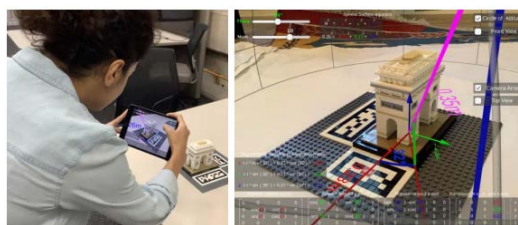


Figure 2.23. *BRICKxAR/T*

2.1.3 Synthèse de l'état de l'art

Ce tableau offre un aperçu des divers projets utilisant la RA et RM pour renforcer l'apprentissage des mathématiques. Chaque projet est évalué selon plusieurs critères dont l'âge cible, les objectifs pédagogiques, l'interactivité, les technologies utilisées lors du développement et le matériel nécessaire pour son utilisation, ainsi que le nombre de participants à l'expérimentation si applicable.

Tableau 2.1. Synthèse de l'état de l'art sur les projets et applications RM existantes en mathématiques

Nom du projet	Âge cible	Objectifs Pédagogiques	Interactivité	Technologie utilisée	Matériel nécessaire	Nb participants expé.
1 ^{er} état de l'art avec méthode classique						
Magic Boosed	7-12 ans	Améliorer la perception spatiale des formes géométriques	Affichage d'informations en RA sans interactions ou rétroaction	Non spécifiée	Smartphone, manuel d'exercices	8 élèves

¹⁸ <https://developer.apple.com/augmented-reality/>, consulté le 28/08/2024

Math Anxiety	6-15 ans	Réduire l'anxiété mathématique, augmenter la motivation	Quiz en RA sans interactions directes avec objets 3D et rétroactions via quiz imprimés	HP Reveal (Aurasma), Augment	Tablettes, feuilles de papier imprimées	137 élèves
Virtual Objects vs. Physical Objects	5-6 ans	Apprendre à reconnaître les formes géométriques	Interactions tactiles pour manipuler les formes en RA	Augment	Tablettes, cartes de formes géométriques	72 élèves
The Fraction Marathon	11 ans	Enseigner les fractions à travers des scénarios ludiques	Interaction riche avec aide contextuelle et bouton physique et rétroactions via vidéo et indications contextuelles	Non spécifiée	Makey Makey, projecteur, caméra, ordinateur	28 élèves
Ready to Learn Initiative	6-9 ans	Introduire les fractions sur la droite numérique	Interaction avec objets réels, sans rétroaction directe	Scratch 2 web version	Tablette, feuille de papier avec marqueurs	3 enseignants
The Village	6-12 ans	Réviser les fractions	Interaction riche avec manipulation de droite numérique en RA et rétroactions par ajustements automatiques des informations virtuelles	Scratch (programmation visuelle)	Makey Makey, projecteur, table, accessoires	/
Robot Game	5-6 ans	Enseigner les additions en utilisant des objets physiques	Interaction avec objets physiques et rétroaction continue sur la longueur du bras du robot	CETA OpenCV, libgdx	Tablette, support pour tablette, blocs en bois, miroir	19 élèves
MaR-T	3-5 ans	Comprendre et comparer des valeurs	Interaction sociale et cognitive avec personnage virtuel qui offre aussi des rétroactions et récompenses	OpenCV, Lottie, Boddymovin	Caméra, projecteur	10 élèves
2° état de l'art avec de l'intelligence artificielle générative						
AR Geometrical	13-14 ans	Améliorer la compréhension de la géométrie et développer la pensée computationnelle	Feedback en temps réel sur les réponses et guidage	GeoGebra	Smartphones ou tablettes compatibles avec AR	10 élèves
AR - Geometrie	13-14 ans	Améliorer la réussite académique, les compétences d'apprentissage autorégulé et la motivation des élèves	Possibilité de déplacer les objets et avoir des informations géométriques sur ce dernier	Unity, Tinkercad, Vuforia	Smartphones ou tablettes	40 élèves
La pensée computationnelle pour la Géométrie	12-13 ans	Améliorer les compétences en géométrie	Interaction et rétroaction qui permettent d'avoir les informations relatives à certaines formes géométriques	Unity, Vuforia	Smartphones ou tablettes, cartes et objets 3D	124 élèves
AR-GeoITS	13-15 ans	Améliorer la motivation et la performance en géométrie à travers un apprentissage personnalisé	Validation automatique des exercices	Unity, Vuforia	Smartphones ou tablettes, marqueurs	106 élèves

Spatial Ability in Geometry	12-15 ans	Améliorer les capacités spatiales mathématiques à travers la visualisation 3D	Interactions via des boutons 2D dans l'application, et manipulation des objets virtuels 3D	Unity, Blender	Smartphones ou tablettes, objets imprimés en 3D	Testé, mais pas de détails
EU-CLIDA	12-13 ans	Rendre l'apprentissage des concepts géométriques plus concret et interactif	Interactions avec des cartes RA intégrées.	Adobe Animate, Blender, Affinity Design	Smartphones, cartes imprimées avec images géométriques bidimensionnelles	30 élèves
ETNICAR	13-15 ans	Explorer le potentiel pédagogique de la RA pour l'apprentissage de la géométrie en 3D	Interactions mobiles avec menus RA	ETNICAR TG 4.0, vidéos éducatives	Smartphones ou tablettes	26 élèves
Ethnomathématique AR-Géométrie	12-15 ans	Lier les concepts mathématiques à la culture locale pour rendre l'apprentissage plus concret	Calcul des différentes dimensions des monuments scannés	Unity, Vuforia	Smartphones ou tablettes, objets culturels imprimés en 3D	72 élèves
Cooking Math	11-12 ans	Promouvoir l'apprentissage actif et améliorer la compréhension des concepts mathématiques	Interaction qui permet de réaliser des opérations de fractions diverses, tout en recevant des rétroactions	Unity, Vuforia	Appareils mobiles, codes QR dans les manuels scolaires	35 élèves
AR Geogebra	8 à 9 ans	Améliorer la compréhension des concepts géométriques et augmenter la motivation des élèves	Les élèves peuvent interagir avec des objets géométriques 3D, de plus les élèves reçoivent une rétroaction instantanée lorsqu'ils interagissent avec les objets géométriques	GeoGebra, Unity, Blender	Tablettes et objets géométriques imprimés en 3D	33 élèves
AR Géométrie - Indonésie	13-15 ans	Augmenter la motivation et faciliter l'apprentissage des concepts géométriques	Le scan de QR code, déclenche des vidéos explicatives	Assemblr, QR Code Monkey	Smartphones ou tablettes, codes-barres pour objets virtuels	Testé, mais non pas de détails.
Battle against the Colossus et Save the Planet	8-9 ans	Rendre l'apprentissage des tables de multiplication moins répétitif et plus motivante	Interactions multiples permettant de résoudre les exercices en fonction des mini-jeux.	Unity, Vuforia	Smartphones	37 élèves
AR-GLA	17-18 ans	Améliorer la rétention de la mémoire des concepts géométriques	Les élèves peuvent interagir avec des objets géométriques 3D et ont accès à une présentation audio (narration) en plus des visuels à l'écran	Unity, Vuforia	Smartphones ou tablettes, marqueurs	54 élèves
BRICKx AR/T	18-22 ans	Faciliter l'apprentissage des transformations géométriques et des équations trigonométriques	Manipulation et interactions avec des modèles LEGO physiques et des modèles virtuels avec rétroactions immédiates	Unity, AR-Kit	Smartphones ou tablettes, modèles LEGO physiques et virtuels	7 étudiants
Magic Boosed	7-12 ans	Améliorer la perception spatiale des formes géométriques	Affichage d'informations en RA sans interactions ou rétroaction	Non spécifiée	Smartphone, manuel d'exercices	8 élèves

Math Anxiety	6-15 ans	Réduire l'anxiété mathématique, augmenter la motivation	Quiz en RA sans interactions directes avec objets 3D et rétroactions via quiz imprimés	HP Reveal (Aurasma), Augment	Tablettes, feuilles de papier imprimées	137 élèves
Virtual Objects vs. Physical Objects	5-6 ans	Apprendre à reconnaître les formes géométriques	Interactions tactiles pour manipuler les formes en RA	Augment	Tablettes, cartes de formes géométriques	72 élèves
The Fraction Marathon	11 ans	Enseigner les fractions à travers des scénarios ludiques	Interaction riche avec aide contextuelle et bouton physique et rétroactions via vidéo et indications contextuelles	Non spécifiée	Makey Makey, projecteur, caméra, ordinateur	28 élèves
Ready to Learn Initiative	6-9 ans	Introduire les fractions sur la droite numérique	Interaction avec objets réels, sans rétroaction directe	Scratch 2 web version	Tablette, feuille de papier avec marqueurs	3 enseignants
The Village	6-12 ans	Réviser les fractions	Interaction riche avec manipulation de droite numérique en RA et rétroactions par ajustements automatiques des informations virtuelles	Scratch (programmation visuelle)	Makey Makey, projecteur, table, accessoires	/

Avant de réaliser une synthèse et pour consolider notre état de l'art, nous avons intégré les deux articles de revue systématique qui analysent et évaluent l'impact de la RA dans certains domaines des mathématiques.

2.1.4 La perspective des enseignants sur la RA pour la géométrie

L'étude malaisienne de Nadzeri *et al.* (2023) explore le point de vue des enseignants sur la nécessité de développer une application d'apprentissage en RA pour les sujets de géométrie. L'étude a impliqué 52 enseignants de mathématiques du primaire provenant de 43 écoles du nord de la Malaisie. Ces enseignants ont répondu à un questionnaire en ligne visant à recueillir leurs avis sur les stratégies d'apprentissage, la conception de la présentation et la conception de l'interactivité pour l'intégration de l'AR dans l'éducation. Les résultats ont montré un besoin significatif pour le développement d'applications AR, avec une forte importance accordée à la conception des stratégies d'apprentissage, à la présentation et à l'interactivité. Les résultats ont également souligné l'importance de concevoir des applications AR utilisant des couleurs appropriées pour l'interface afin qu'elle soit conviviale et visuellement attrayante, une navigation simple, des tâches interactives et des activités favorisant la visualisation des formes. Les applications AR doivent également fournir un contenu aligné sur le curriculum de mathématiques et offrir des tutoriels faciles à comprendre.

2.1.5 État de l'art systématique sur les outils de RA pour les mathématiques

Dans un autre projet de recherche malaisien, Jabar *et al.* (2022) ont récemment proposé une revue de littérature systématique sur les outils de RA pour l'apprentissage des mathématiques. La revue a été menée en suivant les lignes directrices PRISMA, et a impliqué l'identification, le tri, l'éligibilité et l'inclusion de données provenant de cinq moteurs de recherche : *Scopus*, *ProQuest*, *Springer Link*, *Science Direct* et *EBSCOhost*. Au total, 20 articles ont été sélectionnés pour l'analyse.

Les résultats montrent que l'apprentissage basé sur la RA était mis en œuvre dans plusieurs domaines des mathématiques, y compris la géométrie, l'algèbre, les statistiques et la probabilité, ainsi que d'autres domaines comme la modélisation mathématique. L'efficacité de la RA dans l'enseignement des mathématiques a été évaluée en termes d'effets cognitifs, affectifs et psychomoteurs. Les études citées démontrent aussi que la RA peut améliorer la compréhension conceptuelle, les compétences procédurales et les performances académiques des élèves.

Les articles inclus dans cette revue ont utilisé des méthodes de recherche quantitatives, des méthodes mixtes et des recherches de conception éducative. Les données ont révélé une augmentation constante du nombre de publications sur l'apprentissage des mathématiques basé sur la RA au fil des ans, avec une concentration notable des recherches en Indonésie et en Malaisie.

2.1.6 Analyse globale

Dans cette partie, nous proposons une analyse de notre état de l'art des 24 études outils de RA ou de RM pour l'apprentissage des mathématiques. Nous prenons également en compte les deux études présentées ci-dessus. Nous discutons d'abord des bénéfices pédagogiques, puis de la nature des interactions proposées par les applications et enfin de l'équipement et des logiciels utilisés pour le développement.

2.1.6.1 Analyse des bénéfices pédagogiques

Notre état de l'art montre que la RM peut être utilisée pour enseigner les mathématiques aux enfants, mais aussi aux élèves plus âgés. Elle peut, par exemple, être utilisée pour apprendre à compter, dès le plus jeune âge, comme dans le jeu de *Robot Game* ou *MaR-T*. Il existe de nombreuses autres applications de RM qui enseignent les bases des additions et des soustractions telles que *Counting With Paula RA* (Weng *et al.* 2019) ou *Flashcards Addition* (Bujak *et al.* 2013) ainsi que des applications pour apprendre les multiplications comme *Multiplications : the Colossus et Save the Planet* (Rebollo *et al.* 2022). L'efficacité de la RM pour enseigner les bases des mathématiques semble être due à sa capacité à immerger les enfants dans un environnement attrayant et à éveiller leur curiosité (Liou *et al.* 2017) ce qui accroît leur compréhension et motivation (Radu 2014).

La RM est également bien adaptée pour enseigner la géométrie puisque 15/22 des applications de cet état de l'art sont dédiées à la géométrie (ex : *Magic Boosed, EUCLIDA*). Ces projets montrent que la technologie de RM peut améliorer la représentation spatiale des élèves, ce qui est un moyen efficace d'apprendre la géométrie (Kaufmann 2004).

De plus, l'utilisation de la RM, comme dans *The Fraction Marathon, Ready To Learn Initiative* ou *The Village* ou bien *Cooking Math*, peut transformer un sujet complexe et peu populaire en une expérience amusante et captivante.

L'étude de *AR-MobileMathTrails* (Cahyono *et al.* 2020) montre aussi l'impact de la RM dans la modélisation mathématique, par la liaison que crée la RM entre le monde réel et les concepts mathématiques. L'efficacité de la RM pour l'apprentissage des mathématiques s'étend également aux élèves malvoyants, en proposant des expériences multi-sensorielles, qui leur confèrent plus d'autonomie (Mikułowski et Brzostek-Pawłowska 2020). Enfin, comme nous le montre l'étude *ARMath* (Kang *et al.* 2020), la RM permet d'utiliser des objets réels familiers des élèves (e.g : cubes, piles, pièces de monnaie) en leur associant des augmentations, ce qui conduit à des usages intuitifs.

2.1.6.2 Analyse des interactions proposées en Réalité Mixte

Les applications analysées dans notre état de l'art présentent deux types d'interactions de RM. Le premier groupe propose des interactions de RM très légères et basiques, telles que *Ready To Learn Initiative*, *Virtual Objects vs. Physical Objects* et *Magic Boosed*. Ces applications affichent uniquement des informations ou des objets virtuels sur des objets réels. Au mieux, les élèves peuvent manipuler, tourner et modifier la taille des augmentations virtuelles, mais souvent, ces augmentations ne proposent aucune interaction. Une large majorité des applications de RM pour l'enseignement sont d'ailleurs dans cette catégorie (n/22). Ces applications ont l'avantage d'être simple à développer et facile à mettre en place puisqu'elles ne nécessitent qu'une tablette ou un smartphone et des marqueurs imprimés sur papier ou carton.

La deuxième catégorie d'application offre des interactions de RM plus riches, dans laquelle on retrouve *MaR-T*, *The Village*, *Le marathon of fractions*. Nous employons le qualificatif « riche », car, en plus des augmentations en RA, la manipulation et la position des objets réels ont un impact sur les applications. Dans *MaR-T* par exemple, c'est la position des cubes qui déclenche le niveau suivant du jeu. Certaines de ces applications offrent également des commentaires et une aide personnalisée. Ces interactions riches présentent des avantages indéniables pour différents domaines d'apprentissage. Par exemple, des études dans le domaine médical montrent que la présence de rétroactions contribue au développement des compétences psychomotrices et cognitives (Kotranza *et al.* 2009). Une autre étude (Birt *et al.* 2018) montre que les élèves apprécient ce type d'interactions riches, et en particulier le feedback, qui favorise un apprentissage autorégulé, à leur propre rythme. Cependant, les applications mentionnées ci-dessus nécessitent toutes des équipements spécifiques comme des projecteurs, des caméras, des objets 3D, ainsi que de l'espace, rendant ainsi leur utilisation dans une école compliquée à mettre en place et à gérer. Comme nous le verrons dans la suite, ces interactions riches sont également bien plus complexes à développer.

2.1.6.3 Analyse du matériel et des logiciels de Réalité Mixte

Les matériels les plus utilisés pour les applications de RM sont les smartphones ou les tablettes. C'est par exemple le cas d'*AR-GLA* ou de *BRICKxAR/T*. Selon une étude suisse, sur plus de 1000 élèves, 78% des 6 à 13 ans utilisent régulièrement un téléphone portable et 3/4 des élèves de 12 à 13 ans en possèdent déjà un smartphone (Waller, Gregor, *et al.* 2019). De plus, l'utilisation des appareils numériques se fait de plus en plus tôt (Cheung 2016). Le fait que la majorité des enfants soient déjà habitués à utiliser ces équipements est un avantage important pour leur utilisation en classe. En revanche, les tablettes ou smartphones ne permettent pas d'avoir les mains libres pour manipuler des objets, l'utilisateur devant les tenir au moins avec une main. De plus, certains appareils ne prennent pas en charge les technologies avancées telles que la technologie *Ground Plane* de *Vuforia*. Celle-ci permet de détecter automatiquement les volumes dans une pièce et de placer du contenu virtuel sur une table par exemple en non à travers, ce qui confère beaucoup plus de réalisme aux augmentations.

D'autres applications de RM nécessitent des projecteurs et des caméras, comme pour les applications *The Village*, *The marathon of fractions* et *Math Anxiety*. Ce matériel, peu onéreux, à l'avantage de laisser les mains libres aux utilisateurs pour manipuler des objets. De plus, les projecteurs ont un large champ d'affichage ce qui facilite le travail de groupe (Anastassova *et al.* 2007). Cependant, ils occupent beaucoup de place et sont complexes à installer. En effet, le projecteur et la caméra de suivi doivent être calibrés et placés directement au-dessus de la zone de travail. Le Robot Game propose une alternative

simplifiée de cette configuration avec une tablette, un support et un petit miroir. Au lieu d'être projetées sur la table, les augmentations sont affichées directement sur l'écran de la tablette et l'application utilise la caméra de la tablette grâce à un miroir. Cette configuration est simple à mettre en place, mais offre un champ de vision étroit.

Enfin, même si aucune des applications ci-dessus n'utilise cette technologie, il est important de citer les lunettes de RA, principalement utilisées pour la formation professionnelle, en raison de leur coût très élevé (à partir de 4 700€ pour l'*hololens 2* de *Microsoft*¹⁹). Celles-ci ont l'avantage d'offrir une bonne perception de la profondeur (Van Krevelen et Poelman 2010). Ces appareils ont également l'avantage d'être facilement transportables et de laisser les mains libres. Les *hololens* sont par exemple utilisés, dans le domaine médical, afin d'entraîner les étudiants (Maniam *et al.* 2020).

Il existe plusieurs types de logiciels pour concevoir des applications de RM. Les enseignants peuvent utiliser des outils de création d'applications de RM qui leur permettent de créer des applications sans aucune compétence en programmation informatique, comme *MIXAP*, *Augment*. Grâce à des interfaces simples, ils peuvent enregistrer leurs marqueurs (objet, image ou QR Code) et les associer à des documents ou des modèles 3D. Plusieurs bibliothèques offrent d'ailleurs des modèles 3D gratuits comme *SketchUp* ou l'*Assetstore*²⁰ de *Unity*. Les applications créées avec ces outils ne supportent que des interactions RM très légères, qui consistent simplement à afficher du contenu virtuel sur le marqueur détecté. Ces applications ne prennent pas en charge l'aide contextualisée ou la validation automatique des activités. Elles ne permettent pas non plus de créer des scénarios d'activités qui se suivent, Mise à part *MIXAP* qui le fait en partie.

Il existe plusieurs technologies open source comme *Artoolkit* ou *OpenCv*, utilisées, par exemple, pour développer *MaR-T* et *Robot Game*. Cependant, ces technologies nécessitent une expertise avancée en programmation et traitement d'image, ce qui limite le nombre de projets pouvant en bénéficier et augmente les délais et coûts de conception.

Enfin, il existe plusieurs technologies payantes, proposant généralement une version gratuite avec moins d'options, qui permettent aux développeurs de créer des applications de RM, sans être expert en reconnaissance d'images. La plus populaire est *Vuforia* qui offre des services de bonne qualité, stables et efficaces.

¹⁹ <https://www.microsoft.com/fr-fr/hololens/>, consulté le 28/08/202

²⁰ <https://assetstore.unity.com/>, consulté le 28/08/2024

2.2 État de l'art sur mes méthodes et les modèles de conception de Jeu sérieux

2.2.1 Méthode

Comme pour l'état de l'art sur les jeux éducatifs présenté dans la première partie de ce chapitre, nous avons utilisé l'outil *ScholarGPT* pour effectuer une recherche sur les modèles de jeux sérieux, en suivant la méthode *PRISMA*, nous détaillons les informations entrées dans l'annexe (Prompt : Etat de l'art). Cependant, nous avons remarqué que les recherches par mot-clé donnaient très peu de résultats pertinents, car la plupart des modèles décrits dans les articles proposaient des *Frameworks* ou des API techniques pour développer des jeux sérieux et non des modèles de conception à plus haut niveau, qui permettent d'identifier les éléments ludiques, pédagogiques et les interactions à proposer aux apprenants. Nous avons donc choisi de demander à *ScholarGPT* des travaux similaires à deux thèses : *LEGADEE* (Marfisi-Schottman 2012) et *MIRLEGADEE* (Orliac 2013).

Cette recherche a permis d'identifier 120 études (étape 1. *Identification de la méthode PRISMA*). Ces études ont ensuite été filtrées selon leur titre et résumées afin d'aboutir à 45 études pour une évaluation plus approfondie (2. *Screening*). Ensuite les études ont été réduites à 12, en fonction de l'accessibilité des études et de leurs pertinences notamment leurs capacités à éclairer les enjeux spécifiques liés à la conception de jeux sérieux en RM (3. *Eligibility*). Après l'application des critères finaux, qui comprenaient la pertinence directe pour notre sujet de recherche et l'accès libre aux textes complets, **nous avons retenu 4 articles pour inclusion dans notre revue de littérature plus les 2 thèses initiales (*LEGADEE* et *MIRLEGADEE*)** (4. *Inclusion*).

Dans la suite de ce chapitre, nous présentons chacun de ces 6 modèles de conception et les concepts importants qu'ils intègrent. Ces éléments seront repris, dans le chapitre suivant pour proposer un nouveau modèle.

2.2.1.1 *LEGADEE*

LEGADEE (Marfisi-Schottman 2012) est une plateforme informatique conçue pour assister la conception de jeux sérieux éducatifs, connue sous l'appellation complète de *LEarning Game DEsign Environment*. Elle a été développée pour faciliter la collaboration entre divers acteurs du processus de création, ainsi que la modélisation et scénarisation des contenus pédagogiques et ludiques.

Les travaux de recherche sur *LEGADEE* mettent en lumière comment cet environnement permet aux concepteurs de jeux de bénéficier d'un outil adapté à leur rôle spécifique, tout en intégrant un système de validation qui aide à maintenir l'équilibre entre les éléments pédagogiques et ludiques dans le jeu conçu.

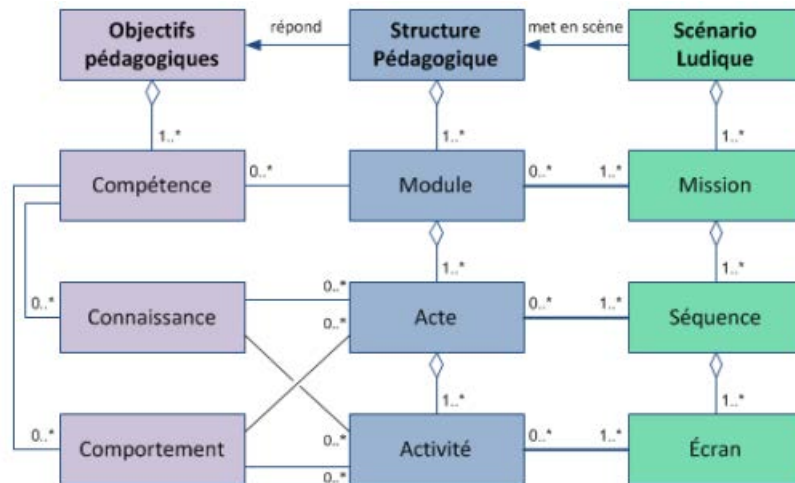


Figure 2.24. Modèle LEGADEE

LEGADEE est conçu pour optimiser le processus de création de jeux en fournissant des indicateurs spécifiques pour le développement d'un scénario équilibré qui intègre toutes les compétences et objectifs pédagogiques fixés dès le début du projet, comme illustré dans la Figure 2.24.

Le modèle *LEGADEE* propose trois sous-modèles : les objectifs pédagogiques, la structure pédagogique, et le scénario ludique.

Les objectifs pédagogiques sont au cœur de la conception des jeux sérieux, car ils définissent ce que les apprenants doivent maîtriser après le jeu. Ces objectifs se décomposent en compétences métiers spécifiques que le jeu vise à développer. Chaque compétence est associée à des connaissances précises et à des comportements attendus que les apprenants doivent acquérir et démontrée pendant le jeu.

La structure pédagogique organise l'apprentissage en modules, actes et activités, où chaque module correspond à une compétence clé du curriculum. Les actes sont des ensembles d'activités qui visent à renforcer une compétence spécifique à travers des tâches pratiques et des défis contextuels. Cette structure sert de squelette pour la transposition des objectifs pédagogiques en activités concrètes, facilitant ainsi l'intégration des enseignements dans le *game-play*.

Le scénario ludique transforme la structuration pédagogique en une expérience de jeu immersive. Chaque module est traduit en missions dans le jeu, et chaque acte devient une séquence de jeu. Les activités pédagogiques sont incarnées par des écrans interactifs où les joueurs accomplissent des tâches spécifiques qui contribuent directement à l'acquisition des compétences visées. Ce niveau de scénarisation permet une immersion profonde et engageante, rendant l'apprentissage à la fois ludique et efficace.

Enfin, l'évaluation de *LEGADEE* s'est faite à travers des études comparatives où des scénarios conçus avec et sans l'aide de *LEGADEE* ont été évalués. Les résultats indiquent que l'utilisation de *LEGADEE* tend à améliorer la qualité des jeux éducatifs sur plusieurs aspects, bien que des améliorations restent possibles, notamment en ce qui concerne la méthode d'évaluation elle-même.

2.2.1.2 MIRLEGADEE

MIRLEGADEE (Orliac 2013) est une extension de *LEGADEE* adaptée aux jeux sérieux avec de la RM. Ce système, acronyme de *Mixed Reality Learning Game Design Environment*, intègre des fonctionnalités spécifiques pour gérer la

complexité inhérente à la RM, tout en offrant un support aux concepteurs à travers différents stades du développement de jeu.

MIRLEGADEE est un modèle d'aide à la conception qui intègre de manière effective la RM aux principes pédagogiques. Il aide à structurer le développement des jeux en utilisant un modèle formel qui organise les éléments pédagogiques, ludiques et technologiques.

Comme illustré dans la Figure 2.25, les spécifications globales définissent les paramètres fondamentaux du projet, incluant les caractéristiques des participants, les objectifs pédagogiques, les éléments du jeu lui-même, et le contexte physique (choix des éléments de jeu et de systèmes de réalité mixte) et technologique dans lequel le jeu se déroule. Ces spécifications servent de cadre pour la structuration pédagogique détaillée qui se divise en activités conçues pour atteindre les objectifs d'apprentissage spécifiques. Chaque activité est intégrée dans un scénario de mise en scène ludique, qui transforme les modules pédagogiques en séquences interactives et engageantes.

Ce scénario se compose de tâches spécifiques qui peuvent être exécutées par les utilisateurs ou automatiquement par le système, enrichissant ainsi l'expérience d'apprentissage par des interactions dynamiques. Les personnages du jeu, y compris les participants et éventuels personnages non joueurs, ainsi que les dispositifs et objets réels utilisés, jouent un rôle crucial dans l'immersion des apprenants et l'intégration des éléments de RM.

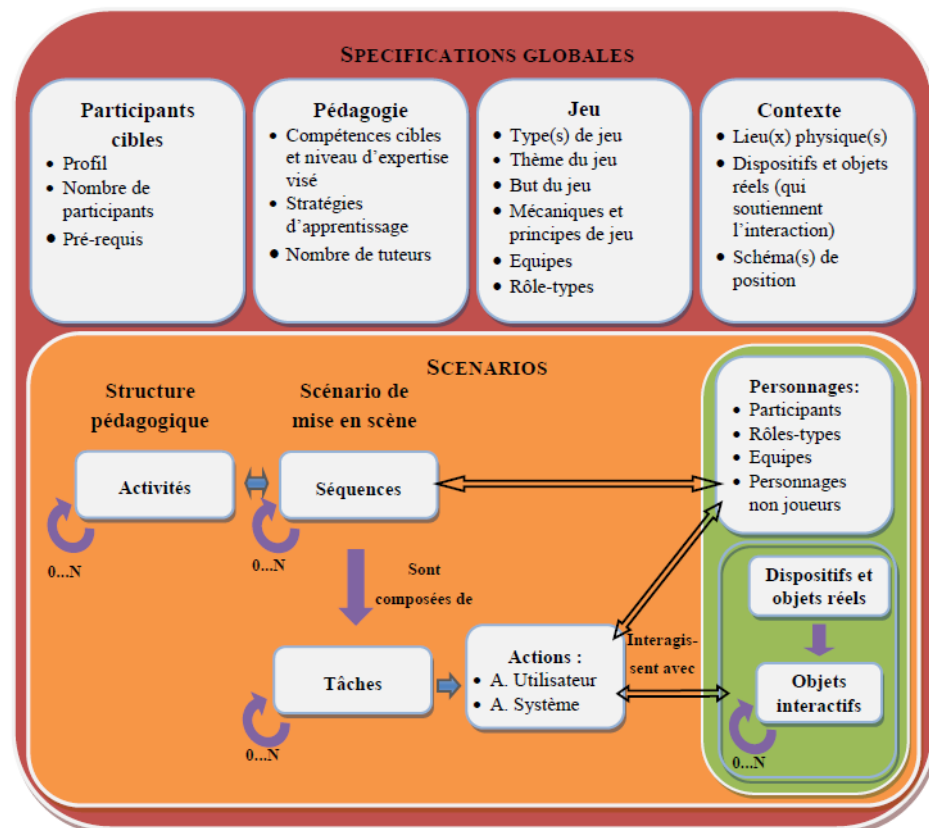


Figure 2.25. Modèle F-MRLG

2.2.1.3 Modèle ATMSG - Activity Theory-based Model for Serious Games

Les travaux de Gauthier *et al.* (2022) explorent la refonte d'un jeu éducatif existant à l'aide du cadre de conception *Activity Theory-based Model of Serious Games* (ATMSG), basé sur la théorie de l'activité pour les jeux sérieux. Le jeu *Stop & Think* avait initialement été conçu pour entraîner les enfants à utiliser

leurs compétences de contrôle inhibiteur lors de la résolution de problèmes de mathématiques et de sciences contre-intuitifs. L'étude souligne que *Stop & Think* était efficace lorsque dirigé par un enseignant en classe, mais avec le passage à l'apprentissage autonome durant la pandémie de COVID-19, une nécessité s'est fait sentir de modifier le jeu pour qu'il puisse être utilisé de manière indépendante par les enfants, en contexte de scolarisation à domicile.

Le modèle *ATMSG* a été utilisé de manière itérative pour cette refonte et notamment pour y intégrer des mécanismes de rétroaction, de soutien et d'adaptation directement dans le gameplay, afin de rendre les apprenants autonomes. La Figure 2.26 illustre comment ce modèle est appliqué à la refonte du jeu *Stop & Think*. Ce modèle visuel détaille le flux interactif du jeu, décomposant chaque étape du processus de jeu en actions, outils, et objectifs spécifiques.

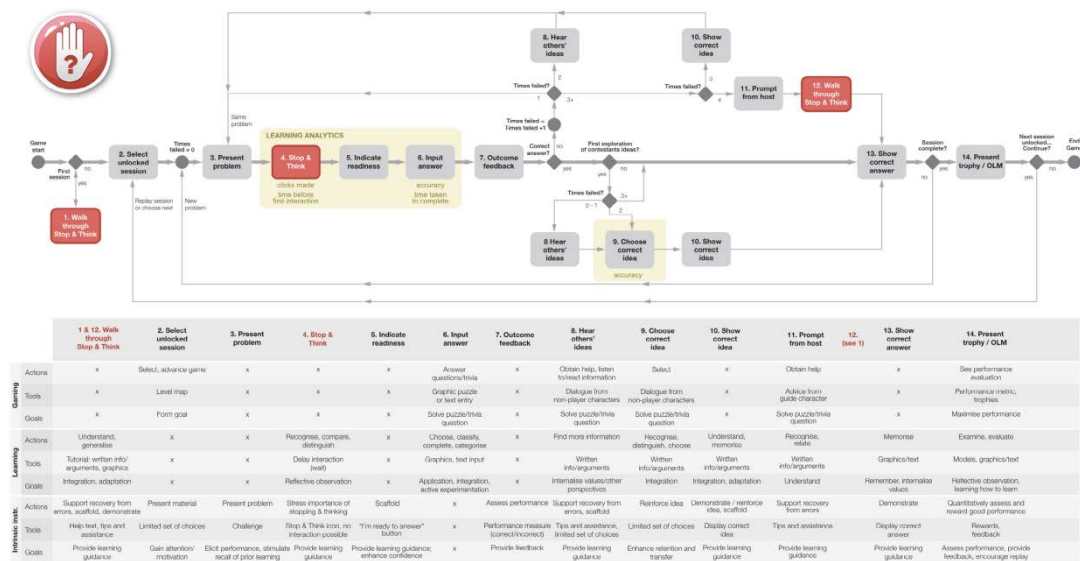


Figure 2.26. Modèle ATMSG appliqué au jeu Stop & think

Ce modèle met particulièrement l'accent sur l'**interaction**, permettant aux concepteurs de détailler les différents types d'interactions homme/machine possibles. En outre, il adapte ces interactions aux enfants, ainsi, le jeu demeure à la fois engageant et éducatif, tout en répondant aux besoins spécifiques des jeunes apprenants. Grâce à ce cadre, les concepteurs peuvent créer des expériences utilisateur personnalisées qui favorisent l'engagement, la compréhension et le développement des compétences, tout en intégrant des mécanismes de feedback et de soutien adaptés au contexte d'apprentissage autonome ou dirigé par un enseignant.

Les auteurs de l'étude décrivent les défis rencontrés avec l'utilisation du cadre *ATMSG*, notamment sa difficulté à représenter des décisions de conception non structurées et son format peu pratique pour les jeux plus complexes. Malgré ces défis, le cadre a été utile pour documenter les changements apportés au jeu au cours du processus de refonte et servir de document de conception pour les développeurs.

2.2.1.4 Modèle GDLC - Game Development Life Cycle

L'étude de Roedavan *et al.* (2021) propose un modèle de développement pour les jeux sérieux. Il repose sur une **approche itérative** du cycle de vie du développement de jeux (*Game Development Life Cycle - GDLC*), une adaptation du cycle de vie du développement logiciel (*Software Development Life Cycle -*

SDLC). Ce modèle est spécifiquement conçu pour refléter les caractéristiques uniques des jeux sérieux qui les distinguent des jeux éducatifs standards ou des produits de gamification.

Les quatre phases principales du *GDLC* utilisées dans ce modèle sont : l'analyse, la production, les tests et la publication. Chaque phase est structurée pour incorporer des éléments de jeu, qui se concentre sur les engagements affectifs, comportementaux, cognitifs et sociaux/culturels. Ces engagements sont essentiels pour augmenter la mémorisation des joueurs et améliorer l'efficacité de l'apprentissage à travers les jeux. Comme illustré dans la Figure 2.26, voici les détails de chacune des phases :

- Dans la phase d'**Analyse**, l'activité clé est l'idéation du contenu éducatif, qui consiste à définir les objectifs d'apprentissage et à élaborer le contenu pédagogique. Cette phase repose sur des aspects affectifs, motivationnels, cognitifs, et sociaux pour engager et motiver les apprenants dès le début du processus de développement.
- La phase de **Production** se concentre sur le développement technique et artistique, y compris les mécaniques d'apprentissage et d'évaluation, tout en construisant un prototype. Cette phase vise à traduire les objectifs éducatifs en mécanismes de jeu engageants, en utilisant des éléments comme le storytelling, l'esthétique visuelle, et des interactions utilisateurs efficaces pour faciliter l'apprentissage.
- La phase de **Test** implique des tests rigoureux et une validation pour s'assurer que le jeu fonctionne comme prévu et atteint les objectifs pédagogiques fixés. Les retours des utilisateurs jouent un rôle crucial ici pour évaluer l'efficacité du jeu et apporter les ajustements nécessaires.
- Enfin, la phase de **Publication** aboutie à la version finale du jeu, raffinée grâce aux tests et au retour des utilisateurs. Cette version finale vise à maximiser l'engagement des apprenants dans un cadre d'apprentissage ludique et éducatif, solidement ancré dans les objectifs pédagogiques initialement définis.

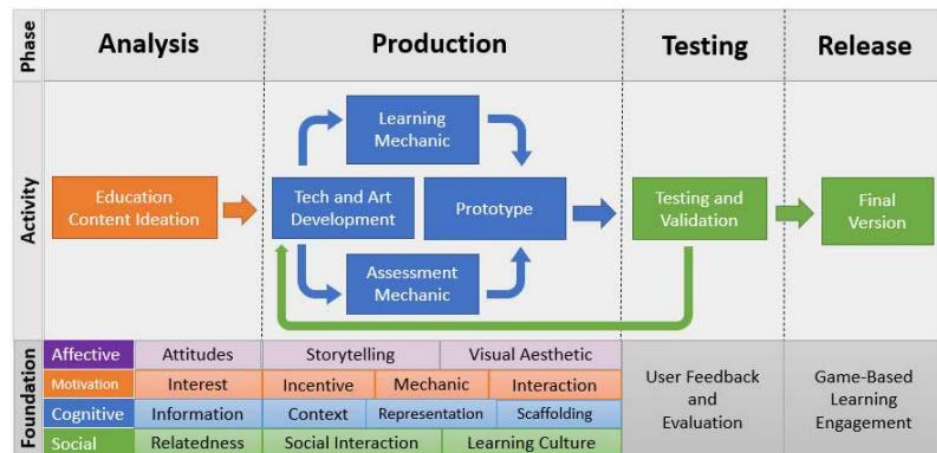


Figure 2.26. Modèle GDLC de développement de jeu sérieux

Cette approche itérative permet des ajustements continus en fonction des retours des utilisateurs et des avancées technologiques, pour que le jeu reste pertinent et efficace. Le modèle suggéré a été validé empiriquement en développant plusieurs prototypes de jeux pour les universités, les entreprises nationales et l'armée, confirmant son applicabilité dans divers contextes éducatifs et de formation.

2.2.1.5 Serious Game Design Framework

L'étude de Bunt, Greeff, et Taylor (2024) propose un nouveau cadre de conception pour les jeux sérieux : le *Serious Game Design Framework*, **centré sur les parties prenantes** (Développeurs, Experts du domaine, Enseignants et formateurs, concepteur de jeux, Joueurs, Financeurs et sponsors). Cette étude cherche à pallier les insuffisances des méthodes traditionnelles de conception de jeux sérieux qui tendent souvent à négliger certains besoins et préférences des différentes parties prenantes.

Le modèle, illustré dans la Figure 2.27, détaille un cadre de conception de jeux sérieux exhaustif, centré sur les parties prenantes à chaque étape du développement, de l'analyse initiale à la production et au-delà lors de l'usage. Le volet *Continuous Management* souligne l'importance de l'engagement continu des parties prenantes. Ce segment guide aussi les utilisateurs à travers des stratégies pour suivre, transmettre des messages, consulter, dialoguer et collaborer avec les parties prenantes pour assurer une implication active tout au long du projet. La section *Stakeholder Analysis* incite à l'identification, la catégorisation et l'investigation des relations entre les parties prenantes. Elle propose un processus méthodique pour comprendre qui sera impacté par le jeu et comment, ainsi que pour cartographier les influences et développer des plans d'action efficaces basés sur cette analyse.

Le côté droit de la figure présente les *Development Tasks*, où la vision du jeu est définie et les architectures d'entreprise, d'information et de systèmes sont optimisées. Cette section propose également des stratégies pour valider les idées, entreprendre des explorations supplémentaires, et gérer la gouvernance du projet. Les phases de développement, allant de la pré-production à la post-production, sont présentées en détail, illustrant la progression du concept initial au prototype, et finalement à la version finale du produit.

Enfin, les *Inputs and Outputs* du processus de développement sont illustrés, montrant comment les documents de conception de jeux, les rapports de tests, les notes de réunion, et autres inputs cruciaux sont transformés en produits tangibles comme des versions de prototypes, des matériaux marketing, et des manuels d'utilisation.

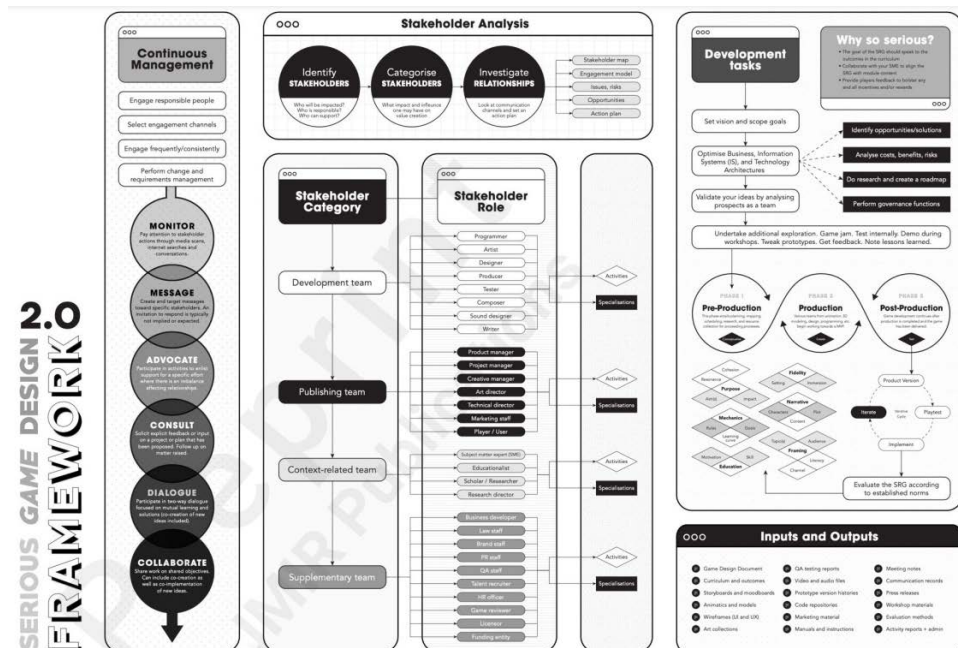


Figure 2.27. Serious Game Design Framework

Les résultats de cette étude ont confirmé l'efficacité du *Serious Game Design Framework* dans la gestion des parties prenantes, le rendant ainsi un outil structuré pour la conception et la mise en œuvre de jeux sérieux. Cependant, bien que le cadre soit apprécié pour son approche structurée, les experts ont suggéré qu'il pourrait bénéficier d'une simplification et d'une orientation plus claire concernant les éléments de conception de jeux.

2.2.1.6 Modelling Serious Games for Enhancing End-User Cyber Security Awareness

L'étude Nicho (2017) traite d'une approche structurée pour le développement de jeux sérieux visant à améliorer la sensibilisation à la cyber sécurité. Il présente un modèle qui intègre la conception de jeux sérieux avec des stratégies éducatives pour former efficacement les utilisateurs à reconnaître et à répondre aux menaces de cyber sécurité. Ce modèle, comme illustré dans la Figure 2.28, structure l'approche de développement des jeux autour de trois axes principaux : le jeu, le joueur, et la connaissance.

Dans l'axe du **jeu**, les éléments clés incluent les mécaniques de jeu, les défis et le contenu. Les mécaniques de jeu définissent les règles, les rôles des joueurs, et leurs responsabilités, tandis que les défis peuvent être contre d'autres joueurs, contre le temps, ou des défis personnels, enrichissant l'expérience et augmentant la difficulté. Le contenu du jeu est conçu pour engager les joueurs à travers différents scénarios d'attaques de cyber sécurité, offrant une perspective à la fois de l'attaquant et du défenseur, et aligné avec les objectifs de formation.

L'axe du **joueur** met l'accent sur les caractéristiques des joueurs, leur motivation, et leur connaissance préalable. Les caractéristiques comprennent l'évaluation des connaissances et compétences du joueur, et la capacité du jeu à tester et simuler des interventions sur les postes de travail des utilisateurs. La motivation est stimulée par des designs attrayants et des scénarios pertinents qui assurent la confiance en la réussite et mesurent la satisfaction des utilisateurs, tout en personnalisant le contenu pour aligner le jeu avec les objectifs de gestion des utilisateurs.

Enfin, l'axe de la **connaissance** aborde les objectifs d'apprentissage, les évaluations, et les certifications. Les objectifs sont clairement définis pour chaque niveau de compétence, des novices aux experts, avec des stratégies de renforcement adaptées et une simulation réaliste des attaques. L'évaluation est continue, offrant des retours immédiats et une analyse des tendances de progression de l'utilisateur. La certification récompense la réussite et la complétion, validant les compétences acquises à travers le jeu.

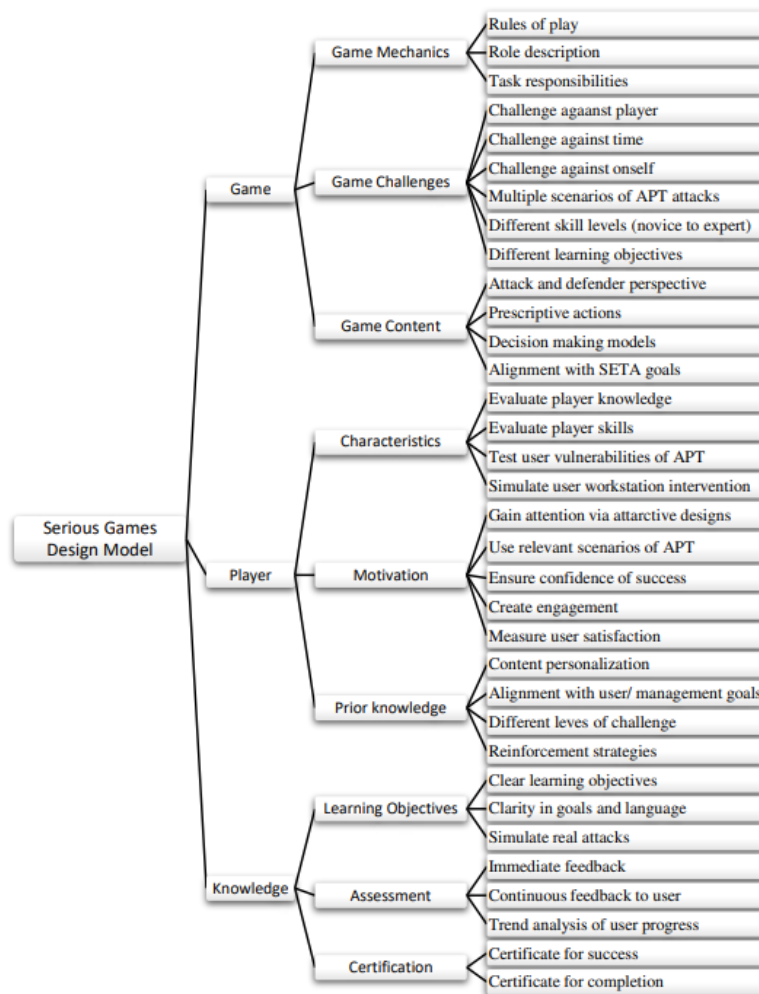


Figure 2.28. GAM-APT Modèle de jeu pour la cybersécurité

Ces éléments du modèle de conception de jeux sérieux forment un cadre complet qui, non seulement engage les joueurs dans un apprentissage interactif et immersif, mais assure également que les joueurs acquièrent des compétences pratiques et théoriques essentielles en matière de cyber sécurité.

Le modèle a été utilisé dans une série d'ateliers participatifs avec différents intervenants pour recueillir des idées, les analyser et les intégrer dans la conception du jeu.

2.2.2 Analyse globale des modèles de jeu existants

L'analyse des cinq modèles de conception de jeux sérieux montre à la fois leurs avantages et leurs limites dans le contexte de la création d'outils éducatifs, particulièrement en RM. Parmi les points forts communs aux modèles tels que *LEGADEE* et *MIRLEGADEE*, on trouve leur structuration modulaire et flexible du processus de conception. Ces modèles décomposent les jeux en sous-modèles, intégrant les **objectifs pédagogiques**, la **structure pédagogique** et le **scénario ludique**, ce qui permet une cohérence entre les objectifs éducatifs et les mécaniques de jeu. Cependant, cette approche modulaire, bien que rigoureuse, peut parfois manquer de flexibilité pour s'adapter aux environnements technologiques en constante évolution ou à des scénarios de jeu qui demandent une approche plus personnalisée.

Le Modèle ATMSG met l'accent sur **l'interaction et la rétroaction itérative dans le processus d'apprentissage**, ce qui favorise l'autorégulation cognitive des apprenants. Toutefois, ce modèle est conçu principalement pour

des jeux à interactions structurées et pourrait se révéler moins adapté pour des environnements où la liberté d'exploration et la créativité des apprenants sont primordiales, comme dans des jeux immersifs en RM. De plus, sa complexité théorique peut constituer un obstacle pour les enseignants et concepteurs novices qui cherchent à l'appliquer.

Le *Game Development Life Cycle (GDLC)*, inspiré du cycle de vie du développement logiciel, propose une **approche itérative**. Il est particulièrement utile pour ajuster constamment les mécaniques de jeu en fonction des retours des apprenants. Cependant, cette approche très technique peut parfois sous-estimer l'importance des aspects pédagogiques, en se concentrant trop sur la production et les tests techniques, au détriment de l'alignement avec les objectifs éducatifs.

Le *Serious Game Design Framework*, quant à lui, propose une approche **centrée sur les parties prenantes**, ce qui permet d'intégrer les besoins des enseignants, des élèves, des développeurs et des financeurs à chaque étape du processus de conception. Cependant, cette complexité accrue liée à la gestion continue des parties prenantes peut rallonger les délais de développement et complexifier la prise de décision, rendant ce modèle moins agile pour des projets à petite échelle ou nécessitant des itérations rapides.

En conclusion, chacun de ces modèles présente des forces indéniables pour la conception de jeux sérieux, mais ils comportent également des limitations importantes, notamment en termes d'adaptabilité aux environnements éducatifs complexes comme la RM. En effet, la RM nécessite une approche spécifique, adaptée aux particularités des environnements immersifs et des interactions complexes entre éléments virtuels et tangibles. C'est pourquoi nous proposons, dans le chapitre suivant, un nouveau modèle, basé sur la structure de LEGADEE, tout en intégrant des éléments de modèles complémentaires pour offrir une approche plus holistique et adaptée.

2.3 Conclusion

À travers l'état de l'art de 22 applications de RM pour l'enseignement des mathématiques dans les écoles, nous montrons que cette technologie peut offrir plusieurs avantages pédagogiques tels que la réduction de la charge cognitive, sa capacité à capter l'attention des élèves et de les aider à apprendre. Les expérimentations, menées par des auteurs de ces applications, montrent que, même si les augmentations de base sont pertinentes d'un point de vue pédagogique, ce sont les interactions RM riches, l'aide contextuelle et les rétroactions personnalisées qui ont le plus d'impact sur l'engagement et l'apprentissage des élèves. La conception d'interactions riches est selon nous un sujet de recherche essentiel pour exploiter pleinement les apports pédagogiques de la RM. Ces interactions semblent notamment essentielles pour les sujets complexes tels que les fractions, qui nécessitent de proposer des représentations dans différents référentiels de façon simultanée et dynamique. À l'opposé, les augmentations spatiales de RA permettent déjà d'apporter une aide très conséquente à la compréhension de matières comme la géométrie, même si des interactions riches ne pourraient qu'accroître cette compréhension. Ainsi, avec une bonne scénarisation, l'enfant pourrait profiter d'aide et de retours contextuels sur les objets manipulés, le motivant à s'impliquer dans les activités tout en profitant du potentiel des expériences sensorielles (cognition incarnée).

De plus, une majorité des études (13/22) montre que l'intégration de la RM dans les applications éducatives peut améliorer significativement la motivation, la performance académique des élèves (e.g. *AR-GLA*, *BRICKxAR/T*, *AR - Géométrie*).

D'un point de vue pratique, l'état de l'art montre que la seule façon de développer l'utilisation de la RM dans les écoles est de fournir des applications fonctionnant sur des tablettes, puisque la plupart des écoles en sont généralement équipées et qu'elles sont simples à mettre en place. Cependant, leur utilisation empêche les élèves d'employer leurs mains en même temps. Cette contrainte doit donc être prise en compte. Cela peut être fait en concevant des activités qui indiquent clairement quand les enfants doivent manipuler des objets réels et quand ils doivent prendre la tablette pour obtenir des retours ou valider les exercices. Une autre méthode consiste à concevoir des activités collaboratives dans lesquelles les enfants se relaient pour tenir la tablette, les autres pouvant manipuler les objets. Il est également possible d'utiliser un support pour tablette, suffisamment stable pour effectuer les interactions nécessaires sur l'écran tactile, tout en pouvant manipuler des objets réels sous la tablette. Par ailleurs, des solutions existent pour fabriquer des lunettes de RM à bas coût dans une approche *DIY (Do It Yourself)* (Brun *et al.* 2018). Les expérimentations décrites dans ce chapitre montrent que les applications de RM devraient également fonctionner avec des marqueurs que les enseignants peuvent facilement imprimer sur papier ou carton.

À travers notre deuxième état de l'art sur les méthodes et modèles pour la conception de jeux sérieux, nous avons montré la diversité des approches. Certains modèles mettent l'accent sur la rétroaction pour fournir un apprentissage personnalisé à chaque apprenant. Pour d'autres modèles, comme le *Serious Game Design Framework*, c'est l'implication des parties prenantes qui est essentielle pour assurer un développement efficace. D'autres modèles, comme *Stop & Think et ATMSG*, mettent l'accent sur la description des interactions pendant la phase de conception pour que les parties prenantes puissent bien travailler ensemble.

Dans le chapitre suivant, nous détaillerons nos propositions qui s'inspirent des modèles discutés. En effet, nous proposons **une démarche de recherche collaborative et itérative** qui implique les parties prenantes pour concevoir un jeu en RM de façon efficace. Nous proposons également **un modèle de jeu sérieux en RM** qui agrège les éléments des différents modèles étudiés, tels que les objectifs pédagogiques et les interactions de RM.

Chapitre 3. Proposition d'une démarche de recherche et d'un modèle de conception de jeux sérieux en RM

Ce chapitre est composé de deux sections principales :

La première section présente notre **première contribution : une démarche de recherche collaborative et itérative pour la conception de jeu en RM**. Nous mettrons l'accent sur l'approche collaborative et les itérations qui caractérisent le développement des jeux sérieux en RM.

La deuxième section présente notre **deuxième contribution : un modèle de conception de jeu sérieux en RM**. Les composants du modèle seront discutés, incluant les objectifs pédagogiques, la structure pédagogique, les scénarios ludiques et la mise en œuvre technique. Ce modèle est destiné à servir de guide pour les concepteurs et enseignants qui souhaitent utiliser la RM au service de la pédagogie.

Chaque proposition sera illustrée avec *Le Chaudron Magique*, démontrant comment ils ont été mis en œuvre pour l'enseignement des fractions.

3.1 Proposition d'une démarche de recherche

Cette section est dédiée à la proposition d'une démarche de recherche pour le développement d'un jeu en RM. Plus précisément, nous présentons les grandes étapes qui ont mené à la création du *Chaudron Magique*, un jeu en RM pour l'apprentissage des fractions. Notre objectif est de faciliter la collaboration entre les différentes parties prenantes nécessaires à la conception d'un jeu sérieux et leur permettre de concrétiser leurs idées autour d'un prototype qui évoluera de façon jusqu'au produit final. Cette méthode de conception pourra être réutilisée dans d'autres projets de recherche qui vise à trouver des interactions numériques innovantes pour faciliter l'apprentissage.

La première sous-section 3.1.1 présente le contexte qui a mené à cette thèse. En effet, le LIUM a été contacté par l'association Plaisir Maths²¹, qui développe, entre autres, *l'Atelier des Potions* : un jeu de plateau pour apprendre les fractions. Il permet aux élèves de fabriquer des potions magiques en combinant les bonnes quantités d'araignées, de raie de serpent et grenouille. Ces ingrédients sont présentés sous la forme de portion (fractions) de formes géométriques. Malgré son succès, le jeu requiert une aide constante de la part des enseignants, d'où l'émergence du projet SMART-Fractions dans lequel s'inscrit cette thèse.

Ensuite, la sous-section 3.1.2 aborde la conception du jeu *Le Chaudron Magique*, une extension numérique de *l'Atelier des Potions*, qui visent à garder les avantages pédagogiques de la manipulation d'objets tout en offrant des fonctionnalités numériques d'aide et de correction automatique. La RM s'est présentée comme une bonne solution, associant les avantages du numérique tout en maintenant l'engagement actif des apprenants.

L'implication des utilisateurs finaux dans le processus de conception est cruciale pour l'adoption et l'efficacité de ces outils numériques. Ainsi, la

²¹ <https://www.plaisir-maths.fr/>, consulté le 28/08/2024

sous-section 3.1.3 illustre comment, à travers quatre cycles de conception, différents acteurs (*i.e.* didacticiens, enseignants, développeurs et élèves) ont été progressivement impliqués dans la conception du *Chaudron Magique* en RM.

Enfin, la sous-section 3.1.4 décrit le processus itératif de conception du jeu, qui a évolué de manière significative, dès la première session de conception. L'objectif s'est ainsi déplacé vers la création d'activités en RM qui aident les élèves à relier les fractions en tant que **parties d'un tout** (tels qu'elles sont présentées dans *l'Atelier des Potions*) et les fractions comme **une position sur la droite numérique**, soulignant l'importance de lier différentes représentations mathématiques pour une meilleure compréhension.

3.1.1 L'Atelier des potions : un jeu de plateau pour l'apprentissage des fractions

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, l'apprentissage des concepts mathématiques, notamment les fractions, est souvent associé à une diminution de la motivation et à une augmentation de l'anxiété chez les élèves, une tendance plus prononcée chez les jeunes filles, selon plusieurs études (Chen 2019; Hung, Huang, et Hwang 2014). Le jeu *L'Atelier des Potions* a démontré des résultats prometteurs pour répondre à ce problème en proposant des activités ludiques (Pelay 2019; Boissiere 2023). Ce jeu éducatif, développé par l'association Plaisir Maths, en partenariat avec des chercheurs et des enseignants, s'inspire des travaux de thèse de didactique des mathématiques de Nicolas Pelay (2011). Ces travaux montrent notamment que les aspects ludiques peuvent significativement renforcer la motivation et favoriser l'acquisition des savoirs mathématiques à travers un contrat didactique enrichi par le jeu.

Dans le jeu *L'Atelier des Potions*, les apprenants endossent le rôle d'apprentis sorciers, s'initiant à la confection de potions. Les recettes de ces potions, présentées sous forme de cartes, comportent diverses fractions. Les ingrédients pour ces potions (grenouille, raie, serpents et araignées) sont représentés comme des formes géométriques prédécoupées en section (entiers, demis, tiers, quarts, etc.) comme l'illustre la Figure 3.1. Le jeu propose plusieurs modes de jeu, solo ou en équipe, mais la configuration préconisée est de jouer en deux contre deux. Chaque équipe dispose de son matériel et doit choisir les bons ingrédients à mettre dans leur chaudron. Ils doivent ensuite parier sur l'exactitude de leur assemblage en ajoutant une à quatre étoiles dans le chaudron. Une fois que les deux équipes ont posé le couvercle sur leur chaudron, ils peuvent vérifier l'exactitude de leurs réponses en plaçant les pièces sur le gabarit dans le « grimoire » des solutions. Si les pièces couvrent parfaitement le gabarit, c'est gagné et l'équipe peut avancer du nombre d'étoiles qu'elle a parié sur le chemin en haut du plateau de jeu. Si la réponse est mauvaise, ils reculent sur le chemin d'autant d'étoiles. L'objectif est d'être plus avancé que l'équipe adverse sur le chemin en fin de partie, c'est-à-dire quand l'enseignant décide d'arrêter le jeu.

Les cartes potions sont organisées en catégories de complexité croissante, permettant une introduction graduelle aux concepts fondamentaux des fractions. Cette structuration offre aux enseignants la possibilité de cibler des catégories spécifiques pour l'apprentissage, comme illustré par la carte n°30 qui aborde les fractions supérieures à un.

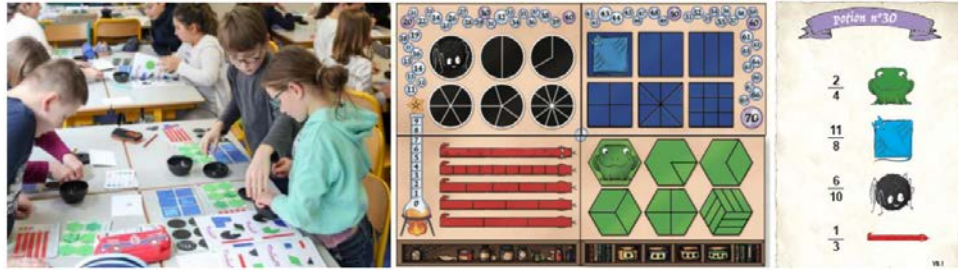


Figure 3.1 L'Atelier des Potions, le plateau de jeu et une carte potion

Néanmoins, l'usage de ce jeu en classe, le plus souvent avec un effectif supérieur à 25 élèves, pose des difficultés d'organisation, notamment pour répondre aux sollicitations des apprenants qui réclament constamment de l'aide ou une vérification des potions (malgré le système du grimoire). C'est dans cette optique qu'a émergé le projet SMART-Fractions, financé en partie par l'association Plaisir Maths, l'objectif étant d'explorer le potentiel du numérique avec les chercheurs du LIUM pour résoudre ce problème.

3.1.2 Conception d'une extension numérique pertinente

Bien que la tendance actuelle soit de proposer des activités pédagogiques numériques, cette démarche n'est pas toujours profitable. Par exemple, l'un des avantages pédagogiques de *L'Atelier des Potions* réside dans la manipulation des objets et la correction des exercices par les élèves avec des gabarits, ce qui favorise l'engagement des élèves et les aide à saisir le concept d'équivalences entre les fractions (Zorrilla et Álvarez 2008). Cependant, les applications numériques ont l'avantage de fournir un retour personnalisé et de montrer une patience infinie lorsqu'il s'agit d'expliquer des concepts de manière répétée, ce qui peut être une aide précieuse pour les enseignants qui gèrent de grandes classes hétérogènes.

La RM représente un compromis avantageux, car elle combine les atouts d'une application numérique tout en permettant aux apprenants de manipuler de véritables objets, un aspect essentiel pour l'apprentissage, particulièrement chez les enfants (Chandler et Tricot 2015 ; Liou et al. 2017). De plus, la RM a déjà démontré son efficacité dans l'enseignement des fractions en fournissant un retour contextuel directement sur les objets manipulés ou en les combinant avec des objets virtuels 3D (Kazanidis, Palaigeorgiou, et Bazinas 2018 ; Radu, McCarthy, et Kao 2016). Cependant, malgré ses nombreux avantages, certaines études mettent en lumière des impacts négatifs potentiels de la RM, notamment le fait que la mise en place du matériel peut complexifier la tâche pour les enseignants et les élèves, qui pourraient alors être réticents à l'accepter (Cheng 2018 ; Lin et al. 2011).

Il est donc essentiel de collaborer étroitement avec les enseignants, leurs élèves et, dans notre cas, des experts en didactique des mathématiques pour concevoir une application qui ait un impact positif sur l'apprentissage et que les enseignants puissent utiliser facilement dans leur classe. C'est pourquoi nous avons adopté l'approche du *Design-Based Research* (DBR) (Carroll 1996), développée pour répondre à des problématiques centrales de l'apprentissage amélioré par la technologie, comme la nécessité de trouver des solutions avec les utilisateurs finaux et l'étude des phénomènes d'apprentissage dans le monde réel plutôt qu'en laboratoire (Collins, Joseph et Bielaczyc 2004). Cette approche implique plusieurs cycles itératifs de sessions de réflexion, co-conception, test et d'évaluation menée en collaborative avec les utilisateurs finaux comme illustrés dans la figure 3.2.

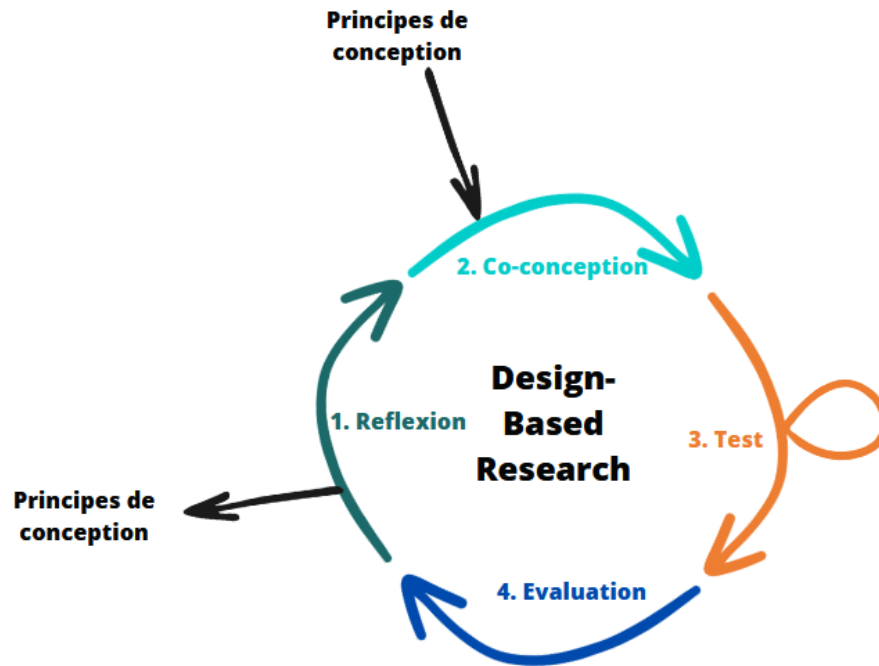


Figure 3.2 Cycle du DBR (Design-Based Research)

L'approche DBR est caractérisée par un cycle en 4 phases :

1. **Réflexion** : cette phase se concentre sur l'analyse des problématiques concrètes et des outils existants. Les chercheurs et les enseignants collaborent pour identifier les défis et les opportunités, établissant ainsi les bases pour les solutions innovantes.
2. **Co-conception** : dans cette phase, les solutions sont co-conçues et développées en collaboration. Elle implique la création de concepts et de prototypes, intégrant les principes de design existants et les innovations technologiques.
3. **Test** : cette phase comprend des cycles itératifs d'expérimentation des prototypes développés. Ces tests sont réalisés en conditions réelles pour raffiner et améliorer les solutions basées sur les retours d'expérience.
4. **Évaluation** : la phase finale se concentre sur l'évaluation des solutions testées. Les résultats sont analysés pour produire des principes de *design* et optimiser l'implémentation des solutions développées, contribuant ainsi à l'amélioration continue du projet.

Le développement du *Chaudron Magique* a impliqué différents acteurs tels que des experts en jeux sérieux, développeur, didacticien et enseignants, comme illustré sur la figure 3.3



Figure 3.3 Les différents intervenants qui ont contribué à la conception du Chaudron Magique.

Le *Chaudron Magique* a suivi un processus itératif structuré en quatre cycles de conception DBR. Chaque cycle se compose d'une phase de réflexion et de co-design, d'une durée de 3 à 4 heures, qui étaient suivis de multiples réunions pour peaufiner les détails, comme illustré sur la Figure 3.3.

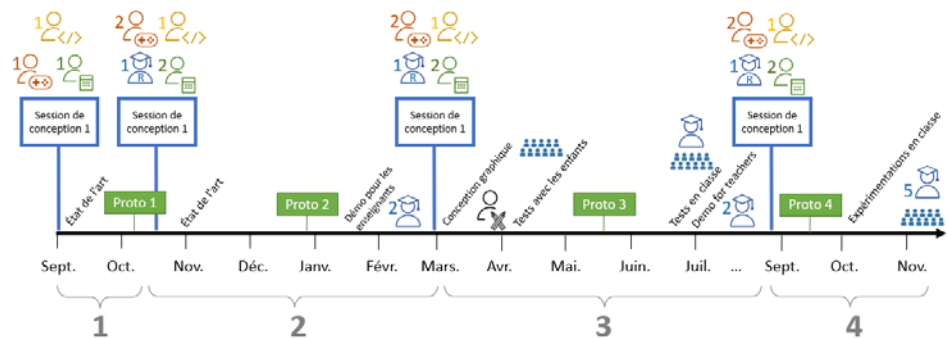


Figure 3.4 Interaction et contribution des participants au sein d'un cycle de conception

Le DBR reste cependant très général et doit être adapté aux objectifs de recherche particuliers et au contexte. Suite à notre expérience de l'usage du DBR pour notre projet, **nous avons identifié deux adaptations** qui nous semblent pertinentes pour notre contexte de recherche, notamment aux projets impliquant **des technologies d'interactions innovantes** comme la RM. La première adaptation que nous proposons est d'**impliquer les acteurs progressivement** (enseignants, développeurs, chercheurs et élèves), en intégrant de nouvelles recrues à chaque itération d'un cycle DBR. La deuxième adaptation est de **donner un rôle central au développement d'un ou plusieurs prototypes** pour faciliter la discussion et le processus de recherche. Ces deux adaptations sont présentées dans les sections suivantes.

3.1.3 Implication progressive des concepteurs dans la conception d'une application de réalité mixte

La création d'un jeu sérieux tel que *Le Chaudron Magique* nécessite une collaboration étroite entre des experts en mathématiques, en conception de jeux et en développement informatique (Marfisi-Schottman, George, et Tarpin-Bernard 2010). Comme l'illustre la Figure 3.5, l'équipe a d'abord entamé le premier cycle du DBR avec P, le didacticien des mathématiques qui a conçu *l'Atelier des Potions*, M, un concepteur de jeux sérieux, et T, un développeur spécialisé en RM. Peu après, pour le second cycle, de nouveaux membres ont rejoint l'équipe : G et O, experts en jeux sérieux et en didactique des mathématiques,

et surtout R, un enseignant de mathématiques expérimenté, désireux de participer aux sessions de conception et de tester l'application avec sa classe.

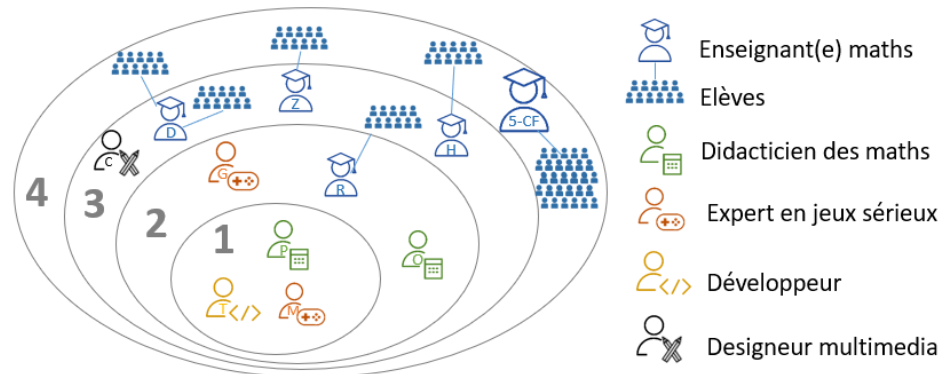


Figure 3.5 Implication progressive des utilisateurs finaux dans les quatre cycles de conception

Pour la troisième itération, un graphiste a été recruté pour améliorer l'interface de l'application et le matériel de jeu, mais aussi pour créer une ambiance et des personnages en adéquation avec *l'Atelier des Potions*. Nous avons également intégré Z, D et H, trois enseignants de mathématiques ont également été sollicités pour apporter un regard neuf et tester les prototypes. Les élèves de D et R ont été impliqués pour obtenir leurs impressions sur les interactions en RM et sur le récit. Enfin, la quatrième itération a impliqué cinq enseignants supplémentaires (5-CF) et leurs cinq classes pour une expérimentation à grande échelle ainsi que les élèves des enseignants Z, D, H qui n'avaient pas encore utilisé l'application.

Pour des raisons pratiques et afin de faciliter les séances de co-conception, un seul enseignant a participé aux premières sessions (à partir du Cycle 2), accompagné de deux didacticiens en mathématiques, de deux experts en jeux sérieux et d'un développeur. Nous avons ensuite intégré progressivement de nouveaux membres au projet ce qui s'est avéré très utile pour apporter des perspectives fraîches et un regard neuf sur les problèmes et les oublis potentiels (Marfisi-Schottman 2023), en particulier lors des phases de test, comme illustré dans la Figure 3.3. L'intégration de ces nouveaux participants aide à identifier les lacunes et à vérifier la clarté de la présentation du système. Cette prise de recul n'est pas toujours évidente pour les personnes qui étaient dans le projet dès le début.

Les élèves ont aussi été impliqués dès que possible : dès que l'interface a été suffisamment aboutie, notamment suite au travail d'un graphiste. De plus, les expérimentations à grande échelle, qui visent à mesurer l'impact de l'outil sur l'apprentissage, impliquent des élèves qui n'ont pas participé aux ateliers de conception.

3.1.4 Développement de prototypes pour soutenir les phases de co-conception

Nous nous sommes rendu compte que le développement du prototype était crucial. Ce prototype oblige l'équipe à clarifier ses idées et à fournir des maquettes et spécifications détaillées. Elle permet également de distinguer les idées les plus prometteuses, sachant que le développeur ne peut pas toutes les concrétiser. Les prototypes se révèlent aussi être un excellent moyen d'impliquer les enseignants et les enfants dans le projet. Tester une application s'avère plus motivant et génère davantage de retours qu'un document descriptif ou une présentation, surtout lorsqu'il s'agit de RM, une forme d'interaction qu'ils n'ont

jamais expérimentée auparavant. Enfin, le prototype devient le centre d'attention lors de la session de design suivante. En prenant en compte les retours des enseignants et des élèves, l'équipe teste ce prototype pour identifier les fonctionnalités à redessiner, améliorer ou abandonner pour le cycle suivant. Ce processus de conception itératif adopte donc la méthode Agile (Aubry 2013), impliquant ainsi la création de prototypes avec des caractéristiques clés et la réception de retours continus pour les affiner.

Ces sessions de co-conception, avec prototypage, sont fondamentales pour notre travail de recherche, car elles nous ont permis de découvrir de nouvelles possibilités offertes par la technologie de RM dans le domaine de l'apprentissage et d'affiner les hypothèses de recherche. En effet, lors de la première session de conception, nous avons initialement prévu d'utiliser la RM pour offrir une validation automatique et des aides sur mesure. Nous avons donc élaboré un prototype capable de reconnaître les pièces du jeu et d'afficher leur valeur. Lorsque l'enseignante a testé le prototype (figure 3.6 et prototype tout à gauche de la figure 3.7), elle a découvert une façon complètement différente et originale d'utiliser la RM, qui est sans aucun doute beaucoup plus intéressante d'un point de vue pédagogique. Elle a expliqué que les enfants n'avaient pas vraiment besoin d'incitation supplémentaire pour travailler sur *L'Atelier des Potions* ou même sur les exercices qu'elle leur donne en classe dans lesquels les fractions sont représentées comme des *portions d'un objet*. Les difficultés surviennent lorsqu'elle introduit les fractions en tant que nombres rationnels sur *une droite numérique*, un passage critique pour certains enfants qui n'arrivent pas à transférer les compétences acquises auparavant avec cette nouvelle forme de représentation. Les didacticiens des mathématiques ont confirmé cette difficulté, soulignant que l'un des aspects qui rendent les fractions difficiles à comprendre est l'usage de différentes représentations (Behr et al. 1983). Post et al. (1993) identifient six représentations différentes : partitions d'un tout, nombres rationnels, opérateurs, ratio, décimaux et mesures. Plus important encore, aucun des exercices dans les manuels scolaires officiels n'illustre le lien entre ces représentations. Les enfants ont donc du mal à faire le lien et ne sont pas capables de réutiliser les connaissances acquises avec une autre représentation. La RM semble être le médium parfait pour combler ce fossé, puisqu'elle peut montrer, de façon dynamique et simultanée, plusieurs représentations d'une même fraction.



Figure 3.6 Première session de co-conception du *Chaudron Magique*

À ce stade, notre objectif a radicalement changé et nous nous sommes concentrés sur la recherche d'activités en RM qui pourraient aider les enfants à comprendre le lien entre les fractions en tant que *portion d'un tout* et en tant que *position sur une droite numérique*, le premier obstacle rencontré par les enfants avec les fractions.

Nous avons utilisé ce principe à chaque session de co-conception, améliorant ainsi le matériel de jeu et l'application de façon itérative, comme le montre la figure 3.7.



Figure 3.7 Évolution des prototypes du jeu à chaque session de co-conception

3.2 Proposition d'un modèle de conception de jeux sérieux en RM

L'objectif de cette section est de présenter un modèle innovant pour la conception pédagogique de jeux en RM. Il est proposé comme **outil support pour mener à bien les phases de co-conception** de la démarche de recherche, présentée ci-dessus.

Le modèle de conception proposé a tout d'abord comme objectif de faciliter la collaboration entre les différents acteurs impliqués dans la conception : enseignants, *game designer* et développeurs. Il les aide à produire des expériences d'apprentissage qui répondent aux besoins spécifiques des apprenants et qui tirent parti des dernières avancées technologiques en RM. Ce modèle est particulièrement pertinent pour des matières où la visualisation et l'interaction avec des concepts abstraits sont importantes, telles que les représentations multiples en mathématiques ou en sciences physiques ou la visualisation en 3D de la structure des cellules ou des protéines dans le domaine de la biologie ou de la chimie.

Dans cette section, nous allons explorer les composants clés du modèle et discuter des meilleures pratiques pour leur mise en œuvre. Nous aborderons également les défis potentiels et les solutions apportés pour les surmonter, s'appuyant sur des recherches théoriques et des études de cas pour illustrer l'application pratique du modèle.

3.2.1 Positionnement du modèle proposé par rapport à la littérature

Le modèle proposé s'inspire des travaux sur un modèle d'aide à la conception *LEGADEE* (LEarning GAME DEsign Environment) (Marfisi-Schottman 2012).

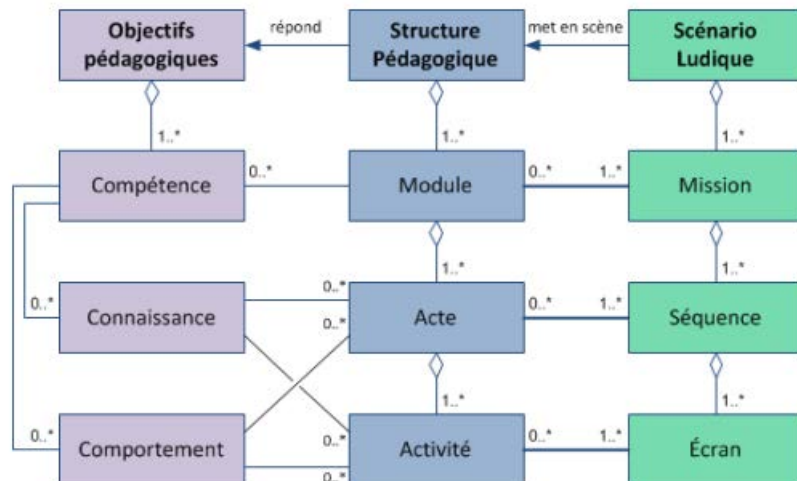


Figure 3.8 Modèle de conception de jeu LEGADEE (Marfisi-Schottman 2012)

Cependant, nous avons ajouté des modifications qui sont inspirées d'autres modèles présentés dans l'état de l'art du chapitre précédent (figure 3.9). Tout d'abord, notre modèle **modifie la structure pédagogique** en ajoutant *le domaine d'apprentissage* pour plus de flexibilité et d'adaptabilité dans des environnements évolutifs comme la RM et en changeant les Actes en *Éléments d'apprentissage* plus fins, facilitant une personnalisation des tâches pédagogiques et une meilleure adaptation aux besoins des apprenants. Le modèle **propose également une toute nouvelle colonne** qui concerne la *mise en œuvre technique*, entre la structure pédagogique et le scénario ludique. Cette nouvelle étape permet de prendre en compte les limitations matérielles des écoles dès le début du processus de conception, afin de garantir la faisabilité des solutions proposées, surtout en milieu scolaire où les ressources technologiques peuvent être limitées. Enfin, **le scénario ludique est également adapté** pour donner plus d'importance à la personnalisation des scénarios en fonction des besoins des apprenants, comme le suggère *GAM-APT*.

3.2.2 Présentation globale du modèle de conception de jeux sérieux en RM

Le modèle intègre divers éléments interdépendants, organisés en quatre catégories principales : objectifs pédagogiques, structure pédagogique, mise en œuvre technique et scénario ludique. Ces éléments sont présentés dans la figure 3.9 et seront décrits en détail dans la suite de ce chapitre.

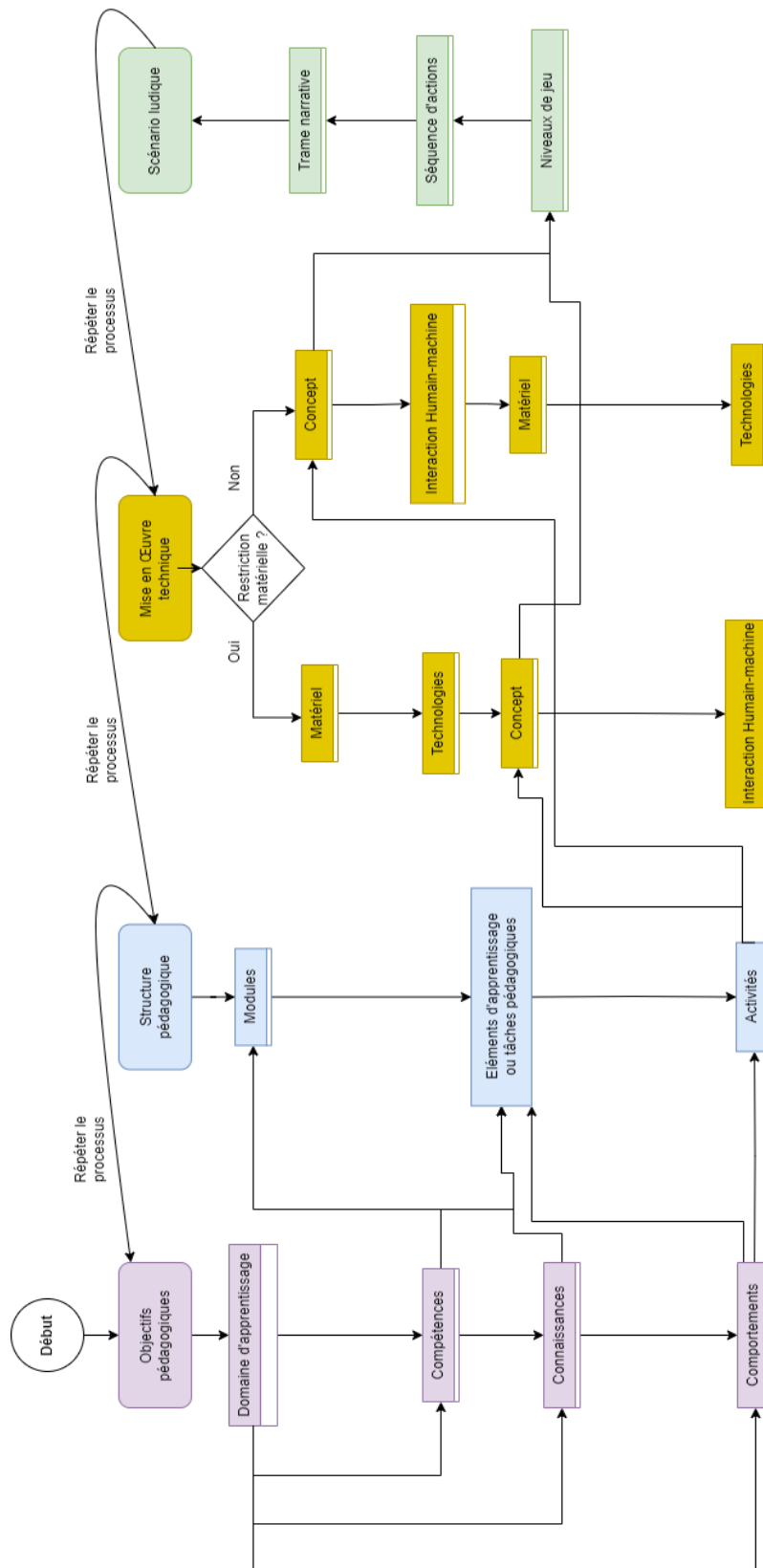


Figure 3.9 Modèle de conception d'un jeu sérieux en RM

Le modèle repose sur une dynamique d'interactions continues entre les différentes composantes, permettant ainsi des ajustements itératifs et mo-

dulaires à chaque étape du développement. Contrairement à une approche linéaire stricte, ce modèle est conçu pour permettre une réévaluation constante et progressive des objectifs pédagogiques, de la structure pédagogique, de la mise en œuvre technique et du scénario ludique.

Les **objectifs pédagogiques** constituent le point de départ du processus de conception. Ils incluent le domaine d'apprentissage, les compétences, les connaissances et les comportements à acquérir. Une modification dans l'un de ces objectifs, comme l'ajustement d'une compétence, déclenche automatiquement une révision des autres composantes, notamment la structure pédagogique, la mise en œuvre technique et le scénario ludique. Cela permet un alignement immédiat des nouveaux objectifs avec les autres blocs du modèle sans ralentir le développement, puisque chaque composante peut être ajustée de manière indépendante et ciblée.

La **structure pédagogique**, composée de modules et éléments d'apprentissage, traduit ces objectifs pédagogiques en activités concrètes et interactives. Si une modification intervient au niveau des modules, un réajustement immédiat des compétences ou des comportements est nécessaire, ainsi qu'une révision des choix technologiques dans la mise en œuvre technique et des séquences narratives dans le scénario ludique.

La **mise en œuvre technique** comprend les choix technologiques nécessaires pour soutenir l'apprentissage en RM, tels que le matériel et les interactions homme-machine. Si un changement technologique est nécessaire, par exemple l'introduction d'un nouvel outil ou l'adaptation d'une interaction, cela affectera la structure pédagogique et les éléments narratifs, mais sans nécessiter une révision complète du modèle.

Le **scénario ludique**, quant à lui, inclut la trame narrative, les niveaux de jeu et les séquences d'actions. Une modification au niveau du scénario peut entraîner une révision des technologies utilisées dans la mise en œuvre technique ou des modules pédagogiques. Toutefois, ces ajustements restent localisés et n'entraînent pas une révision complète du modèle. Par exemple, l'ajout d'une nouvelle séquence d'action dans le scénario peut être intégré sans qu'il soit nécessaire de réévaluer entièrement les objectifs pédagogiques ou les choix technologiques.

Comme le montre les flèches dans la figure 3.9, le modèle repose donc sur un **processus itératif** et une **rétroaction continue**, où chaque ajustement, qu'il soit technique, pédagogique ou narratif, déclenche une réévaluation progressive des autres composantes. Cette réévaluation est réalisée de manière ciblée, pour que seul l'élément affecté subisse une modification **complète**, tandis que les autres éléments sont **ajustés en fonction des besoins**.

Nous allons détailler ci-après chaque élément du modèle afin d'explorer leur rôle respectif dans le processus de conception des jeux sérieux en RM.

3.2.3 Objectifs pédagogiques

Dans cette section, nous définissons les éléments qui composent les **objectifs pédagogiques** que le jeu cherche à atteindre. Les objectifs pédagogiques se focalisent sur la détermination précise des connaissances, compétences et comportements que les apprenants doivent acquérir. L'établissement de ces objectifs est crucial pour aligner le contenu du jeu avec les besoins et les résultats d'apprentissage souhaités (L. W. Anderson et Krathwohl 2001). Dans les sections suivantes, nous allons détailler chacun des composants de ce modèle et les illustrer avec *Le Chaudron Magique*.

3.2.3.1 *Domaine d'apprentissage*

Dans le cadre de la proposition d'un modèle de jeu pédagogique en RM, le **domaine d'apprentissage** constitue la fondation sur laquelle repose l'ensemble des objectifs pédagogiques. Il définit le sujet spécifique et le champ disciplinaire que le jeu en RM cherche à explorer et à enseigner (Ibáñez et Delgado-Kloos 2018). Il est conseillé de choisir un domaine d'apprentissage pour lequel la RM pourrait apporter une plus-value. C'est-à-dire avec des concepts qui gagnent à être visualisés et manipulés de manière concrète pour en faciliter la compréhension, tels que :

- **Les mathématiques**, qui comportent de nombreux concepts abstraits tels que les fractions ou les opérations algébriques qui peuvent être rendus plus accessibles et tangibles grâce à la RM (Bujak et al. 2013).
- **Les sciences**, qui explorent des phénomènes naturels, les structures moléculaires, ou les processus biologiques, souvent difficiles à observer directement et qui peuvent être modélisés et explorés en RM (Ibáñez et Delgado-Kloos 2018).
- **Les langues**, dont l'apprentissage être renforcé par des simulations immersives où l'étudiant interagit avec son environnement ou des situations (Holden et Sykes 2011).

3.2.3.2 *Compétences*

Les **compétences** sont définies pour permettre au jeu d'être non seulement motivant, mais aussi efficace d'un point de vue pédagogique. Elles peuvent être classées en plusieurs catégories, comme définies par la taxonomie de Bloom (Bloom 1956) ou la taxonomie révisée de Bloom (Anderson et Krathwohl 2001) :

- **Les compétences cognitives** englobent la compréhension, l'application, l'analyse, l'évaluation et la création de nouveaux concepts ou situations (Bloom 1956 ; Mayer 2002). Dans le contexte des mathématiques, cela peut inclure la résolution de problèmes complexes ou la manipulation de formes géométriques en trois dimensions.
- **Les compétences techniques** réfèrent à la capacité de l'apprenant à interagir efficacement avec la technologie RM elle-même (Sharples, Corlett, et Westmancott 2002), y compris la navigation, la manipulation d'objets virtuels et l'interprétation de données ou de concepts affichés par le biais de la réalité augmentée.
- **Les compétences socio-émotionnelles** sont liées au développement personnel de l'apprenant (Durlak et al. 2011 ; Zins 2004), et incluent la collaboration, la communication, la gestion du stress et l'auto-régulation, qui peuvent être renforcées par des scénarios de jeu coopératif ou des défis de groupe.
- **Les compétences pratiques** se rapportent à l'application des connaissances théoriques dans des situations pratiques (Kolb 2014), permettant aux apprenants de voir les implications directes de ce qu'ils apprennent dans des contextes réels ou simulés.

3.2.3.3 *Connaissances*

La section consacrée aux **connaissances** vise à définir les informations et les principes théoriques que les apprenants doivent maîtriser (Learn 2000). L'accent est mis sur la construction d'un cadre conceptuel solide où les élèves peu-

vent non seulement retenir des informations, mais aussi comprendre leur pertinence et leur application dans des contextes variés. Les connaissances visées peuvent être de différent type :

- **Les connaissances fondamentales** se réfèrent à des formules, du vocabulaire et des principes de base que les élèves doivent connaître pour progresser dans le domaine d'apprentissage spécifique. Ces dernières représentent la base de l'apprentissage (Anderson et Krathwohl 2001).
- **Les connaissances conceptuelles** impliquent une compréhension approfondie des idées clés et des concepts sous-jacents du domaine d'apprentissage, permettant aux élèves de faire des liens entre différents sujets et d'appliquer leur savoir de manière flexible (Mayer 2002).
- **Les connaissances procédurales** sont des procédures spécifiques ou d'utiliser certaines méthodologies pour résoudre des problèmes ou pour mener à bien des tâches (Schraw 2006).
- **Les connaissances stratégiques** incluent les stratégies d'apprentissage et de résolution de problèmes, ainsi que la capacité à réfléchir sur sa propre pensée et à réguler son apprentissage (Zimmerman 2002 ; Pintrich 2000).

3.2.3.4 Comportements

Dans le cadre d'un jeu pédagogique en RM, le **comportement** se concentre sur les attitudes, les réactions émotionnelles et les schémas d'interaction que les concepteurs cherchent à encourager chez les apprenants. L'objectif est de promouvoir l'acquisition de comportements appropriés et adaptés aux contextes spécifiques (savoir-être), de permettre aux apprenants de réagir de manière efficace et réfléchie face à diverses situations. Et de cultiver des comportements qui soutiennent une expérience d'apprentissage positive et productive (Dweck 2006). Voici certains types de comportements que le modèle cherche à promouvoir :

- **La motivation** encourage une participation active et soutenue des élèves, en veillant à ce que les activités de RM soient captivantes et pertinentes pour les maintenir motivés tout au long de l'expérience d'apprentissage. Cette dernière inclut la motivation intrinsèque et extrinsèque dans l'apprentissage (Ryan et Deci 2000).
- **La curiosité** stimule l'intérêt et la curiosité des apprenants pour explorer de manière proactive les concepts et les défis présentés dans le jeu (Kashdan et Fincham 2004).
- **La collaboration** favorise le travail en équipe pour résoudre des problèmes ou par le partage de découvertes et d'idées (Johnson et Johnson 1987).
- **La persévérance** vise à renforcer la résilience des apprenants face aux difficultés, en les incitant à persister malgré les défis ou les échecs rencontrés lors des activités de jeu (Yeager et Dweck 2012).
- **La réflexion** encourage les apprenants à réfléchir sur leurs actions et leurs processus d'apprentissage, en les amenant à considérer ce qu'ils ont appris et comment ils peuvent l'appliquer (Boud, Keogh, et Walker 2013).
- **L'autonomie** développe chez les apprenants la capacité de travailler et d'apprendre de manière autonome, en leur donnant les outils et les compétences nécessaires pour prendre en charge leur propre parcours d'apprentissage (Reeve 2006).

3.2.3.5 Illustration des objectifs pédagogiques avec le Chaudron Magique

La figure 3.10 montre comment le modèle présenté ci-dessus s'applique au *Chaudron Magique*.

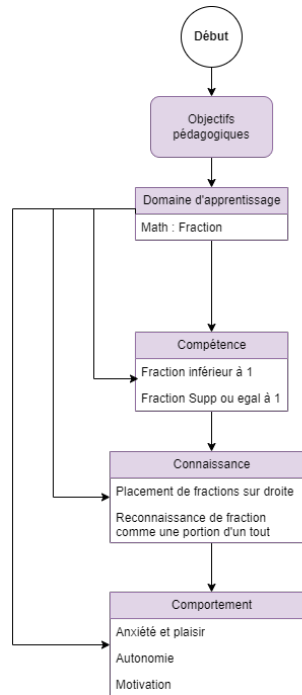


Figure 3.10 Modèle : Chaudron Magique – Objectifs pédagogiques

- **Domaine d'apprentissage :** Le *Chaudron Magique* se focalise sur les mathématiques, et plus précisément sur les fractions, comme domaine d'apprentissage.
- **Compétences :** Le jeu se focalise sur deux *compétences cognitives*, à savoir la compréhension des fractions inférieures à un et des fractions supérieures ou égales à un.
- **Connaissances :** Le jeu se concentre sur deux *connaissances fondamentales* que sont le placement de fractions sur une droite gradué et la reconnaissance de fractions comme des portions d'un tout. Ces deux types de connaissances impliquent aussi des *connaissances conceptuelles* sur les fractions.
- **Comportement :** Le jeu vise à soutenir la *motivation* des élèves en ajoutant du plaisir et en réduisant l'anxiété des mathématiques. Il vise aussi à accroître leurs *autonomies*.

3.2.4 Structure pédagogique

La **structure pédagogique** d'un jeu en RM sert de charpente pour organiser le contenu éducatif en unités logiques, facilitant l'acquisition progressive des compétences et des connaissances présentées précédemment (Merrill 2012). Les *modules* représentent les grands blocs thématiques, chacun ciblant un ensemble spécifique de compétences et de connaissances. Ils sont conçus pour introduire les concepts de manière graduelle, en commençant par les principes de base et en avançant vers des aspects plus avancés et complexes. En dessous des modules, on trouve des *éléments d'apprentissage* ou des *tâches pédagogiques* qui décomposent les modules thématiques en tâche d'apprentissage plus petite et orientée vers des résultats mesurables tels que les exercices pratiques et les défis. Enfin, la section *activités* est l'endroit où les apprenants peuvent

appliquer et expérimenter directement ce qu'ils ont appris à travers d'expériences interactives et immersives telles que les tâches pratiques, les jeux de rôle et les simulations.

3.2.4.1 Modules

Au cœur du modèle de jeu pédagogique en RM se trouvent **les modules**, qui constituent les unités fondamentales de la structure pédagogique (All, Castellar, et Van Looy 2016). Les modules s'imbriquent dans une progression logique et sont élaborés pour :

- **Introduire progressivement des concepts complexes** en commençant par des principes de base avant de progresser vers des problèmes de niveau supérieur en utilisant le concept de la zone de développement proximal (Vygotsky et Cole 1978).
- **Favoriser une expérience d'apprentissage séquencée et structurée** (Mayer 2005), où les connaissances et les compétences sont développées et renforcées à travers des activités ciblées et des interactions RM.
- **Permettre une personnalisation et une adaptation** à différents styles d'apprentissage et besoins éducatifs (Tomlinson 2014), en fournissant une variété d'options et de chemins à travers lesquels les apprenants peuvent naviguer.

En intégrant ces modules dans le jeu, les concepteurs visent à créer une expérience d'apprentissage qui est non seulement alignée avec les objectifs éducatifs, mais qui est aussi flexible et réactive au retour des apprenants. Cela vise à ce que le jeu reste pertinent, captivant et pédagogiquement efficace.

3.2.4.2 Éléments d'apprentissage ou tâches pédagogiques

Les **éléments d'apprentissage ou tâches pédagogiques** fragmentent les concepts plus larges en unités digestes (Kiili 2005), permettant aux apprenants de se concentrer sur des compétences spécifiques.

En alignant les éléments d'apprentissage ou tâches pédagogiques avec les objectifs globaux de chaque module, les concepteurs pédagogiques s'assurent que chaque étape de l'expérience d'apprentissage se construit efficacement sur la précédente.

L'importance de ces éléments réside dans leur capacité à transformer les concepts abstraits en activités concrètes et mesurables. Ils soutiennent les activités plus larges du jeu, afin que chaque tâche soit alignée avec le curriculum et contribue directement aux résultats d'apprentissage visés.

3.2.4.3 Activités

Les **activités** représentent les exercices avec lesquelles les apprenants interagissent (Squire 2006), mettant en œuvre les connaissances et les compétences acquises dans un contexte immersif. Les activités sont conçues pour :

- **Promouvoir l'engagement actif** en immergeant les apprenants dans des tâches qui nécessitent une participation active, allant de la manipulation d'objets virtuels à la résolution de problèmes en temps réel.
- **Encourager l'exploration et la découverte** en offrant des environnements riches et interactifs qui stimulent la curiosité et encouragent les apprenants à explorer les concepts de manière autonome ou de façon collaborative (Hannafin, Land, et Oliver 2013).
- **Renforcer la compréhension** à travers la répétition pour s'assurer que les connaissances sont intégrées de façon durable (Willingham 2021).
- **Faciliter l'évaluation** en permettant aux enseignants de suivre les progrès des apprenants et de fournir des retours immédiats.

3.2.4.4 Illustration de la structure pédagogique avec Le Chaudron Magique

La figure 3.11 montre comment le modèle de structure pédagogique a été utilisé pour effectuer des choix pour la conception du *Chaudron Magique*.

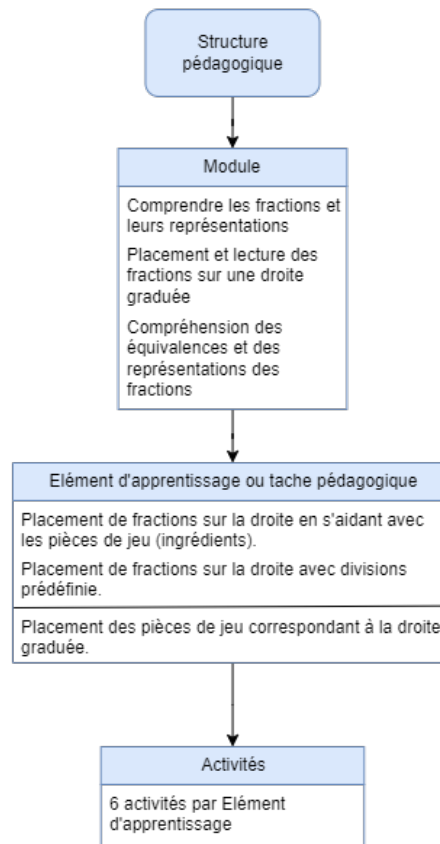


Figure 3.11 Modèle : Chaudron Magique – Structure pédagogique

- **Modules**

Le *Chaudron Magique* propose trois modules :

- **Comprendre les fractions et leurs représentations** : ce module inclut la *compréhension conceptuelle* et les *connaissances fondamentales* des fractions comme notions mathématiques abstraites et leur représentation concrète.
- **Comprendre le comment placer une fraction sur une droite graduée** : ce module fait appel aux *compétences cognitives* pour interpréter et manipuler des représentations visuelles de fractions sur une droite numérique.
- **Comprendre des équivalences et des représentations des fractions** : Les apprenants développent une *compréhension stratégique* en identifiant les relations et les équivalences entre différentes représentations de fractions.

- **Éléments d'apprentissages ou tâches pédagogiques :**

- **Placement de fractions sur la droite en s'aidant avec les pièces de jeu (ingrédients)**. Concrètement, dans ce type d'exercice, l'apprenant doit rééquilibrer le magimètre (nom donné à la droite graduée en bas de l'interface) en plaçant le curseur comme indiqué dans l'énoncé (à gauche de l'interface). Il peut s'aider en plaçant les pièces tangibles sous la tablette (figure 3.12). En effet, dès que

les pièces sont reconnues par l'application, celle-ci affiche la valeur des pièces et leurs équivalences sur la droite graduée en Réalité Augmentée.



Figure 3.12 Modèle : Exercice 1B. Type 1 (Calibrage du curseur)

- **Placement de fractions sur la droite avec divisions prédéfinie.** Concrètement l'apprenant doit découper la droite en part égale pour placer les fractions au bon endroit (figure 3.13). Pour rendre ce type d'exercice plus difficile et notamment faire travailler sur la notion d'équivalence de fractions, il est possible de ne donner que certaines découpes de la droite (ex seulement en quart). Les formes des pièces apparaissent en Réalité Augmentée dans le chaudron.



Figure 3.13 Modèle : Exercice 2B. Type 2 (Calibrage du Chaudron Magique)

- **Placement des pièces de jeu correspondant à fraction indiquée sur la droite graduée.** Ce troisième type d'exercice demande à

l'enfant de trouver les pièces correspondantes à la fraction indiquée sur le magimètre (figure 3.14). La valeur des pièces est affichée en Réalité Augmentée pour l'aider.



Figure 3.14 Modèle : Exercice 3B. Type 3 (Calibrage du Magimètre)

- **Activités :**

- Pour chaque élément d'apprentissage (ou type d'exercice) présenté ci-dessus, le *Chaudron Magique* propose 6 activités (exercices) avec un niveau de difficulté croissant. Soit 18 activités au total.

3.2.5 Mise en œuvre technique

La mise en œuvre technique d'un jeu pédagogique en RM nécessite une planification minutieuse qui varie en fonction des ressources matérielles à disposition. Notre modèle propose deux branches distinctes pour les étapes de cette mise en œuvre technique en fonction du contexte.

Dans le premier cas de figure, il existe des restrictions matérielles à cause de la nature du matériel ou les contraintes budgétaires (e.g. l'école dispose de tablettes et ne pourra pas acheter d'autres matériels comme des casques de RV par exemple). Dans ce cas, la planification commence par une évaluation des équipements disponibles, afin d'être pragmatique pour la conception du jeu. La technologie de RM (e.g. technologie de reconnaissance d'image ou d'objet, technologie markerless, etc.) est ensuite choisie pour s'harmoniser avec les capacités du matériel. Avec ces considérations matérielles et technologiques en place, le concept du jeu est développé pour s'adapter aux contraintes, en maintenant la vision pédagogique et créative dans le domaine du possible. L'interaction Humain-Machine et la représentation visuelle sont soigneusement conçues pour s'intégrer dans le cadre établi, créant une expérience utilisateur fluide et immersive (Norman 2013).

Dans le deuxième cas de figure, il n'y a pas de restrictions matérielles. Les concepteurs peuvent donc commencer par le concept du jeu, en favorisant l'innovation pédagogique et la créativité sans les contraintes de ressources matérielles prédéterminées. Les interactions Humain-Machine et les représentations visuelles sont alors conçues pour soutenir ce concept, en se concentrant sur la création d'une expérience utilisateur captivante. Le matériel et la technologie sont sélectionnés non pas sur la base de limitations, mais plutôt pour soutenir et améliorer les interactions et les représentations conçues. Cela permet une flexibilité dans le choix des options technologiques les plus avancées

et efficaces, afin que le jeu en RM tire pleinement parti des dernières innovations.

La séquence des étapes de mise en œuvre reflète une approche stratégique adaptée au contexte de développement. Lorsque les restrictions matérielles guident le processus de conception, la priorité est donnée à l'adaptation et à l'alignement avec le matériel existant. En l'absence de telles restrictions, l'approche est axée sur l'expérience d'apprentissage et l'engagement de l'utilisateur, avec une plus grande liberté dans le choix du matériel et de la technologie pour réaliser la vision du jeu. Dans les deux cas, l'objectif final reste le même : créer une expérience d'apprentissage enrichissante qui exploite pleinement le potentiel de la RM pour être au service de l'enseignement et de l'apprentissage.

3.2.5.1 Matériel

La sélection du **matériel** dans le modèle de jeu pédagogique en RM est déterminante pour la conception du contenu éducatif. Elle doit aligner les activités de jeu avec les capacités technologiques disponibles, assurant que le jeu ne soit pas seulement motivant, mais aussi réalisable. Le matériel est considéré sous plusieurs aspects :

- **Accessibilité** : il est essentiel que le matériel soit accessible pour la situation cible, en termes de coût, de disponibilité et de facilité d'utilisation par les apprenants et les enseignants.
- **Compatibilité** : la compatibilité avec diverses technologies de RM est cruciale pour garantir une bonne expérience utilisateur.
- **Durabilité** : le matériel choisi doit être robuste et durable pour supporter l'utilisation répétée dans un contexte éducatif.
- **Adaptabilité** : le matériel doit s'adapter aux exigences du jeu en RM, permettant une intégration fluide avec la technologie et les concepts pédagogiques prévus.
- **Évolutivité** : le matériel devrait permettre des mises à jour et des améliorations pour suivre l'évolution des technologies de RM.

En identifiant le matériel adapté, les concepteurs peuvent assurer que le jeu en RM fournira une expérience d'apprentissage engageante et enrichissante, tout en restant pratique et réalisable dans les contextes éducatifs visés.

3.2.5.2 Technologies

La sélection des **technologies** de RM est nécessaire, car elle détermine les outils et les plateformes qui seront utilisés pour réaliser le jeu (exemple : *Unity3D*, *Vuforia*, *ARcore*, *ARToolKit*, etc.). Elles sont sélectionnées en fonction du choix de matériel et en fonction de plusieurs critères :

- **Leurs capacités immersives** qui améliorent l'expérience d'apprentissage en RM, en incluant des fonctionnalités comme le suivi de position, la reconnaissance d'image et la réalité augmentée interactive.
- **Leurs intégrations pédagogiques** permettant aux concepteurs de créer des expériences d'apprentissage qui sont à la fois éducatives et captivantes.
- **Leurs interopérabilités** avec les systèmes existants dans les environnements éducatifs pour assurer une intégration sans heurts et une adoption large par les éducateurs et les apprenants.
- **Leur facilité de développement** agile et flexible, avec des outils qui soutiennent le prototypage rapide et l'itération basée sur les retours des utilisateurs.
- **Leur pérennité** et le soutien d'une communauté active pour faire évoluer le jeu au fil du temps.

3.2.5.3 Concept

Le **concept** est le point central du processus de développement, où l'idée principale du jeu prend forme tout en s'alignant sur les objectifs éducatifs et les contraintes matérielles. L'élaboration du concept prend en compte plusieurs aspects essentiels :

- **À la thématique globale du jeu** qui doit stimuler l'intérêt des apprenants.
- **À l'expérience utilisateur** qui doit engager les apprenants de manière naturelle et sans effort (Norman 2013).
- **Au design interactif** pour encourager une immersion profonde et un engagement actif, facilitant ainsi une expérience d'apprentissage riche et interactive (Sharpe, Rogers, et Preece 2007).
- **À la planification du développement** pour intégrer de façon cohérente les différents éléments de jeu, du contenu pédagogique aux interactions utilisateur.

En définissant un concept de jeu robuste, on oriente la suite du processus de développement, y compris la manière dont le contenu éducatif sera présenté et expérimenté par les apprenants, sans s'attarder sur les détails spécifiques du scénario de jeu qui sera développé plus tard.

3.2.5.4 Interactions Humain-Machine en RM

Les interactions Humain-machine en RM définissent la manière dont les utilisateurs interagissent simultanément avec des éléments tangibles et virtuels, exploitant ainsi la spécificité immersive de la RM. Les principales caractéristiques des interactions en RM sont les suivantes :

- **Intuitivité** : Les interactions doivent être simples et naturelles, permettant aux utilisateurs de se concentrer sur les objectifs d'apprentissage sans être freinés par une interface complexe. Par exemple, les élèves peuvent manipuler des objets physiques, comme des pièces de puzzle ou des maquettes, tout en interagissant avec des projections ou animations en réalité augmentée qui enrichissent ces objets réels. La **représentation tangible** et **virtuelle** doit être claire pour que les apprenants perçoivent immédiatement les liens entre ce qu'ils manipulent dans le monde réel et ce qui apparaît dans le monde virtuel.
- **Engagement** : L'utilisation de la RM permet de rendre les interactions plus immersives, ce qui capte l'attention des utilisateurs. Les élèves peuvent ainsi manipuler des objets réels (comme des formes géométriques ou des cartes), et voir des **représentations** supplémentaires apparaître en réalité augmentée, qui réagissent en fonction des actions sur les objets physiques créant une expérience interactive engageante et motivante et rendant l'apprentissage plus interactif et stimulant.
- **Soutien à l'apprentissage** : Les interactions doivent faciliter l'exploration et l'expérimentation, tout en fournissant des retours immédiats. Par exemple, lorsque les élèves manipulent des fractions ou des formes géométriques en 3D, la RM peut fournir des indices visuels ou des corrections en temps réel pour guider leur compréhension et valider leur progression.
- **Accessibilité** : L'expérience de RM doit être accessible à un large éventail d'utilisateurs, y compris ceux ayant des besoins spécifiques. Cela peut inclure des options d'interactions tactiles, auditives ou visuelles, permettant à tous les apprenants de participer de manière égale et d'accéder aux contenus pédagogiques adaptés.
- **Rétroaction** : Les interactions en RM fournissent des retours immédiats sur les actions des apprenants, ce qui est essentiel pour un apprentissage adaptatif. Lorsqu'un utilisateur place un objet ou effectue une action, la RM peut immédiatement montrer les résultats de cette action, aidant ainsi

à la compréhension des concepts complexes à travers des mécanismes de feedback direct.

3.2.5.5 Illustration de la mise en œuvre technique du modèle avec Le Chaudron Magique

La figure 3.12 illustre comment la mise en œuvre technique s’applique au *Chaudron Magique*. Dans notre projet, nous avons une contrainte forte du matériel (seulement des tablettes) et nous avons donc pris la branche de gauche qui commence avec le *Matériel*, pour aller vers le *Concept* et enfin les *Interactions Humain-Machine*.

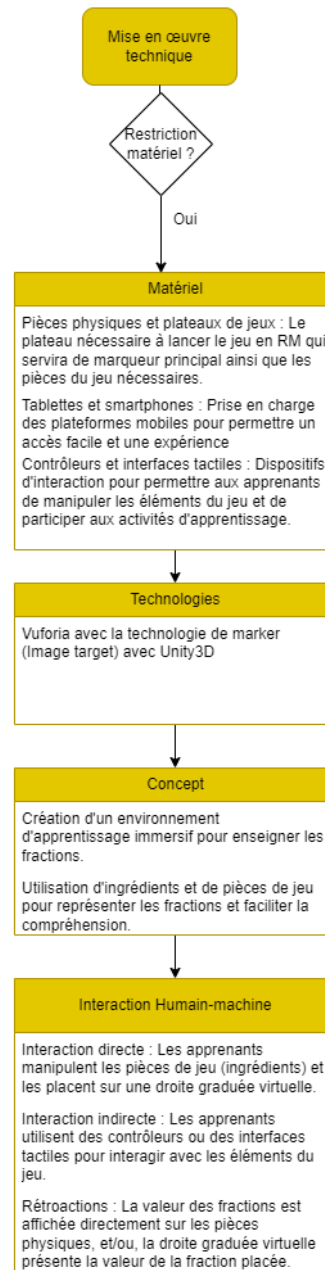


Figure 3.12 Modèle : Chaudron Magique – Mise en œuvre technique

- **Matériel :**
 - **Pièces physiques et plateaux de jeux :** les pièces du jeu, illustré dans la figure 3.13, représentant divers animaux tels que des raies, des grenouilles, des araignées et des serpents. Celles-ci sont inspirées des pièces du jeu *l'Atelier des Potions* pour faciliter de

transfert de connaissance. Ces pièces, placées sous une tablette, sont reconnues par l'application et interagissent avec le scénario du jeu. Nous avons également fabriqué un support pour ranger les pièces de jeu afin de faciliter l'installation et le rangement.



Figure 3.13 Plateaux et pièces du jeu du *Chaudron Magique*

- **Tablettes et smartphones :** *Le Chaudron magique* fonctionne sur tablettes et smartphones, mais nous recommandons d'ajouter un support afin que les élèves puissent avoir les mains libres pour manipuler les pièces de jeu, comme illustré dans la figure 3.14.



Figure 3.14 Exemple d'activité du *Chaudron Magique* avec tablette et support

- **Technologie :**
 - **Vuforia (Image target) & Unity3D :** *Vuforia* et *Unity3D* ont été sélectionnés pour leurs fonctionnalités robustes de RM et leur capacité à créer des expériences immersives et interactives.
- **Concept :**
 - **Utilisation d'ingrédients et de pièces de jeu pour représenter les fractions et faciliter la compréhension :** nous avons choisi d'utiliser des pièces de jeu tangible qui représentent les fractions comme une portion d'un tout et d'afficher leurs équivalences sur l'écran, sous d'autres formes de représentation (p/p et position sur

la droite numérique). Un élément clé du jeu est le **magimètre**, une représentation ludique de **la droite graduée**, positionnée sous le chaudron et mise à jour en temps réel à mesure que les élèves placent les pièces dans le chaudron. Le magimètre, qui peut varier dans ses valeurs affichées et être divisé en sections (demi, tiers, quart, etc.), sert de support visuel pour aider les élèves à comprendre les concepts de fraction.

- **Interaction Humain-Machine de RM :**
 - **Interaction directe avec les pièces de jeu :** nous avons choisi de faire manipuler les pièces de jeu par les apprenants pour *maximiser l'intuitivité et faciliter l'interaction*.
 - **Interaction indirecte via contrôleurs ou interfaces tactiles :** la plupart des autres interactions dans le jeu sont tactiles.
 - **Représentation virtuelle connectée à la représentation réelle :** plusieurs formes de représentations des fractions sont interconnectées dans le jeu pour aider les apprenants à faire le lien entre elles. Comme illustré dans la figure 3.15, *Chaudron Magique* présente les fractions comme une portion d'un tout, p/q, mais aussi une position sur la droite graduée.



Figure 3.15 Les différentes représentations des fractions utilisées dans le Chaudron Magique

3.2.6 Scénario ludique

Dans l'élaboration d'un jeu pédagogique en RM, le **scénario ludique** sert à mettre en scène le contenu éducatif, le rendant engageant et pertinent pour les apprenants (Jenkins 2004). Les *niveaux de jeu* constituent la structure de base de ce scénario, établissant les différents paliers du parcours d'apprentissage. Chaque niveau est spécifiquement conçu pour approfondir et consolider les *connaissances* et *compétences*, en présentant des tâches de complexité progressive qui encouragent l'apprenant à développer et à appliquer sa compréhension du sujet. Dans ces niveaux, les *séquences d'actions* donnent vie à l'expérience en invitant les apprenants à s'engager dans des interactions dynamiques et significatives. Enfin, c'est la *trame narrative* qui tisse ensemble les niveaux et les séquences d'actions, en fournissant une histoire qui transforme l'apprentissage en une quête, incitant les apprenants à persévérer face aux obstacles, à explorer davantage et à établir une connexion émotionnelle avec les personnages et le contexte du jeu.

3.2.6.1 Trame narrative

La **trame narrative** dans un jeu est l'élément qui enveloppe l'ensemble du processus d'apprentissage dans une histoire captivante. La création d'une trame narrative solide implique :

- **L'immersion narrative** pour créer une connexion émotionnelle qui renforce l'implication dans le processus d'apprentissage (Csikszentmihalyi 1990).
- **La contextualisation des concepts** en utilisant l'histoire pour donner des exemples d'usages concrets des connaissances (Learn 2000).
- **La motivation à travers le jeu** en incitant les apprenants à progresser à travers les niveaux et les séquences d'action pour découvrir la suite de l'histoire (Malone et Lepper 2021) (Hidi et Renninger 2006).

3.2.6.2 Séquence d'actions

Au cœur de l'expérience ludique d'un jeu pédagogique en RM se trouvent les **séquences d'actions** qui permettent aux apprenants de mettre en œuvre les compétences en cours d'acquisition ou simplement d'avancer dans la trame narrative du jeu. Les séquences d'actions sont soigneusement conçues pour :

- **Encourager l'application pratique dans un contexte immersif** : les apprenants ne se contentent pas de suivre des étapes prédéfinies, mais ils interagissent avec des éléments virtuels et physiques dans un environnement simulé. Cela leur permet de mettre en pratique leurs compétences de manière dynamique et engageante, en les confrontant à des situations authentiques et variées que seuls les jeux en RM peuvent offrir, renforçant ainsi l'apprentissage par l'expérience directe et la répétition (DA 1984 ; Rohrer et Pashler 2010).
- **Stimuler l'engagement actif** : en impliquant activement les apprenants dans le processus d'apprentissage, ces séquences favorisent une participation plus profonde et une meilleure rétention des informations (Fredricks, Blumenfeld, et Paris 2004).
- **Renforcer l'autonomie et la résolution de problèmes** : à travers ces interactions, les apprenants sont encouragés à penser de manière critique et à développer leur capacité à résoudre des problèmes de manière autonome (Zimmerman 2002).

3.2.6.3 Niveaux de jeu

Les **niveaux de jeu** correspondent aux activités de bas niveau ou aux actions que peuvent faire les apprenants soit pour apprendre, soit pour avancer dans la trame narrative. Ils ont plusieurs objectifs :

- **Consolider les acquis** : des exercices de pratique et des répétitions stratégiques sont utilisés pour renforcer la compréhension et la mémorisation des concepts clés (Rohrer et Pashler 2010).
- **Évaluer la compréhension** : des évaluations et des feedbacks sont intégrés pour permettre aux apprenants et aux enseignants de mesurer les progrès et d'identifier les domaines nécessitant une attention supplémentaire.
- **Engager et motiver** : en alignant les objectifs pédagogiques avec des éléments de jeu divertissants, les niveaux cherchent à maintenir l'engagement et la motivation des apprenants tout au long de leur parcours (Ryan et Deci 2000).

3.2.6.4 Illustration du scénario ludique du modèle avec Le Chaudron Magique

La figure 3.16 illustre comment le scénario ludique s'applique au *Chaudron Magique*.

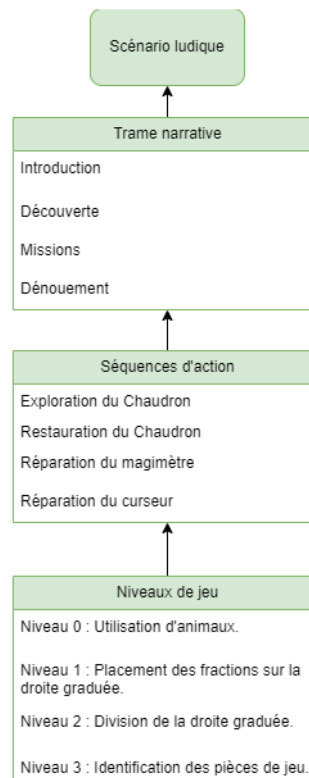


Figure 3.16 Modèle : Chaudron Magique – Scénario Ludique

- **Trame narrative :**

L'histoire du *Chaudron Magique* débute avec la rencontre de l'apprenant avec *Ekko*, un gentil fantôme, gardien d'un chaudron magique ancestral. *Ekko* initie l'enfant à l'art de la magie en lui apprenant à créer divers animaux fantastiques en utilisant le chaudron et son magimètre, un outil indispensable qui indique la quantité et le type d'ingrédients nécessaires pour réaliser des potions magiques. Cette introduction permet à l'enfant de se familiariser avec le fonctionnement du chaudron et d'établir une relation avec *Ekko*.

La tranquillité est toutefois perturbée par l'arrivée d'*Arkan*, un méchant diabolotin jaloux des capacités de l'enfant à manier le chaudron magique. *Arkan*, incapable d'utiliser le chaudron lui-même, décide de jeter un sort pour bloquer le curseur du magimètre et perturber le fonctionnement du chaudron. La mission de l'enfant devient alors de contrer les effets des sorts d'*Arkan* et de rééquilibrer le magimètre, une tâche qui requiert à la fois de l'adresse et de l'ingéniosité.

Tout au long du jeu, *Arkan* revient périodiquement, lançant des sorts de plus en plus puissants, chacun introduisant de nouveaux défis pour l'enfant. Ces sorts débloquent progressivement différentes capacités du chaudron et du magimètre, forçant l'enfant à s'adapter et à développer de nouvelles stratégies pour surmonter les obstacles créés par le diabolotin.

Dans un ultime effort pour vaincre *Arkan*, *Ekko* suggère de créer une amie chauve-souris pour le diabolotin en utilisant les pouvoirs du chaudron. Bien que réticent au début, *Arkan* finit par accepter la chauve-souris et décide de devenir son mentor, laissant finalement le chaudron et *Ekko* à l'enfant. *Arkan* part, reconnaissant implicitement les capacités exceptionnelles de l'enfant et la légitimité de sa possession du chaudron.

L'histoire est soigneusement conçue pour stimuler non seulement l'intérêt des apprenants pour les mathématiques, mais aussi pour développer leur capacité à résoudre des problèmes de manière créative et innovante.

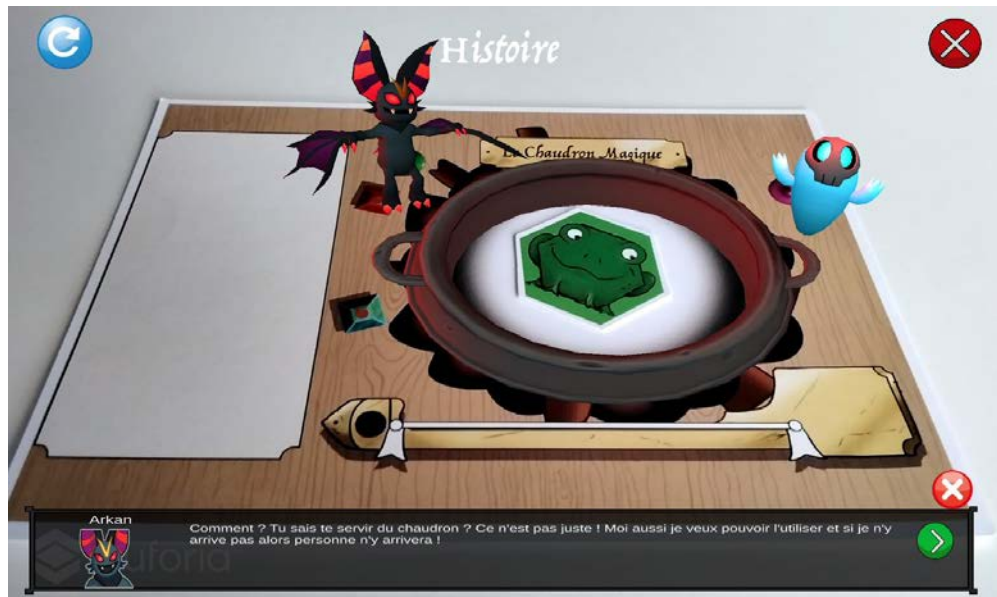


Figure 3.22 Les personnages Arkan et Ekko dans le Chaudron Magique

- **Séquences d'actions :**

- **Découverte du chaudron :** Le jeu commence par une séquence d'introduction pour se familiariser avec l'histoire, mais aussi pour comprendre comment manipuler les pièces. Cette phase propose **4 activités de type recette** pendant lesquels les apprenants doivent placer les bonnes pièces dans le chaudron pour créer des animaux. La figure 3.23 montre par exemple l'activité de la recette du chien. Une fois les bonnes pièces placées, un chien en 3D apparaît en bas de l'écran. À la fin de cette séquence, *Arkan* jette un sort de congélation sur le chaudron et l'apprenant est donc invité à faire plusieurs activités pour rééquilibrer le magimètre du chaudron.

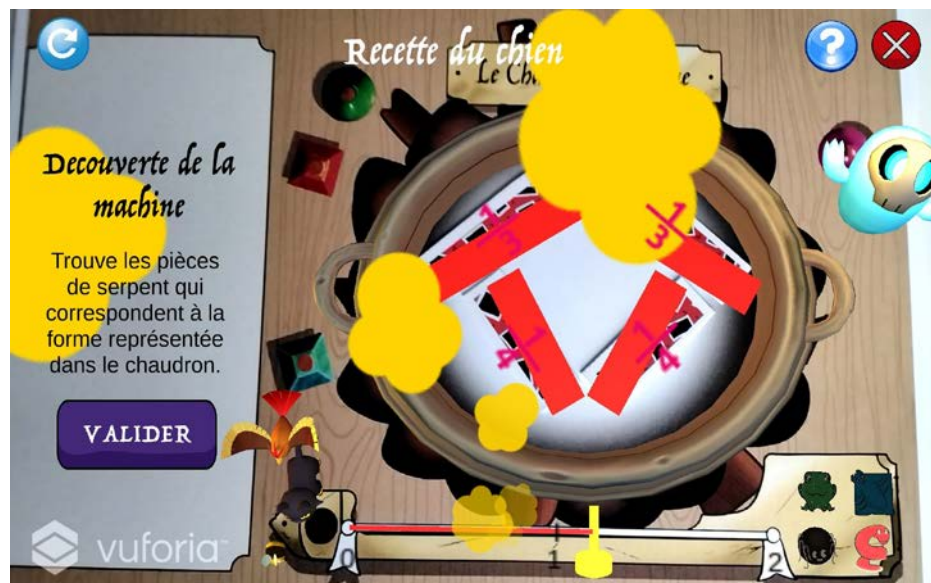


Figure 3.23 Activité de type recette pour créer des animaux

- **Rééquilibrage du magimètre :** les enfants travaillent avec *Ekko* pour rééquilibrer le magimètre, bloqué par le sort d'*Arkan*. Ils doivent réussir 6 exercices de Type 1, présentés dans la section

3.2.4.4 (figure 3.12). Les enfants doivent placer le curseur du magimètre au bon endroit, en s'aidant des ingrédients (pièces) placés dans le chaudron.

A la fin de cette séquence, *Arkan* revient pour jeter un nouveau sort sur le découpeur du magimètre cette fois.

- **Rééquilibrage le découpeur du magimètre** : dans cette séquence, les apprennent à utiliser un découpeur pour diviser la droite graduée en parts égales et placer les fractions au bon endroit. Ils doivent réussir six exercices de type 2, présenté dans la section 3.2.4.4 (figure 3.13).

Les formes des pièces apparaissent en réalité augmentée dans le chaudron, aidant les enfants à visualiser les différentes divisions. A la fin de cette séquence, *Arkan* revient pour congeler le chaudron cette fois.

- **Rééquilibrage le chaudron** : Dans cette séquence, les apprenant doivent trouver les pièces correspondant à la fraction indiquée sur le magimètre. Ils doivent réussir six exercices de type 3, présenté dans la section 3.2.4.4 (figure 3.14).
- **Le dénouement** : Après avoir réussi tous les exercices, les enfants arrivent au dénouement du jeu, où ils affrontent le dernier sort *d'Arkan*. Avec l'aide *d'Ekko*, ils utilisent leurs compétences nouvellement acquises pour déjouer les plans *d'Arkan* et rétablir l'équilibre du chaudron magique.

En reconnaissant les capacités exceptionnelles de l'enfant, *Arkan* se résigne et accepte finalement l'amitié offerte sous la forme de la chauve-souris, mettant fin à ses malices. Cette conclusion offre une satisfaction narrative et un sentiment d'accomplissement aux enfants, récompensant leurs efforts et leur persévérance à travers le jeu.

- **Niveaux de jeu :**

Comme nous l'avons expliqué plus haut, chaque séquence d'actions possède plusieurs activités mais aussi des scènes de dialogue. Le déroulé complet du jeu se trouve dans l'Annexe et plusieurs vidéos sont accessibles sur le site dédié au projet Smart-Fractions²².

3.2.7 Informations complémentaires sur Le Chaudron Magique

Les éléments principaux du *Chaudron Magique* ont déjà été présentés lors de l'illustration du modèle de conception présenté ci-dessous. Nous fournissons ici quelques informations complémentaires sur son utilisation, mais aussi sur les aides qu'il propose. Le jeu se déroule sur une durée de 30 à 45 minutes et est conçu pour être joué en autonomie. Le jeu peut être réalisé seul ou à deux.

²² <https://smart-fractions.univ-lemans.fr/fr/chaudronfr.html>, consulté le 28/08/2024

Les élèves peuvent également demander de l'aide à tout moment pendant le jeu en cliquant sur un bouton d'aide symbolisé par un petit fantôme (à l'image du PNJ d'Ekko). Les aides apportées par Ekko ont été soigneusement élaborées en collaboration avec des enseignants, suite à des sessions de test du jeu en classe (figure 3.24). Certaines activités offrent même plusieurs aides en fonction de la difficulté.

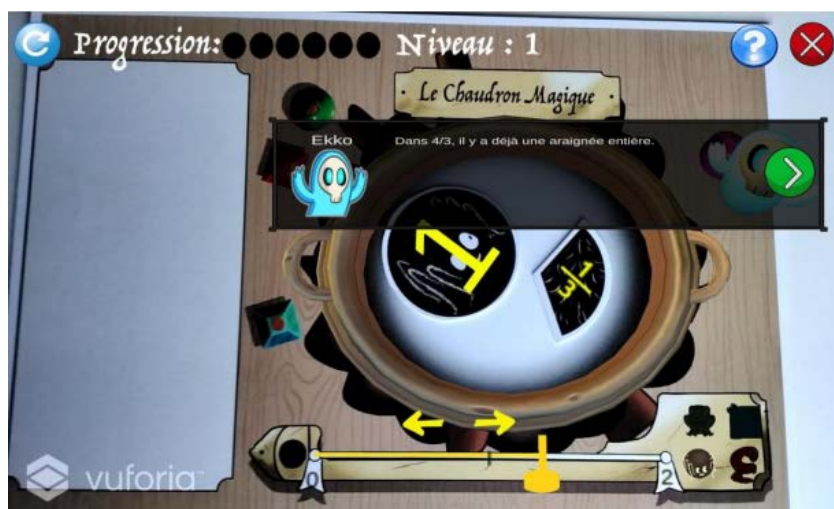


Figure 3.24 Ekko aide l'enfant à résoudre l'exercice

3.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la **démarche de recherche** et le **modèle de conception d'un jeu éducatif en RM** conçu et utilisé pour développer le jeu du *Chaudron Magique*. Bien que ce modèle ait été appliqué au développement de ce jeu spécifique, il présente un potentiel d'applicabilité plus large dans le domaine de la conception de jeux éducatifs en RM.

Au cœur de la démarche de recherche, la collaboration entre divers acteurs, développeurs, pédagogues et utilisateurs finaux, notamment enfants et enseignants, a joué un rôle fondamental. Cette synergie a permis la création d'un jeu qui combine avancées technologiques et pertinence pédagogique. L'inclusion des utilisateurs finaux, dès les premières phases, a été déterminante pour s'assurer que le jeu réponde aux besoins éducatifs réels, tout en restant accessible et engageant. De plus l'approche Agile a permis de faire des prototypes que nous faisant évoluer en fonction des retours des différentes parties prenantes. Ce processus itératif a également permis de transformer un concept initial en une expérience d'apprentissage enrichie par l'intervention des différents acteurs dans le contenu pédagogique et ludique ainsi que par la RM, exploitant ainsi les atouts pédagogiques uniques de cette technologie.

De plus, l'intégration des méthodologies DBR et Agile combiné dans ce projet a souligné leur complémentarité. La DBR a fourni un cadre structuré pour comprendre et améliorer les pratiques éducatives, tandis que l'approche Agile a offert la flexibilité nécessaire pour s'adapter rapidement aux retours et faire évoluer le projet de manière itérative. Ensemble, ces approches ont permis de réaliser un projet qui non seulement répond aux exigences éducatives, mais est également adaptable et réactif aux besoins changeants des utilisateurs finaux.

Enfin, le modèle permet une révision continue et une flexibilité optimisée tout au long du processus de conception, grâce à sa structure modulaire et à son approche itérative. Ce processus permet de maintenir une cohérence entre les objectifs pédagogiques, les choix techniques et les aspects narratifs tout au long de son évolution.

Chapitre 4. Expérimentations

Ce chapitre présente les expérimentations scientifiques menées dans quatre écoles françaises afin d'évaluer l'impact de l'application *Le Chaudron Magique* sur les élèves et leurs enseignants. Ces expérimentations ont eu pour but de valider les trois hypothèses qui sont présentées en détail dans la suite du document.

4.1 Hypothèses de recherche

Dans le cadre de notre étude sur l'impact du jeu *Le Chaudron Magique* sur l'apprentissage des fractions, nous avons formulé trois hypothèses clés présentées succinctement dans le premier chapitre de cette thèse. Ces hypothèses visent à explorer le potentiel du jeu pour soutenir le processus d'apprentissage, favoriser l'autonomie des élèves et améliorer leur motivation et leur plaisir, tout en contribuant à réduire leur anxiété liée à l'apprentissage des fractions.

4.1.1 Hypothèse 1 : Le Chaudron Magique facilite l'apprentissage des fractions par rapport à une approche de cours traditionnel.

La compréhension des fractions est un pilier fondamental dans l'apprentissage des mathématiques. Cependant, pour de nombreux élèves, les fractions représentent un concept difficile à appréhender et à maîtriser. L'usage d'outils pédagogiques innovants, comme le jeu *Le Chaudron Magique* en RM, offre une approche alternative pour faciliter cet apprentissage. En introduisant une dimension ludique et immersive, *le Chaudron Magique* peut contribuer à une meilleure compréhension des concepts de fractions et à une expérience d'apprentissage enrichissante.

Hypothèse 1

L'utilisation du jeu Le Chaudron Magique en Réalité Mixte soutient le processus d'apprentissage des fractions par rapport à une approche de cours traditionnel.

4.1.2 Hypothèse 2 : Le Chaudron Magique rend les élèves plus autonomes

Les enseignants ne peuvent pas accompagner individuellement chaque élève dans l'apprentissage des fractions. En proposant une application avec de la RM, il est possible de promouvoir l'autonomie des élèves à travers les corrections et des rétroactions automatiques offerts par le système. Les élèves peuvent ainsi recevoir un retour immédiat sur leurs actions, comprendre leurs erreurs et les corriger par eux-mêmes. De plus, avec des ressources en RM à leur disposition (e.g. rétroaction en RM), les élèves peuvent explorer et apprendre à leur propre rythme, ce qui donne à l'enseignant plus de temps pour se concentrer sur les élèves qui ont le plus besoin d'assistance.

Hypothèse 2

Les rétroactions dans le jeu Le Chaudron Magique en Réalité Mixte rend les élèves plus autonomes, en validant et corrigeant les différentes activités et proposant une aide en temps réel.

4.1.3 Hypothèse 3 : Le *Chaudron Magique* accroît le plaisir et fait baisser l'anxiété

L'apprentissage des fractions au cycle 3, avec une augmentation de complexité par rapport aux connaissances antérieures et un changement de représentation, peut générer du stress et même décourager certains élèves à s'engager dans les mathématiques et les sciences. En utilisant la RM dans l'enseignement des fractions au cycle 3, nous pouvons potentiellement motiver les élèves. En effet, la nature immersive et interactive de la RM peut rendre l'apprentissage plus attrayant et stimulant.

Hypothèse 3

L'utilisation du jeu Chaudron magique en Réalité Mixte accroît le plaisir et contribue également à baisser l'anxiété des enfants pour l'apprentissage des fractions.

4.2 Expérimentations

Afin d'évaluer les trois hypothèses de recherche citée précédemment, nous avons mis en place un **protocole expérimental en trois phases** : une pré-expérimentation puis une expérimentation de courte durée et enfin une autre de longue durée.

La **pré-expérimentation** est une phase préparatoire utile pour améliorer Le *Chaudron Magique* ainsi que le protocole expérimental.

La **première expérimentation**, de courte durée, est conçue pour tester les trois hypothèses dans un contexte temporel limité, c'est-à-dire pendant approximativement 2h. Deux groupes d'enfants participent à l'expérimentation, le premier utilise Le *Chaudron Magique*, tandis qu'en parallèle, le deuxième groupe participe à une séance d'apprentissage classique. Les groupes permutent à la fin de l'activité. Cette expérience permet d'observer des résultats plus immédiats.

Enfin, la **seconde expérimentation** se déroule une période scolaire, entre deux vacances. Elle permet d'examiner si les enseignants ont réutilisé le jeu et comment.

4.2.1 Sécurité des données et consentement

L'ensemble des expérimentations ont été menées en conformité avec les réglementations européennes (RGPD) et françaises, ainsi que les recommandations

de la Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés (CNIL). Une attention particulière a été accordée à la protection des données personnelles et au respect de l'anonymat des participants.

4.2.1.1 Procédures de consentement

Les participants (élèves et leurs parents et enseignants) ont été informés des objectifs de la recherche, du déroulement des sessions, des données collectées et de leurs droits. Les documents comprenaient une note explicative claire et un formulaire de consentement rédigé dans un langage accessible. Les participants ont également été informés de leur droit de révoquer leur consentement à tout moment, sans conséquence.

4.2.1.2 Collecte, anonymisation et dépersonnalisation des données

Les données collectées incluent les résultats des tests (pré-tests et post-tests), les réponses aux questionnaires, et les observations comportementales. Aucune donnée sensible (telle que des informations de santé ou religieuses) n'a été collectée. Les données nominatives (noms, prénoms) ont été collectées uniquement pour gérer les correspondances administratives et ont été rapidement remplacées par des identifiants anonymes uniques.

Une anonymisation a été appliquée, en attribuant des identifiants uniques qui ne peuvent pas être tracés vers un individu spécifique sans accès à une table de correspondance sécurisée. Cette table a été stockée séparément et détruite à la fin de la phase d'analyse.

4.2.1.3 Sauvegarde et stockage des données

Les données anonymisées seront conservées pour une durée maximale de 5 ans après la soutenance de la thèse, conformément aux recommandations de la CNIL. Les données ont été sauvegardées sur le cloud sécurisé de l'université, conforme aux normes de sécurité en vigueur, incluant le chiffrement des fichiers aux repos et en transit et un accès restreint. Les accès aux données ont été journalisés pour garantir la traçabilité. Des sauvegardes régulières et sécurisées pour éviter toute perte de données.

4.2.2 Première pré-expérimentation

Dans le cadre de cette pré-expérimentation, le jeu *Chaudron Magique* a été testé au sein d'une classe de 26 élèves de 5^{ème} à Paris (figure 4.1) en juin 2021. Au début de l'expérimentation, les élèves ont répondu à une série de questionnaires, utilisant des questions types *PISA*, afin d'évaluer leur compréhension initiale des fractions. De plus, un autre questionnaire a été administré pour comprendre leur ressenti vis-à-vis de ce concept mathématique. Suite à cela, la classe a été divisée en deux groupes équivalents (GA et GB) en visant un équilibre selon plusieurs critères, tels que le genre, le niveau scolaire et la motivation.

Chaque groupe a ensuite participé à deux séquences pédagogiques. L'une était centrée autour du jeu *Chaudron Magique* en RM et l'autre suivait une méthode pédagogique classique préparée par l'enseignante, toutes deux visant les mêmes objectifs pédagogiques. Les groupes ont échangé les méthodes pour la seconde séquence, permettant ainsi à tous les élèves d'expérimenter les deux approches.

Après la deuxième séquence, les élèves ont à nouveau rempli les questionnaires pour évaluer l'évolution de leur compréhension des fractions et pour partager leurs préférences entre la séquence pédagogique classique et celle utilisant la RM. De son côté, l'enseignante a répondu à des questionnaires sur la

gestion de la classe, l'attitude des élèves face aux fractions, les évolutions constatées en matière de compréhension et sur les avantages et inconvénients perçus de l'utilisation de la RM. Enfin, des entretiens semi-dirigés ont été menés avec des groupes d'élèves pour recueillir leur opinion sur l'utilisation de la RM et le scénario du jeu.



Figure 4.1 Pré-expérimentation

Pour un suivi précis, l'ensemble des sessions a été filmé, permettant ainsi d'identifier les éventuelles difficultés et points de blocage. Suite à la pré-expérimentation, plusieurs modifications et améliorations ont été apportées au jeu *Chaudron Magique* et au protocole d'expérimentation que nous détaillerons plus bas.

4.2.2.1 Résultat de la pré-expérimentation

H1 (apprentissage) : Nous avons remarqué que les élèves se sont plus investis dans le jeu lorsqu'ils étaient en binôme, car ils discutaient et interagissaient entre eux afin de résoudre les exercices lors de la 2^e phase de test quand nous avons échangé les deux groupes (le groupe qui faisait l'activité classique découvrait le Chaudron Magique) et c'était la grande majorité des élèves qui ont décidé de se mettre à deux, puisqu'ils avaient le choix. Nous nous sommes aussi aperçus que les élèves confondent parfois les fractions avec des chiffres décimaux. D'après notre entretien avec l'enseignant, cette confusion est due à l'association d'une droite graduée à la règle qu'ils ont à l'école pour tracer des lignes droites. Nous avons aussi observé que les enfants ne sont pas forcément familiers avec la signification d'unité. Suite à notre entretien avec l'enseignant, nous avons déduit que certains prérequis (ex : notion d'unité, notion de base/théorique de droite graduée) sont nécessaires afin de jouer au *Chaudron Magique*.

H2 (autonomie) : nous avons remarqué que le fait d'augmenter le son du jeu aide les élèves à mieux suivre l'histoire. Les élèves se sont approprié le jeu, bien que parfois ils sollicitent de l'aide, ce qui nous a amenés à rajouter pour la suite des aides interactives en plus des rétroactions. Le matériel de jeu

était trop complexe (cinq fiches à manipuler) et les pièces de jeu se perdaient parfois sous ces fiches. Enfin, les pièces de jeu, imprimées sur du papier cartonné, n'étaient pas assez robustes ni faciles à manipuler. Un matériau plus robuste et épais pourrait non seulement faciliter la manipulation, mais aussi décourager les élèves à superposer les pièces ce qui pose un problème pour la reconnaissance d'images utilisée par la RM.

H3 (motivation) : D'après le ressenti de l'enseignante, les comportements des élèves pendant la séance du jeu et les observations des chercheurs participants, les élèves ont démontré un grand intérêt et beaucoup d'enthousiasme lors de la séance RM. Il s'est également avéré que l'immersion des élèves était accentuée par l'activation du son et que la collaboration en binômes stimulait leur curiosité et leurs motivations plus efficacement que le travail individuel.

4.2.2.2 Amélioration

La pré-expérimentation a révélé des opportunités d'amélioration pour le jeu. Des clarifications pédagogiques ont été intégrées pour éviter l'amalgame entre fractions et chiffres décimaux et une aide interactive a été mise en place pour soutenir l'autonomie des élèves. L'optimisation du matériel de jeu a été réalisée, notamment la simplification des fiches, l'ajout d'une fiche de rangement, l'usage d'un marqueur plus facile à détecter et la production de pièces de jeu plus épaisses pour éviter le chevauchement. Pour stimuler davantage l'engagement des élèves, des rétroactions supplémentaires ont été ajoutées, améliorant ainsi le prototype.

4.2.3 Expérimentation 1 : étude qualitative et quantitative RM vs. Classique

L'expérimentation 1 avait pour objectif de tester les hypothèses H1, H2 et H3 en comparant l'efficacité de l'outil *Chaudron Magique* à une activité d'enseignement classique des fractions. L'étude, qui s'est déroulée en deux séances, la première en janvier 2022 pour les classes de 1 à 3 et la seconde en avril 2022 pour les classes de 4 à 9, totalisant 228 élèves de différents niveaux d'études, répartis entre écoles primaires et collèges dans les régions de Laval et du Mans (figure 4.2).



Figure 4.2 Expérimentation 1

Le protocole expérimental s'est déroulé en cinq étapes principales, présentées sur la Figure 4.3 :

- **Étape 0 :** Cette étape, uniquement pour les classes 4 à 9, consistait en une session de familiarisation de 15 minutes avec les pièces du jeu à l'aide de l'application *QuizzApp*. Les autres classes, ayant déjà joué avec *l'Atelier de Potions*, n'avaient pas besoin de cette étape.

- **Étape 1** : Les élèves ont répondu à un pré-test comprenant des questions types *PISA* pour déterminer leur niveau de compétences liées aux fractions et une enquête pour évaluer leur ressenti vis-à-vis des fractions comme illustré dans l'annexe.
- **Étape 1Bis** : Les classes ont été divisées en deux groupes équilibrés (en fonction du sexe, du niveau et de la motivation des élèves) : GA et GB.
- **Étape 2** : Le groupe GA a joué au *Chaudron Magique*, tandis que le groupe GB a participé à une activité pédagogique classique, préparée par l'enseignant, qui travaillait sur les mêmes objectifs pédagogiques.
- **Étape 3** : Les élèves ont ensuite répondu à un post-test similaire au pré-test.
- **Étape 4** : Les groupes ont été inversés : le GB a joué au *Chaudron Magique* pendant que le GA participait à l'activité pédagogique classique.
- **Étape 5** : Enfin, les élèves ont répondu à un questionnaire final visant à identifier leurs préférences entre l'activité pédagogique classique et le jeu.

Cette expérimentation, en visant les mêmes objectifs pédagogiques, a permis de comparer les approches traditionnelles d'enseignement des fractions à l'utilisation innovante de la RM et des mécaniques de jeu par le biais du *Chaudron Magique*.

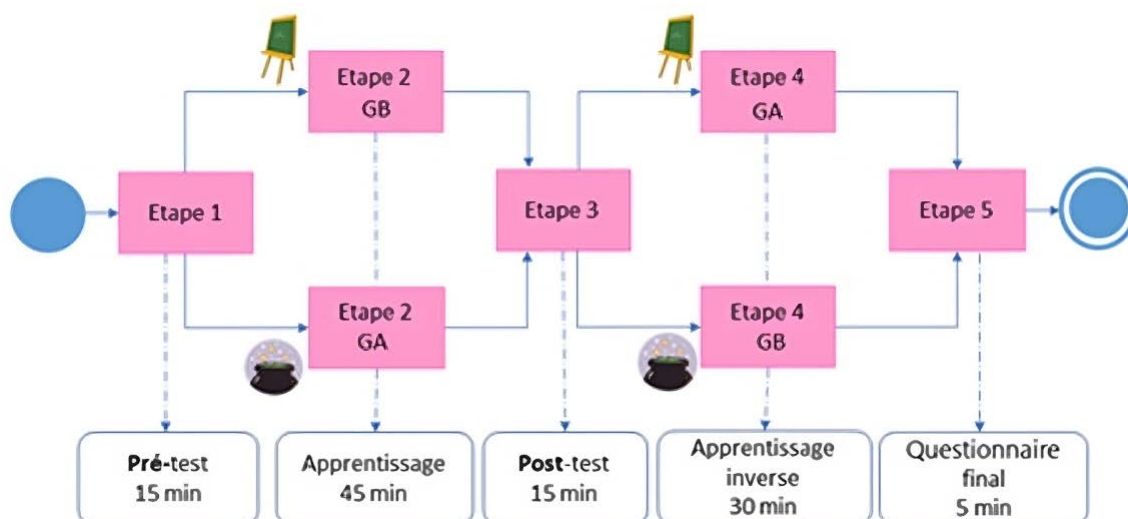


Figure 4.3 : Protocol expérimental

4.2.3.1 Pré-tests et post-tests

Les pré-tests et post-tests servent à mesurer la progression sur les compétences clés des fractions avant et après la session d'apprentissage afin de la comparer entre groupes (H1). Ces tests sont composés de deux activités, totalisant 12 questions. La première d'activité est composée de 6 questions. Les 3 premières traitent de fractions inférieures ou égales à 1 tandis que les 3 dernières des fractions supérieures à 1. Il s'agit de choisir la bonne réponse parmi les trois propositions, comme le montre la Figure 2. La deuxième activité est aussi une suite de 6 questions. Les 3 premières traitent de fractions inférieures ou égales à 1 tandis que les 3 dernières sur les fractions supérieures à 1. Il s'agit de placer une fraction sur la droite graduée, comme illustrée dans la Figure 4.

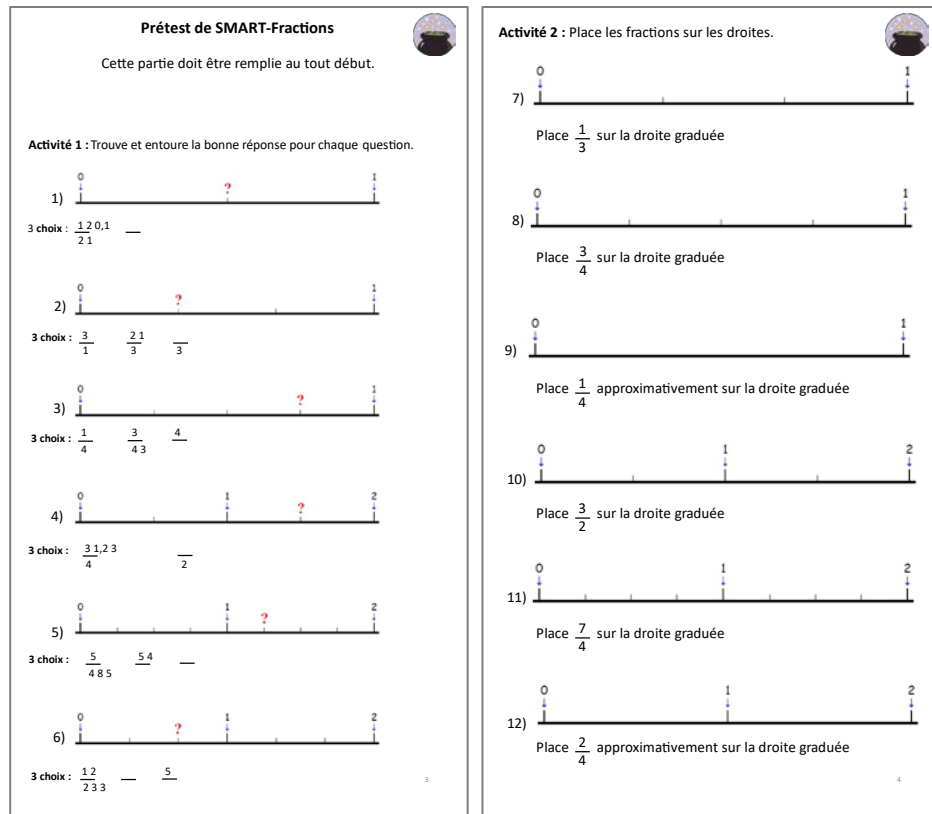


Figure 4.4. Questionnaires avec 2 activités d'évaluation sur les fractions

Les pré-test et post-tests contiennent également des questions du *Child Math Anxiety Questionnaire (CMAQ)* (Ramirez et al. 2013) pour mesurer l'anxiété des enfants (H3). Les enfants doivent répondre à 12 questions à l'aide d'une échelle qui comporte un visage calme à droite et un visage stressé à gauche Figure 5. Ils doivent dessiner une flèche pour exprimer leur état émotionnel. Ces résultats sont reportés sur une échelle de 1 à 16. Nous précisons aux enfants qu'il s'agit d'exprimer leur ressenti seulement.

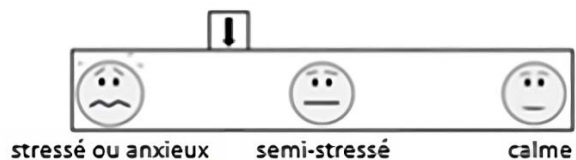

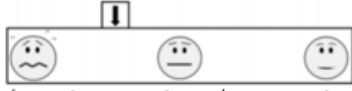



Figure 4.5. Échelle de mesure d'anxiété


L'échelle de niveau d'anxiété est comprise entre « stressé ou anxieux », équivalent à la valeur numérique 1, jusqu'à « calme », qui représente la valeur maximale 16. Ces chiffres nous sont utiles pour les calculs statistiques. Ces sentiments concernent divers aspects des fractions, en commençant par les questions générales qui traitent des fractions, puis pour les mathématiques et le *Chaudron Magique* ensuite sur les questions concernant la droite graduée et enfin l'activité 3 par des questions sur les fractions comme une partie d'un tout comme l'illustre la Figure 6.


Activité 3 : Place une flèche là où tu situes tes émotions comme dans l'exemple en dessous. 




 stressé ou anxieux semi-stressé calme

Question 1. Quand tu entends parler des fractions, quelle est ta réaction ? 



Question 2. Comment te sens-tu quand tu vas passer un examen autre qu'un examen de mathématiques ? 

Question 3. Comment te sens-tu quand tu vas passer un examen de mathématiques avec des fractions ? 

Question 4. Est-ce que tu as envie de jouer ou de rejouer au jeu *Le Chaudron Magique* ? 

Question 5. Sais-tu comment représenter une fraction de $\frac{1}{3}$ sur une droite graduée ?
 Oui
 Non
 Je ne suis pas sûr(e)

Question 6. Sais-tu comment représenter une fraction de $\frac{7}{3}$ sur une droite graduée ?
 Oui
 Non
 Je ne suis pas sûr(e)

Question 7. Comment te sens-tu quand tu vois ce type d'exercice avec des pizzas ? (Ne fais pas l'exercice) 
 Trouve les fractions correspondants aux images.



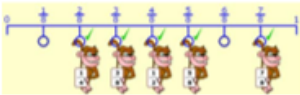
Question 8. Comment te sens-tu quand tu vois ce type d'exercice avec une droite graduée et des singes ? (Ne fais pas l'exercice) 


Figure 4.6. Activité 3 pour évaluer l'émotion des élèves

4.2.3.2 Questionnaire final

Le questionnaire final (Figure 4.7) permet de recueillir des informations sur la motivation des élèves dans le but de comparer les sessions d'apprentissage (H3).

Questionnaire final de SMART-Fractions

Cette partie doit être remplie après avoir joué au jeu *Le Chaudron Magique*
ET avoir fait la séquence d'exercices sur papier.

Question 1. Que préfères-tu ?

Le jeu *Le Chaudron Magique*

La séquence d'exercices sur papier

Question 2. Écris 3 mots pour décrire *Le Chaudron Magique* :

○

○

○

Question 3. Écris 3 mots pour décrire la séquence d'exercices sur papier :

○

○

○

Question 4. Écris tes commentaires sur ces sessions de maths !

Question 5. Si tu as le temps, relis les réponses que tu as mis dans le **Post test** (pages 7, 8 et 9). Si tu penses que tu as fait des erreurs, **corrige les avec un stylo rouge ou vert.**

Merci d'avoir participé à notre expérimentation scientifique !
Les résultats des questionnaires vont nous aider à mieux comprendre comment nous apprenons.

10

Figure 4.7. Questionnaire final

4.2.3.3 Recueil de données

Dans le cadre de l'expérimentation, différentes méthodes ont été utilisées pour collecter les données nécessaires à l'analyse. Deux caméras ont été utilisées pour filmer les activités des groupes GA et GB, permettant ainsi d'évaluer la fréquence des demandes d'aide formulées par les élèves (en rapport avec l'hypothèse H2).

En outre, deux autres caméras ont été utilisées pour filmer de manière plus détaillée deux élèves jouant avec *Le Chaudron Magique*. Les écrans de leurs tablettes étaient simultanément enregistrés afin de pouvoir identifier les problèmes rencontrés et analyser les stratégies de résolution utilisées par les élèves.

Enfin, un système d'eye-tracking a été utilisé sur six élèves. Bien que les données recueillies à l'aide de ce dispositif n'aient pas été exploitées dans le cadre de cette recherche, elles pourront servir à mieux comprendre où se porte l'attention entre les objets des mondes réels et virtuels.

Ces différentes méthodes de collecte de données ont permis une analyse approfondie du comportement et des stratégies des élèves lors de l'utilisation de l'outil *Chaudron Magique*.

4.2.3.4 Choix des indicateurs statistiques

Pour valider nos hypothèses, nous avons utilisé des tests statistiques adaptés aux données recueillies et aux types d'hypothèses testées. Le test de Wilcoxon est utilisé pour les hypothèses H1 et H3, concernant la progression des élèves entre le pré-test et le post-test. Ce test non-paramétrique est approprié, car il ne suppose pas de distribution normale des données, ce qui est souvent le cas pour les scores obtenus dans les tests éducatifs. De plus, il permet de comparer deux groupes dépendants (mesures avant et après la séance pour les mêmes élèves) sur une variable continue (la progression des élèves).

L'hypothèse H2, traitant de la différence de répartition des réponses correctes et incorrectes entre les deux groupes, nous avons eu recours au test du *Chi-carré* (χ^2). Ce test est utile pour comparer la distribution des fréquences constatées au sein de deux groupes distincts pour une variable de nature catégorielle.

4.2.3.5 Prétraitement

Le prétraitement des données a été réalisé afin d'éliminer les absences d'élèves lors du pré-test ou du post-test et les feuilles de réponses vierges. Ceci a réduit notre échantillon de 228 à 211 élèves. Nous avons également écarté une classe de 5^{ème} SEGPA (section d'enseignement général et professionnel adapté), dont les élèves présentent de grandes difficultés scolaires. Ceci s'est avéré nécessaire pour garantir l'homogénéité de notre échantillon, puisque l'approche d'enseignement « classique » de cette classe se basait en réalité sur des mini-ateliers de jeux de manipulation avec peu d'autonomie des élèves. Ainsi, nos analyses ont été effectuées sur un échantillon de 195 élèves.

Nous avons calculé la fiabilité du questionnaire d'anxiété à l'aide du coefficient *alpha de Cronbach*. Un score de 0.738 a été obtenu, suggérant une cohérence interne acceptable pour les éléments du questionnaire.

4.2.3.6 Résultats de l'expérimentation 1

H1 – L'utilisation du jeu Le Chaudron Magique en RM soutient le processus d'apprentissage des fractions.

Les élèves ont été évalués de la façon suivante : une note sur 6 sur les questions qui traitent des fractions inférieure ou égale à 1 et une 2^{ème} note sur 6 sur les questions qui traitent des fractions supérieures à 1. Une moyenne a été établie par la suite sur les deux notes sur 6 donc le score final varie entre 0 et 6. D'après le test statistique de *Wilcoxon*, il existe une différence significative entre les performances des élèves lors du pré-test et du post-test ($p = 2.281 \text{ e-}15$), quel que soit le groupe (voir Figure 8). Cela indique que tous les élèves, qu'ils appartiennent au GA ou au GB, ont développé leurs compétences relatives aux fractions. L'évolution de leurs compétences associées aux fractions inférieures ou égales à 1 est similaire dans les deux groupes ($p = 0.6655$). Cependant, pour ce qui est des compétences en lien avec les fractions supérieures à 1, nous notons une progression moins marquée dans le GA (RM) par rapport au GB ($p = 0.007392$).

Ce résultat concernant les fractions supérieures à 1 était anticipé étant donné que la durée de l'expérience ne permet pas une évolution significative. Toutefois, le Chaudron Magique a tout de même soutenu l'apprentissage de fractions inférieures ou égales à 1 de façon significative comparable aux méthodes classiques, ce qui nous amène à dire que Le *Chaudron Magique* aide

effectivement à l'apprentissage des fractions chez les enfants. Par conséquent, nous considérons que notre hypothèse H1 est partiellement confirmée lors de l'expérimentation 1.

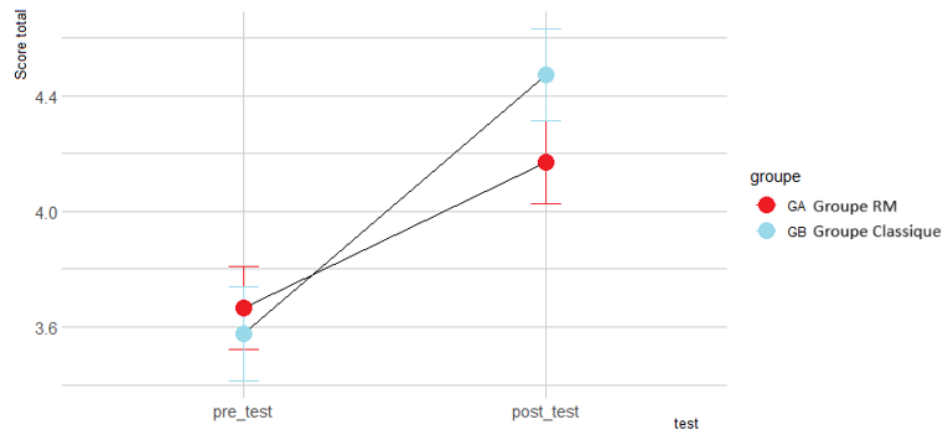


Figure 4.8. Évolution des compétences entre le pré-test et le post-test

Le niveau de départ des élèves varie naturellement en fonction de leur classe, les élèves plus jeunes dans des classes de CM1 commencent avec le niveau le plus bas, ainsi de suite.

Il en va de même pour l'amélioration de l'apprentissage, la Figure 4.9 illustre que, pour le groupe B plus les enfants sont jeunes et mieux ils apprennent.

Comparaison du résultat total de chaque classe entre le GA et le GB, dans le Pre/Post test

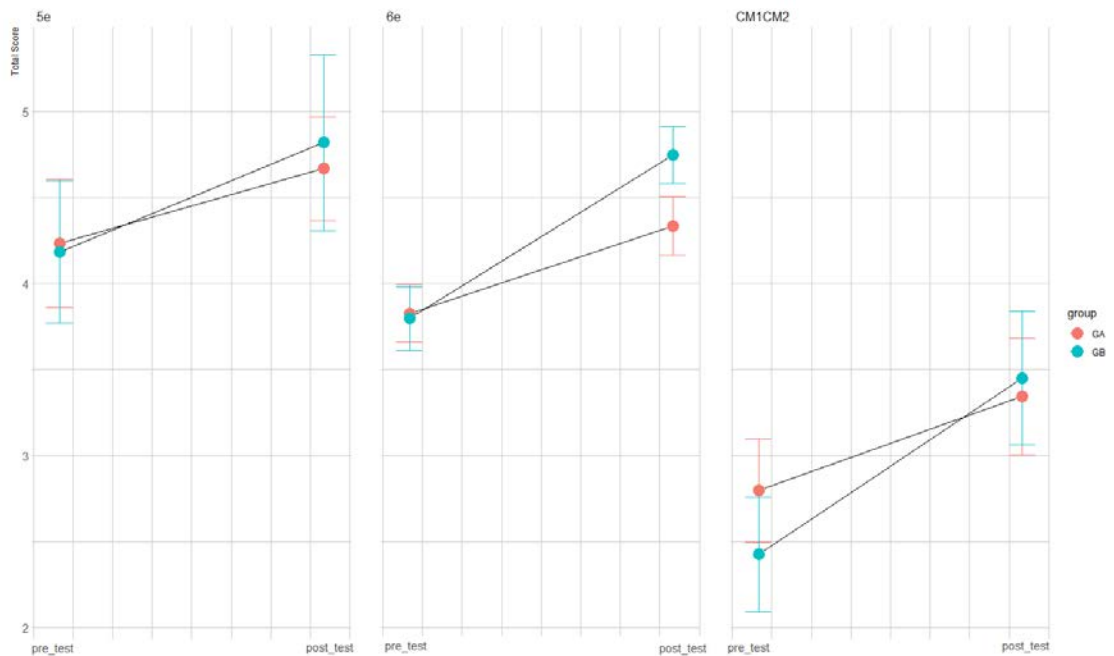


Figure 4.9. Comparaison du résultat par entre le groupe RM et le groupe classique par niveau d'étude

H2 – Les rétroactions du jeu *Le Chaudron Magique* en RM rendent les élèves plus autonomes.

Nous avons analysé le nombre de demandes d'aide dans le GA et le GB, et ce pour les trois niveaux scolaires concernés (CM1-CM2, 6^{ème} et 5^{ème}). Comme l'illustre la Figure 4.10, le GB sollicite plus d'aide en moyenne. D'après le test du *chi-carré*, cette différence est statistiquement significative ($p = 3.528 \text{ e-}09$). Par conséquent, grâce aux rétroactions en temps réel du jeu ainsi qu'à son système d'aide à la demande, les élèves qui utilisent *Le Chaudron Magique* manifestent une plus grande autonomie et font appel à leurs enseignants pour des questions pédagogiques de façon bien moins fréquente que ceux qui suivent un enseignement classique, indépendamment de leur âge. Nous remarquons aussi que plus les enfants sont âgés et plus ils sont autonomes, cet aspect nous laisse penser que les enfants plus jeunes auront besoin de séance préparatoire supplémentaire afin de se familiariser avec le jeu, ce qui pourrait leur permettre d'avoir davantage d'autonomie. Nous avons notamment remarqué une multitude de demande d'aides techniques de la part des CM1 et CM2, ce qui met en évidence la difficulté de ces derniers à s'approprier le jeu seul. Nous proposerons des améliorations pour ce point dans la section limite du *Chaudron magique*.

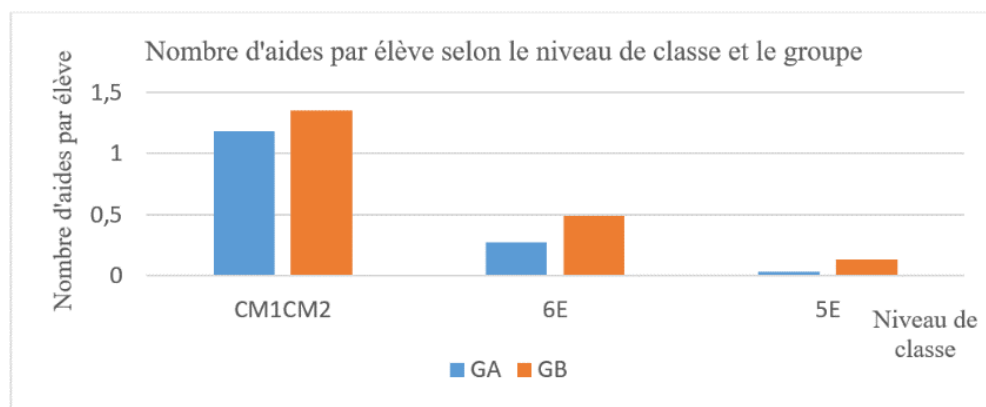


Figure 4.10. Nombre d'aides moyens par élève du GA et GB

H3 – L'utilisation du jeu *Le Chaudron Magique* en RM accroît le plaisir, la motivation et contribue également à la baisse de l'anxiété des enfants concernant l'apprentissage des fractions.

Nous constatons une réduction de l'anxiété entre le pré-test et le post-test pour les deux groupes (sur une échelle de 1 – stressé à 16 – calme), comme indiqué sur la Figure 4.11. Cette différence est statistiquement significative (Pour le groupe GA, la valeur de p est de 0,0071. Pour le groupe GB, la valeur de p est de 0,0039). Toutefois, selon le test statistique de *Mann-Whitney*, il n'y a pas de différence statistiquement significative entre le GA et le GB ($p = 0.8447$). Par conséquent, bien que *Le Chaudron Magique* ait contribué de façon notable à la réduction de l'anxiété chez les enfants en ce qui concerne l'apprentissage des fractions, il ne s'est pas révélé plus efficace que l'approche classique dans ce domaine. Cela nous conduit à examiner d'autres facteurs pour déterminer l'impact réel sur les différentes émotions ressenties lors de la session, telles que le plaisir, l'ennui ou encore la motivation.

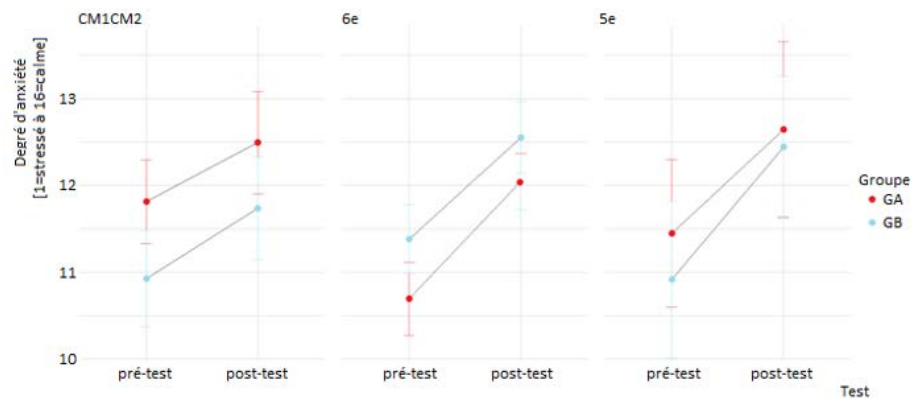


Figure 4.11. Degrés de non-anxiété/calme des élèves pendant le pré-test et le post-test par niveau d'étude

En analysant les termes employés par les élèves pour caractériser les deux sessions d'apprentissage, ainsi que leurs préférences, il semble que *Le Chaudron Magique* est plébiscité et qu'il suscite une plus grande motivation à être utilisé ou réutilisé. En effet, en réponse à la question « Que préfères-tu ? », 91% des élèves ont choisi *Le Chaudron Magique*, 5% ont préféré la session classique et 4% des élèves n'ont pas donné de réponse ou ont donné des réponses inappropriées. Cela confirme l'idée que les élèves sont plus motivés par le jeu.

De plus, la Figure 4.10 illustre présente le nuage de mots recueillis en réponse aux deux questions suivantes du questionnaire final : « Écris 3 mots pour décrire la séquence d'exercices sur papier » et « Écris 3 mots pour décrire *Le Chaudron Magique* ». Les dix mots les plus fréquemment cités pour les activités classiques sont : « bien » (64 fois), « ennuyant » (42), « facile » (39), « long » (35), « dur » (23), « fraction » (22), « difficile » (19), « amusant » (18), « nul » (16) et « simple » (10). Pour *Le Chaudron Magique*, les dix mots les plus couramment employés sont : « bien » (83 fois), « amusant » (60), « facile » (33), « drôle » (31), « magique » (28), « super » (27), « rigolo » (24), « cool » (24), « chaudron » (23) et « fraction » (22). Il est notable que huit des dix termes les plus choisis par les élèves pour décrire *Le Chaudron Magique* aient une connotation positive, les deux restants étant neutres du point de vue des émotions. Pour les termes associés aux activités classiques, la moitié représente une émotion négative (5/10) ce qui confirme que les élèves prennent davantage de plaisir avec *Le Chaudron Magique* qu'avec une activité classique.

D'après le ressenti des enseignants, les rétroactions des élèves pendant la séance du jeu, et les observations des chercheurs participants pendant l'expérience et post expérience (en regardant les vidéos) nous avons remarqué que les élèves ont démontré un grand intérêt et beaucoup d'enthousiasme lors de la séance avec le Chaudron Magique.

En conclusion, l'utilisation du *Chaudron Magique* a contribué à augmenter le plaisir et la motivation, tout en réduisant l'anxiété des enfants dans l'apprentissage des fractions. Cela corrobore ainsi notre hypothèse H3.



Figure 4.10. Nuage de mot pour la session d'apprentissage classique et avec Le Chaudron Magique

4.2.4 Expérimentation 2 : étude à moyen terme sur l'usage du Chaudron Magique

Cette expérimentation a eu pour but d'analyser l'usage du *Chaudron Magique* sur une période scolaire (entre deux vacances). Nous avons donc laissé le matériel de jeu à disposition des enseignants, sans instructions particulières sur son utilisation, juste après l'expérimentation 1. L'objectif était de voir s'ils allaient l'utiliser, comment et s'il avait perçu une différence avec les années précédentes. Cette expérimentation a donc eu lieu de janvier à février 2022 pour les classes de 1 à 3, et d'avril à fin juin 2022 pour les classes de 4 à 9 et a fait appel au même groupe d'enseignants et d'élèves que l'expérimentation 1.

À la fin de la période, les enseignants ont été sollicités pour répondre à divers questionnaires. Ces derniers portaient sur l'évolution de la classe avec l'utilisation du *Chaudron Magique* par rapport aux années précédentes, l'attitude des élèves face aux fractions et les changements survenus dans leur compréhension des fractions suite à l'utilisation du jeu.

Afin d'évaluer l'impact du Chaudron Magique sur plusieurs aspects de l'apprentissage des fractions, notamment la compréhension, l'autonomie et les émotions des élèves telles que la motivation et l'anxiété. Nous allons détailler ci-dessous l'approche de collecte de données quantitatives et qualitatives essentielles pour valider les hypothèses H1, H2 et H3 :

- **H1 (apprentissage) :** Un questionnaire en ligne comprenant dix questions a été proposé pour explorer l'apport du *Chaudron Magique* dans divers domaines, dont la compréhension des fractions. Les enseignants ont également été invités à comparer les résultats de leurs classes pendant l'année de l'expérimentation avec ceux des années précédentes, en tenant compte de la situation pandémique due au COVID-19. Les données complètes de ce questionnaire figurent dans la 2^e annexe qui s'intitule : « Questionnaires donnés aux enseignants ».
- **H2 (autonomie) :** Un questionnaire en ligne a été diffusé à la fin de l'expérimentation pour comprendre comment le *Chaudron Magique* a pu contribuer à l'autonomie des élèves. Des questions ouvertes ont également été posées aux enseignants sur les avantages perçus lors de l'utilisation du *Chaudron Magique*, fournissant ainsi des informations qualitatives sur le développement de l'autonomie des élèves.
- **H3 (Motivation) :** Pour évaluer l'impact du *Chaudron Magique* sur la motivation et l'enthousiasme des élèves, un questionnaire en ligne leur

a été administré, comportant des questions ouvertes sur leur expérience d'utilisation du *Chaudron Magique*.

En complément de l'évaluation de ces hypothèses, des questions supplémentaires ont été posées aux enseignants et aux élèves sur la réutilisation du *Chaudron Magique* et sur les fonctionnalités à améliorer, changer ou ajouter. Ces informations peuvent permettre d'améliorer l'outil et d'optimiser son impact sur l'apprentissage des élèves à l'avenir.

4.2.4.1 Les résultats de l'expérimentation

H1 – L'utilisation du jeu *Le Chaudron Magique* en RM soutient le processus d'apprentissage des fractions par rapport à une approche de cours traditionnel.

D'après les enseignants interrogés, le programme pédagogique concernant les fractions a considérablement changé ces dernières années. Ceci rend le jeu *Le Chaudron Magique* particulièrement pertinent. Une enseignante d'une classe de 5^{ème} SEGPA met en avant l'attrait du jeu en RM pour l'apprentissage grâce à son aspect concret et manipulable. De plus, selon elle, le format en RM favorise une meilleure concentration des élèves, par rapport au plateau de jeu, car il y avait moins de pièces et permettait ainsi aux élèves de se focaliser uniquement sur l'exercice.

L'ensemble des six enseignants interrogés (un 7ème enseignant était absent le jour de la réponse aux questionnaires), estime que *Le Chaudron Magique* favorise grandement la compréhension des fractions par les élèves. Parmi eux, cinq considèrent que le jeu est d'une aide significative avec une notation de moyenne de 8/10 pour apprendre à positionner une fraction égale ou inférieure à 1 sur une droite graduée (voir la 2^e annexe : « Questionnaires donnés aux enseignants). D'ailleurs, l'un des enseignants pense que : « *Les images utilisées et le mode de présentation du jeu permettent une meilleure visualisation des notions de fractions inférieures et supérieures à 1.* ». Un seul enseignant juge son apport comme modéré pour ce type d'exercice. En ce qui concerne les fractions supérieures à 1, quatre enseignants sur six indiquent que le jeu est très bénéfique pour aider les élèves à placer leurs fractions avec une réponse d'une valeur moyenne de 7.75/10, alors que deux enseignants le trouvent moyennement utile avec une note de 5.5/10 (voir la 2^e annexe : « Questionnaires donnés aux enseignants).

La moitié des enseignants était « Plutôt d'accord » que l'expérience a permis aux élèves, durant l'année, d'acquérir un meilleur niveau en fractions que leurs prédécesseurs, tandis que l'autre moitié a une réponse « neutre (ni d'accord ni en désaccord) ». Nous avons les mêmes réponses pour les fractions inférieures ou égales à 1. Ces réponses sont dues au fait que l'expérimentation s'est déroulée dans des circonstances particulières liées au COVID, qui a causé beaucoup de perturbations dans l'année scolaire, avec les fermetures d'établissements, les absences, et le fait que certaines évaluations annuelles qui permettent une comparaison entre les différentes promotions d'élèves n'ont pas été faites, cette situation n'a pas permis non plus à tous les enseignants de réutiliser le jeu, l'un des enseignants pense qu'« *il est difficile d'avoir du recul... Nous n'avons pas évalué après ni utilisé le jeu à nouveau faute de temps. Il est certain que sur le moment, on observe une progression de la compréhension et de la capacité à réaliser les tâches* ». Le jeu a été réutilisé seulement par les classes du primaire (classe 1 à 3), car en primaire c'est un seul enseignant qui dispense l'ensemble des matières ce qui lui donne plus de flexibilité pour s'organiser contrairement au collège où les enseignants voient les élèves seulement 2 à 3 heures par semaine par tranche de 45minutes. Nous avons également la classe

de 5^{ème} SEGPA qui réutiliser le jeu, car l'enseignant est aussi affecté à la classe durant toute la journée disposant ainsi d'une certaine indépendance pour gérer son temps et l'expérimentation, contrairement aux classes de collège où les enseignants ne disposent que d'une heure ou deux avec leurs classes.

Même si 3 des 6 enseignants avaient un avis « neutre (ni d'accord ni en désaccord) » sur le fait que l'expérience a permis aux élèves de l'étude d'acquérir un meilleur niveau en fraction supérieure à 1 que leurs prédécesseurs, 2 enseignants étaient « plutôt d'accord » et un enseignant était « Tout à fait d'accord » avec cette dernière.

L'ensemble des enseignants était « plutôt d'accord » ou « tout à fait d'accord » avec le fait que l'expérience avec le *Chaudron Magique* (que ça soit pendant l'expérimentation ou éventuellement lors de la réutilisation du jeu à l'expérimentation 2) a permis aux élèves de comprendre les notions basiques des fractions.

H2 – Les rétroactions du jeu Le *Chaudron Magique* en RM rendent les élèves plus autonomes.

En termes d'autonomie, les bogues techniques rencontrés durant l'utilisation du *Chaudron Magique* ont parfois semé le doute chez les élèves. Ils ne savaient pas si l'invalidation de l'exercice était due à une mauvaise reconnaissance des pièces par le système ou à une erreur de leur part. De ce fait, l'intervention du professeur était nécessaire lorsqu'un bogue survenait. Cependant, hormis ce détail, les élèves se montraient généralement autonomes, selon leurs enseignants.

En effet, les six enseignants interrogés estiment que le *Chaudron Magique* rend les élèves significativement plus autonomes comparés aux méthodes d'enseignement traditionnelles. Voici quelques-uns de leurs témoignages justifiant cette appréciation de l'autonomie des élèves : « *Ils ont essayé plusieurs fois seuls même quand la réponse n'était pas correcte. Ils étaient en recherche active et impliquée. Ils souhaitaient être en réussite. Et ils se sont aidés* ».

Les exemples d'autonomies exprimés par les enseignants sont multiples et divers, voici quelques exemples : « *Les aides fournies par le logiciel permettent aux élèves de travailler seuls* ». « *Très clairement ils essaient de faire par eux-mêmes cela est perçu comme un jeu, ils ressentent le besoin de faire seuls ou en binômes* ». « *L'interaction avec les personnages leur plaît et c'est moteur pour leur évolution* ».

En plus d'améliorer l'apprentissage, le *Chaudron Magique* amène les élèves à avoir certaines réflexions afin que leurs questions soient pertinentes. D'ailleurs 3 enseignants sur 6 estiment que les élèves posent plus de questions pertinentes sur les fractions pendant ou après avoir joué au *Chaudron Magique* et 3 enseignants ne sont ni d'accord ni en désaccord avec cette affirmation.

H3 – L'utilisation du jeu Le *Chaudron Magique* en RM accroît le plaisir et contribuer également à baisser l'anxiété des enfants concernant l'apprentissage des fractions.

L'ensemble des six enseignants trouve que Le *Chaudron magique* accroît de façon significative la motivation, l'engagement et l'enthousiasme chez les élèves, les six enseignants sont en accord avec une note de 9.6/10 sur le fait que Le *Chaudron magique* accroît de façon significative la motivation, l'engagement, et de 9.8/10 que Le *Chaudron magique* accroît de façon significative l'enthousiasme.

En outre, notre projet a permis aux enseignants d'utiliser des exemples issus du *Chaudron Magique* pour expliquer des concepts classiques de fractions en classe. Cela offre une alternative aux exemples traditionnels de

parts de pizza, qui sont moins parlants pour les élèves que les exemples tirés du *Chaudron Magique* auquel ils ont joué.

Voici quelques exemples de réutilisations en classe du *Chaudron Magique*, l'enseignant a personnalisé le cours afin qu'il soit plus parlant aux élèves :

- Jour 1 : L'enseignant a commencé par utiliser le *Chaudron Magique* avec deux classes de 6^{ème}. Les élèves ont été introduits à l'outil à travers une activité qui consistait à visualiser la conclusion $4 \times \frac{3}{4} = 3$. Les élèves ont réagi positivement à l'outil, montrant de l'enthousiasme et de l'engagement. L'enseignant a noté une amélioration dans la compréhension des élèves des fractions et de leur équivalence décimale.
- Jour 2 : L'enseignant a approfondi le concept des fractions en proposant une autre activité similaire qui a abouti à l'équation $3 \times \frac{2}{3} = 2$. La méthode d'enseignement a légèrement varié entre les deux classes, mais les élèves ont bien réagi et ont réussi à établir l'équivalence entre la fraction $\frac{2}{3}$ et sa valeur décimale. L'enseignant a aussi commencé à introduire des fractions, pour préparer les élèves à des méthodes de résolution plus traditionnelles.
- Jour 3 : L'enseignant a prévu d'introduire des fractions plus complexes et de voir comment les élèves les visualiseraient. Il a noté que le *Chaudron Magique* a été un outil efficace pour enseigner les fractions, en rendant l'apprentissage plus attrayant et en motivant les élèves à s'engager dans l'activité. Cependant, il a également remarqué que certains concepts étaient plus difficiles à retenir pour les élèves, ce qui pourrait nécessiter une révision future.
- Réutilisation du Jour 3 : L'enseignant a organisé une séance de questions flash avec les élèves en manipulant lui-même le *Chaudron Magique*. Les élèves ont réussi à répondre naturellement aux questions posées, montrant qu'ils ont bien intégré le concept des fractions à travers l'utilisation de cet outil. L'enseignant a remarqué que les élèves étaient sûrs d'eux lorsqu'ils corrigeaient leurs erreurs, ce qui indique un certain niveau d'autonomie. Cependant, quelques difficultés sont encore présentes, comme la confusion entre les tiers et les quarts pour certains élèves. L'enseignant note que malgré ces petits obstacles, il n'y avait pas de réticence exprimée par les élèves à utiliser les fractions.



Figure 4.11. : Réutilisation du monde du *Chaudron Magique* par l'enseignante

Question n° 2

Quelle fraction de serpent se trouve dans le chaudron ?



Figure 4.12. : Exemple de réutilisation du monde du *Chaudron Magique* par l'enseignante

De plus, certains enseignants suggèrent une utilisation du jeu à domicile afin que les élèves puissent réviser des notions de fraction.

4.2.4.2 Constats et perspectives d'améliorations

L'ensemble des six enseignants qui ont utilisé *Le Chaudron Magique* ont exprimé une grande satisfaction quant à l'aide apportée par Ekko, quatre enseignants ont trouvé l'aide « utile », et les deux autres ont trouvé l'aide d'Ekko « très utile ».

L'affichage de la valeur des ingrédients a été jugé utile ou très utile par quatre enseignants sur six, les deux autres le considérant même comme indispensable. La validation des mauvais ingrédients à l'aide d'une croix rouge a également été saluée, tout comme l'affichage simultané de la position de la fraction sur la droite graduée et l'affichage des ingrédients en réalité augmentée. Cinq enseignants sur six ont trouvé ces dernières fonctionnalités utiles ou très utiles, le sixième les considérant comme indispensables.

La majorité des enseignants trouvent que les élèves comprennent les énoncés des exercices du *Chaudron Magique* facilement.

Plusieurs pistes d'amélioration ont été identifiées. L'une des préoccupations concerne la capacité d'Ekko à répondre de manière adaptée aux questionnements des élèves. Comme l'a partagé l'un des enseignants : « *Il y a des endroits où les élèves demandaient de l'aide à Ekko, mais il n'y avait pas forcément de réponse adaptée à leur questionnement* ». Augmenter la capacité d'Ekko à répondre à une variété de questions pourrait considérablement améliorer l'expérience d'apprentissage (par exemple en utilisant de l'intelligence artificielle).

Un autre point à améliorer réside dans la visibilité et la reconnaissance de certaines fonctionnalités. Un enseignant a souligné : « *La droite graduée n'a pas toujours été remarquée par les élèves. Ils s'en sont aperçus au moment où il y avait une mission qui correspondait* ». Il s'agit d'améliorer l'ergonomie et l'affordance, c'est-à-dire rendre la fonctionnalité du magimètre plus intuitive et perceptible pour les utilisateurs. En d'autres termes, la droite graduée doit être visuellement plus présente ou signalée de manière à ce que les élèves l'identifient facilement, sans avoir besoin d'instructions explicites ou de découvertes tardives. Cela peut passer par des indices visuels ou des ajustements

dans le design pour attirer naturellement l'attention des élèves sur cet outil dès le début de l'exercice.

De plus, il serait utile d'optimiser l'espace de jeu, afin que l'application puisse mieux prendre en compte les pièces de jeu dans le champ de vision plus large de la caméra : « *Le placement des pièces, qui n'étaient pas toujours pris en compte par l'application* », a mentionné un enseignant, soulignant une potentielle d'amélioration. Ces améliorations rendront le jeu plus efficace, cependant les améliorations au niveau du contenu du jeu ont également été suggérées, afin de diversifier le contenu en ajoutant différents niveaux de difficulté ainsi que des exercices qui traitent des fractions décimales, comme mentionnées par le témoignage des enseignants : « *Peut-être un prolongement vers les nombres décimaux simples, par exemple sur les derniers exercices* ». « *Mettre en place différents niveaux de difficulté* ». « *Défi avec fractions décimales comparaison, addition dans des cas simples* ».

Ces retours témoignent de la valeur ajoutée que peut apporter Le *Chaudron Magique* tout en soulignant l'importance d'une amélioration continue pour maximiser son potentiel.

4.3 Conclusion

Notre expérimentation avait pour objectif d'explorer l'impact du jeu Le *Chaudron Magique* sur l'apprentissage des fractions, l'autonomie des élèves et leurs sentiments liés à l'enseignement des mathématiques. Les résultats obtenus semblent confirmer partiellement nos hypothèses.

Au travers d'une pré-expérimentation, des ajustements nécessaires ont été identifiés et appliqués au jeu *Chaudron Magique*, y compris l'optimisation de l'environnement de jeu, l'ajout d'aides interactives et la révision des exercices. L'ensemble de ces modifications a permis d'améliorer l'expérience d'apprentissage des élèves et l'efficacité du protocole expérimental.

Lors de l'expérimentation 1 à court terme, qui s'est déroulée sur un large public (plus de 200 élèves), nous avons étudié et analysé l'impact du *Chaudron Magique* sur l'apprentissage des fractions à travers nos trois hypothèses.

Pour l'hypothèse H1, nos résultats montrent une amélioration statistiquement significative de tous les élèves, qu'ils aient utilisé Le *Chaudron Magique* en RM ou l'activité classique en classe. Cependant, cette progression était moins prononcée pour les fractions supérieures à 1 pour les élèves ayant utilisé le jeu en RM. Ces résultats tendent à ne confirmer que partiellement l'hypothèse 1.

Concernant l'hypothèse H2, Le *Chaudron Magique* a permis de réduire significativement le recours à l'aide de l'enseignant par rapport à l'enseignement classique, indiquant un gain d'autonomie pour les élèves qui l'ont utilisé. Cela suggère que les éléments interactifs et le *feedback* en temps réel offert par le jeu peuvent aider à soutenir l'autonomie des élèves, validant ainsi notre 2^{ème} hypothèse.

Pour l'hypothèse H3, nos résultats montrent que l'utilisation du jeu a permis de réduire l'anxiété des élèves par rapport à l'apprentissage des fractions et a augmenté leur plaisir et leur motivation. Même si la réduction de l'anxiété n'a pas été plus importante que dans le groupe ayant suivi l'enseignement classique, l'analyse des termes employés par les élèves pour décrire leur expérience montre une préférence claire pour Le *Chaudron Magique*, ce qui vient confirmer notre 3^{ème} hypothèse.

En ce qui concerne l'expérimentation sur plusieurs mois, les retours de 6 enseignants ont confirmé l'impact positif du jeu Le *Chaudron Magique* sur

l'engagement des élèves et leur compréhension des fractions. Le format en RM a particulièrement été apprécié pour sa capacité à maintenir la concentration des élèves, en leur offrant un environnement immersif et interactif. Les enseignants ont également noté que les élèves, grâce à l'interface ludique, se montraient plus autonomes, tentant de résoudre des problèmes seuls avant de demander de l'aide, comme l'a montré l'amélioration de leur autonomie. De plus, le jeu a renforcé la motivation et l'enthousiasme des élèves pour l'apprentissage des fractions. Ces observations qualitatives corroborent les résultats obtenus dans l'expérimentation initiale et soulignent le potentiel du *Chaudron Magique* comme outil d'apprentissage immersif et engageant. Néanmoins, certaines suggestions d'amélioration ont émergé, notamment en ce qui concerne l'adaptation des aides fournies par l'avatar Ekko et l'intégration de niveaux de difficulté supplémentaires, ainsi que des exercices sur les fractions décimales.

En conclusion, Le *Chaudron Magique* s'est révélé être un outil pédagogique efficace pour l'apprentissage des fractions et pour accroître l'autonomie et la motivation des élèves. Cependant, des ajustements techniques et pédagogiques sont nécessaires pour optimiser l'apprentissage des fractions plus complexes. Ces résultats offrent une base solide pour l'amélioration continue du jeu et son intégration future dans les pratiques pédagogiques.

Chapitre 5. Conclusions et perspectives

Ce chapitre présente les conclusions des travaux de thèse, ainsi que les perspectives envisagées pour poursuivre ces travaux de recherches.

5.1 Conclusions générales

Cette thèse a exploré le potentiel de la Réalité Mixte (RM) pour l'enseignement des fractions en concevant et évaluant l'application éducative *Le Chaudron Magique*. L'objectif principal était d'examiner comment la RM peut transformer l'apprentissage des mathématiques en le rendant plus interactif, engageant et intuitif pour les élèves.

Nous avons commencé par présenter les défis didactiques liés à l'apprentissage des fractions. Cette matière est particulièrement complexe pour les élèves, tant sur le plan conceptuel que sur le plan émotionnel, générant souvent de l'anxiété. Bien que les jeux sérieux en RM présentent de nombreux avantages pédagogiques potentiels, leur conception nécessite de surmonter plusieurs obstacles. Tout d'abord, il est essentiel de faciliter la collaboration entre différents acteurs : des enseignants, des didacticiens, des développeurs et des experts en jeu sérieux. Par ailleurs, il faut tenir compte des contraintes organisationnelles et matérielles auxquelles font face les enseignants, afin de leur proposer des outils faciles à intégrer dans leurs classes.

Pour répondre à ces défis, nous avons formulé **trois hypothèses de recherche**. La première hypothèse (H1) vise à vérifier que l'utilisation du jeu *Le Chaudron Magique* en RM soutient le processus d'apprentissage des fractions. La deuxième hypothèse (H2) concerne les rétroactions dans le jeu *Le Chaudron Magique* en RM, en étudiant si elles rendent les élèves plus autonomes, en validant et corrigeant les différentes activités automatiquement et en proposant une aide en temps réel. Enfin, la troisième hypothèse (H3) a pour but de vérifier si l'utilisation du jeu *Le Chaudron Magique* en RM accroît le plaisir et l'engagement des élèves, tout en contribuant à la baisse de l'anxiété liée à l'apprentissage des fractions.

Ces hypothèses ont orienté notre démarche de recherche, qui s'est articulée autour de **deux axes principaux**. Le premier axe vise à proposer une **démarche de recherche collaborative et itérative** pour faciliter la conception de jeux sérieux avec des interactions innovantes, en intégrant une équipe pluridisciplinaire composée d'experts en jeux sérieux, d'enseignants, didacticiens, développeurs, graphistes et d'élèves. Le second axe vise à développer un **modèle de conception de jeux sérieux en RM**, prenant en compte les contraintes techniques et organisationnelles des écoles, tout en élaborant des scénarios ludiques et captivants intégrant efficacement les objectifs pédagogiques et exploitant le potentiel de la RM.

Nous avons ensuite présenté plusieurs états de l'art. Le premier concerne les **applications de RM dans le domaine des mathématiques**, en évaluant leurs objectifs pédagogiques, les interactions qu'elles offrent, ainsi que les matériels et logiciels utilisés pour leur développement. L'analyse a révélé que la majorité des applications de RM se concentrent sur des concepts géométriques en raison de la capacité de la RM à améliorer la visualisation spatiale. Cependant, il y a un besoin croissant de développer des applications pour

d'autres domaines des mathématiques, notamment pour permettre de voir simultanément plusieurs représentations d'un même concept, comme dans le cas des fractions. À travers l'analyse de diverses applications, nous avons montré que la RM peut offrir plusieurs avantages pédagogiques, tels que la réduction de la charge cognitive et l'amélioration de l'engagement des élèves. Les expérimentations menées par les auteurs de ces applications ont démontré que, même si les augmentations en RA (informations et objets virtuels projetés sur des objets réels) sont pertinentes d'un point de vue pédagogique, ce sont les interactions riches de RM, l'aide contextuelle et les rétroactions personnalisées qui ont le plus d'impact sur l'engagement et l'apprentissage des élèves. De plus, l'analyse a relevé que l'utilisation de tablettes serait la solution la plus efficace dans un cadre scolaire, en proposant des supports physiques (bras) qui permettent aux élèves d'avoir les mains libres afin d'interagir avec l'application. Le deuxième état de l'art concerne les **méthodes et modèles de conception des jeux éducatifs**. Notre analyse montre que les contributions actuelles se concentrent principalement sur le lien entre les aspects ludiques et pédagogiques, ou encore l'implication des différentes parties prenantes dans le processus de conception. Bien que ces approches soient essentielles pour assurer une cohérence entre les éléments ludiques et les objectifs d'apprentissage, elles ne prennent pas toujours en compte des facteurs spécifiques à la RM, tels que l'importance des interactions immersives, des aides contextuelles et des rétroactions personnalisées, qui ont pourtant démontré un impact significatif sur l'engagement et l'apprentissage des élèves dans les environnements RM. Il apparaît donc que les modèles actuels, bien qu'efficaces dans la conception générale de jeux éducatifs, nécessitent une extension pour intégrer pleinement les capacités uniques de la RM, afin d'optimiser leur utilisation dans l'éducation, en particulier pour des concepts mathématiques complexes comme les fractions.

Nous avons ensuite détaillé notre proposition de **démarche de recherche** que nous illustrons avec la conception du jeu *Le Chaudron Magique*. Cette démarche collaborative est inspirée du *Design-Based Research (DBR)* et des méthodes *Agiles*. Elle a permis de concevoir et d'améliorer une application en intégrant étroitement les retours des enseignants et des élèves. La collaboration entre développeurs, enseignants, didacticiens et utilisateurs finaux a joué un rôle clé dans la création d'un jeu intégrant des avancées technologiques au service de la pédagogie. L'inclusion des utilisateurs finaux dès les premières phases a notamment été déterminante pour s'assurer que le jeu réponde aux besoins éducatifs réels, tout en restant accessible et engageant. En outre, le processus itératif de la démarche proposée a permis de transformer un concept initial en une expérience d'apprentissage enrichissante et interactive.

En complément de cette démarche, nous proposons un **modèle de conception de jeux sérieux en RM**. Ce modèle, basé sur une analyse approfondie des besoins pédagogiques et un état de l'art sur les modèles existants, vise à fournir un cadre structuré pour le développement de jeux éducatifs utilisant la RM. Le modèle intègre des éléments essentiels tels que la définition des objectifs pédagogiques, la conception des interactions, l'utilisation des technologies appropriées et l'évaluation de l'impact pédagogique. En prenant en compte les contraintes techniques et organisationnelles des écoles, notre modèle permet

de développer des jeux sérieux qui sont non seulement pédagogiquement pertinents, mais également pratiques à mettre en œuvre dans un contexte scolaire réel. Afin de faciliter la compréhension du modèle, nous l'avons illustré avec les éléments du jeu *Le Chaudron Magique*.

Enfin, nous avons présenté **plusieurs expérimentations du jeu *Le Chaudron Magique*** en milieu écologique. L'objectif était d'explorer l'impact du jeu sur l'apprentissage des fractions (H1), l'autonomie des élèves (H2) et leurs sentiments liés à l'enseignement des mathématiques (H3). Les résultats obtenus confirment partiellement nos hypothèses, comme nous le précisons ci-après.

Une **pré-expérimentation**, avec 26 élèves, a permis d'identifier et d'appliquer des ajustements nécessaires au jeu, y compris l'optimisation de l'environnement de jeu, l'ajout d'aides interactives et la révision des exercices. Ces modifications ont amélioré l'expérience d'apprentissage des élèves et l'efficacité du protocole expérimental.

Lors d'une **expérimentation à court terme**, menée auprès de plus de 200 élèves, nous avons évalué l'impact du *Chaudron Magique*. Concernant l'hypothèse H1, nos résultats ont montré une amélioration statistiquement significative pour tous les élèves, que ce soit dans le groupe utilisant le jeu ou dans le groupe suivant un enseignement classique. Cependant, cette progression était moins prononcée pour les élèves utilisant *Le Chaudron Magique* en ce qui concerne les fractions supérieures à 1, comparée à la progression du groupe ayant suivi un enseignement classique. Ces résultats indiquent donc une confirmation partielle de notre première hypothèse. Cependant le fait que les élèves apprennent les fractions inférieur ou égale à 1 aussi bien qu'avec les méthodes classiques permet à l'enseignant de concentrer ses interventions sur des apprentissages plus complexes ou pour soutenir des élèves en particulier. D'ailleurs concernant l'autonomie notre hypothèse H2 qui traite sur cette dernière indique que *Le Chaudron Magique* a permis de réduire significativement le recours à l'aide de l'enseignant par rapport à l'enseignement classique, indiquant un gain d'autonomie pour les élèves qui l'ont utilisé. Cela suggère que les éléments interactifs et le *feedback* en temps réel offert par le jeu peuvent aider à soutenir l'autonomie des élèves, validant ainsi notre deuxième hypothèse. Pour l'hypothèse H3, nos résultats montrent que l'utilisation du jeu a permis de réduire l'anxiété des élèves par rapport à l'apprentissage des fractions et a augmenté leur plaisir et leur motivation. Même si la réduction de l'anxiété n'a pas été plus importante que dans le groupe ayant suivi l'enseignement classique, l'analyse des termes employés par les élèves pour décrire leur expérience avec le jeu et l'enseignement classique montre une préférence claire pour *Le Chaudron Magique*, confirmant ainsi notre troisième hypothèse.

Nous avons également mené une **expérimentation à moyen terme** avec six des enseignants ayant participé à l'expérimentation décrite ci-dessus en leur laissant le matériel de jeu afin de voir comment ils l'utiliseraient. Leurs retours ont souligné l'impact positif du jeu sur l'engagement des élèves vis-à-vis des cours de mathématiques et leur compréhension des fractions. Certains enseignants ont même réutilisé le jeu pour des activités en autonomie ou juste les pièces du jeu pour expliquer des concepts en classe. Ces retours corroborent

les résultats obtenus dans notre étude et soulignent le potentiel du jeu comme outil d'apprentissage.

Au-delà des résultats expérimentaux, l'expérience acquise lors de la conception et des expérimentations du *Chaudron Magique* a permis d'identifier plusieurs éléments pratiques et méthodologiques cruciaux. Parmi eux, l'importance de concevoir des pièces de jeu suffisamment épaisses pour une meilleure manipulation par les élèves, tout en prévoyant des rangements adaptés pour éviter les pertes et faciliter le transport. Nous avons également constaté que la durée des séances doit être modulée pour correspondre aux contraintes horaires des établissements, comme les cours de 55 minutes au collège. Par ailleurs, l'utilisation d'éléments sonores immersifs s'est révélée bénéfique pour capter l'attention des élèves et améliorer leur engagement. Enfin, les élèves ont naturellement montré une préférence pour le travail en binômes, ce qui pourrait être exploité davantage dans la conception future des activités. Ces observations enrichissent notre compréhension des besoins des utilisateurs finaux et pourraient servir à améliorer les futures conceptions de jeux éducatifs en RM.

D'un point de vue organisationnel, le projet a démontré l'efficacité d'une approche collaborative, utilisant des outils numériques tels que *Discord* pour la coordination, *Unity Collab* pour le développement collaboratif, et des plateformes de stockage en ligne (*Google Drive*, puis *OneDrive*) pour la gestion des ressources partagées. Ces choix ont permis de maintenir une communication fluide entre les parties prenantes et de faciliter les itérations tout au long du processus, malgré la distance (France – Canada).

Cette recherche enrichit la littérature sur l'utilisation de la RM dans l'éducation, en contribuant aux méthodes à mettre en œuvre pour intégrer cette technologie dans les pratiques pédagogiques. La démarche de conception et le modèle de conception de jeux sérieux en RM proposé offrent une base réutilisable pour le développement futur de solutions éducatives innovantes. En particulier, l'un des atouts majeurs de la RM réside dans sa capacité à présenter plusieurs représentations simultanément, par superposition, facilitant ainsi la compréhension des concepts abstraits. Cette approche ne se limite pas aux fractions et peut être appliquée à d'autres domaines de l'éducation, tels que la géométrie ou la chimie. En outre, notre recherche a montré que ces caractéristiques immersives de la RM peuvent être utilisées pour surmonter les barrières cognitives et émotionnelles souvent associées à l'apprentissage des fractions, telles que l'anxiété ou les difficultés à appréhender des concepts abstraits.

5.2 Perspectives

Une prise de recul sur nos travaux nous amène à proposer plusieurs perspectives de recherche. Certaines sont des pistes d'améliorations à court terme, d'autres soulèvent des problématiques de recherches plus longs termes.

5.2.1 Perspective 1 : améliorer le jeu et approfondir les expérimentations

Pour améliorer l'efficacité pédagogique du *Chaudron Magique*, il serait pertinent d'apporter plusieurs modifications.

Tout d'abord, l'introduction d'adaptations automatiques des niveaux en fonction des erreurs commises par les élèves permettrait de personnaliser davantage les parcours d'apprentissage. Cette approche d'individualisation pourrait s'appuyer sur un modèle de l'apprenant, intégrant des données telles que les performances passées, les besoins spécifiques et les objectifs pédagogiques. Il serait ainsi possible de proposer des parcours d'apprentissage adaptés de manière dynamique, soit en sélectionnant parmi des parcours existants, soit en générant des activités adaptées en temps réel, selon le niveau de compétence et les besoins identifiés de chaque élève (Shute et Towle 2003; Lemoine 2022). Ce type de génération de contenu personnalisé, déjà exploré dans des travaux récents, permettrait de répondre précisément aux besoins des élèves tout en maintenant leur engagement en évitant la frustration liée aux erreurs répétées (J. R. Anderson et al. 1995). La génération d'activités pédagogiques à la volée, comme proposée par Lemoine (2022), offre une solution pour surmonter les limites des parcours fixes, en s'appuyant sur des modèles de génération adaptative.

De plus, l'amélioration de l'aide automatique pourrait être envisagée pour fournir des explications plus détaillées ou des indices supplémentaires lorsque l'élève fait des erreurs. Dans ce cadre, il est essentiel que le système possède une modélisation du domaine d'apprentissage afin de proposer des aides ciblées en fonction de la difficulté des problèmes rencontrés. Cette approche, typique des systèmes de tutorat intelligents (ITS), repose sur un modèle du domaine utilisé pour résoudre les problèmes pour ensuite guider l'élève dans le processus de résolution (VanLehn 2006; Woolf 2010). Des recherches sur les ITS montrent que la capacité à adapter les explications et à fournir une aide contextuelle basée sur la modélisation du domaine peut améliorer significativement la compréhension des élèves et favoriser un apprentissage plus profond (Baker, Corbett, et Koedinger 2004; VanLehn 2006). De plus, l'intégration d'un ITS dans *Le Chaudron Magique* permettrait de fournir une aide personnalisée tout en maintenant l'autonomie de l'élève, renforçant ainsi ses compétences en résolution de problèmes et en apprentissage actif.

Ensuite, il serait judicieux de **revoir les exercices** relatifs aux fractions supérieures à 1, un concept qui semble poser des difficultés particulières. Des solutions pourraient inclure l'introduction de représentations visuelles plus dynamiques, ainsi que des exercices progressifs qui augmentent en complexité à mesure que l'élève gagne en compétence (Siegler et Pyke 2013). Ces ajustements contribueraient à surmonter les obstacles spécifiques identifiés lors des expérimentations et à enrichir l'expérience d'apprentissage des élèves.

Enfin, l'intégration **d'outils de suivi et d'évaluation** dans le jeu permettrait de collecter des données détaillées sur les interactions des élèves avec le jeu. Celles-ci pourraient être utilisées pour analyser les stratégies d'apprentissage des élèves, identifier les points de blocage et ajuster les contenus pédagogiques en conséquence.

Une autre perspective intéressante serait de développer des tableaux de bord pour les enseignants. Ces outils pourraient fournir des informations en temps réel sur les performances des élèves, notamment sur les compétences acquises, les difficultés rencontrées et les progrès effectués dans le jeu. Les

enseignants pourraient alors utiliser ces données pour adapter leur enseignement en fonction des besoins individuels de chaque élève, renforçant ainsi l'approche pédagogique différenciée. Les tableaux de bord pourraient également inclure des indicateurs de performance clés, tels que le temps passé sur chaque tâche, les types d'erreurs commises, ou encore le niveau de progression dans le parcours d'apprentissage. Ces fonctionnalités seraient particulièrement utiles pour suivre l'évolution des compétences sur des périodes longues, et pour aider les enseignants à personnaliser leurs interventions pédagogiques en classe.

D'autre part, pour affiner les conclusions de cette thèse et mieux comprendre l'impact de la RM sur l'apprentissage des fractions, il est crucial de **mener davantage d'expérimentations**. Les études actuelles, bien qu'informatives, ont été limitées par la durée relativement courte des expérimentations et le nombre de participants.

Une **étude sur le long terme** permettrait d'observer les effets durables de l'utilisation de la RM, notamment en ce qui concerne la rétention des connaissances et la progression des compétences des élèves (Makransky, Terkildsen, et Mayer 2019). Une telle étude permettrait également d'examiner les effets cumulatifs et les changements dans l'attitude des élèves vis-à-vis des fractions au fil du temps (Linda M. Collins 2006). Par exemple, il serait intéressant d'explorer si l'enthousiasme initial pour la RM se maintient après plusieurs mois d'utilisation ou si les élèves développent de nouvelles stratégies d'apprentissage grâce à une exposition prolongée à cette technologie. De plus, une telle étude pourrait identifier des périodes spécifiques où les interventions en RM sont les plus bénéfiques, comme au début de l'apprentissage des fractions ou lors de la transition vers des concepts mathématiques plus complexes. De plus, l'étude des effets à long terme de la RM pourrait également inclure une analyse des coûts et des bénéfices. Bien que la mise en œuvre initiale de la RM puisse nécessiter des investissements substantiels en termes de matériel et de formation des enseignants, les bénéfices en termes de résultats d'apprentissage améliorés, de motivation accrue et de réduction de l'anxiété pourraient justifier ces coûts. Une évaluation économique détaillée aiderait les décideurs à prendre des décisions éclairées sur l'intégration de la RM dans les curriculums scolaires (Slavin 2002), même si l'évaluation d'un retour sur investissement peut s'avérer difficile, cela permettrait de mettre en évidence la valeur de cet apprentissage.

Des **études incluant un plus grand nombre de participants** et une diversité de contextes éducatifs, seraient également bénéfiques. Cela permettrait d'obtenir des résultats plus généralisables et de mieux comprendre comment la RM peut être adaptée pour répondre aux besoins spécifiques de différentes populations d'élèves (Hattie 2008).

En outre, nous pensons qu'il serait intéressant de mener une **étude spécifique sur l'effet de la RM sur la collaboration** entre apprenants. En effet, lors de l'utilisation du *Chaudron Magique* en classe, nous avons remarqué que la majorité des apprenants voulaient naturellement se mettre par deux et les échanges qu'ils avaient les aidaient à progresser dans le jeu. Cela s'est pro-

duit plusieurs fois pendant les différentes expérimentations. Toutefois, ces séquences n'ont pas été analysées en profondeur, par manque de temps, et pour réduire le nombre de variables. Les compétences de collaboration sont nécessaires pour le développement global des élèves et leur préparation à des environnements de travail modernes (Praharaj 2022), il serait donc utile de les favoriser et de les soutenir.

Pour toutes ces études, il est important d'utiliser des **méthodes de recherche mixtes, combinant des approches quantitatives et qualitatives**. Des données quantitatives peuvent être collectées à l'aide d'électroencéphalogrammes par exemple, pour mesurer la charge cognitive (van Gog, Paas, et Sweller 2010) ou les technologies *d'eye-tracking* pour révéler des informations précieuses sur les points d'attention des élèves et la manière dont ils naviguent à travers les tâches en RM (Holmqvist et al. 2011). Cela permettrait non seulement de valider les hypothèses d'engagement et d'apprentissage, mais aussi d'identifier des zones de difficulté spécifiques pour ajuster la conception des exercices et du gameplay en fonction des besoins réels des élèves. Les données qualitatives peuvent être obtenues avec des entretiens d'auto-confrontation (Fuller et Manning 1973), où les apprenants commentent des vidéos d'eux-mêmes en train de jouer. Ces entretiens pourraient être utilisés pour explorer ce qui se passe dans leur esprit durant l'interaction avec la RM. Cette approche, ancrée dans la théorie des subjectivités (Kretschmann 2015), permettrait de mieux comprendre comment les apprenants interprètent et intègrent leurs expériences d'apprentissage en RM, en révélant les processus cognitifs et émotionnels sous-jacents à leurs comportements et d'affiner les stratégies pédagogiques en conséquence. D'autres méthodes comme les groupes de discussion et les observations en classe peuvent révéler des aspects de l'apprentissage et de l'engagement des élèves qui ne sont pas capturés par les tests standardisés. Les données quantitatives fournissent des preuves statistiques de l'efficacité des activités instrumentées, tandis que les données qualitatives offrent des indications sur l'expérience des élèves et des enseignants.

5.2.2 Perspective 2 : mener une étude comparative entre Le Chaudron Magique avec et sans RM

La conception d'une version du *Chaudron Magique* sans RM permettrait d'effectuer une comparaison entre les deux modalités pédagogiques. Une telle étude comparative offre une opportunité d'évaluer l'impact spécifique de la RM sur l'apprentissage des fractions en isolant les variables liées à l'interactivité et à l'immersion. En effet, alors que la RM apporte des avantages en termes d'engagement et de visualisation des concepts, il est crucial de déterminer dans quelle mesure ces avantages se traduisent en gains d'apprentissage mesurables par rapport à une approche numérique traditionnelle (Moreno et Mayer 2007; Johnson-Glenberg et Megowan-Romanowicz 2017).

Cette version numérique sans RM du *Chaudron Magique* garderait les mêmes activités pédagogiques et les éléments ludiques. Il s'agit seulement de changer le mode de sélection des pièces. Au lieu de saisir les pièces tangibles et de les déposer sous la tablette, les apprenants pourraient simplement sélectionner les pièces sur la tablette en cliquant dessus. Nous avons déjà développé

ce type d'interface pour l'application *QuizzApp* qui a été conçue pour aider les élèves à se familiariser avec l'interface du Chaudron Magique. Comme présentée dans la figure 5.1, la sélection des pièces se fait en cliquant sur le bon type d'ingrédients (fioles avec une araignée, serpent, raie ou grenouille) puis en cliquant sur les pièces à sélectionner (ici, 1/3 de serpent).

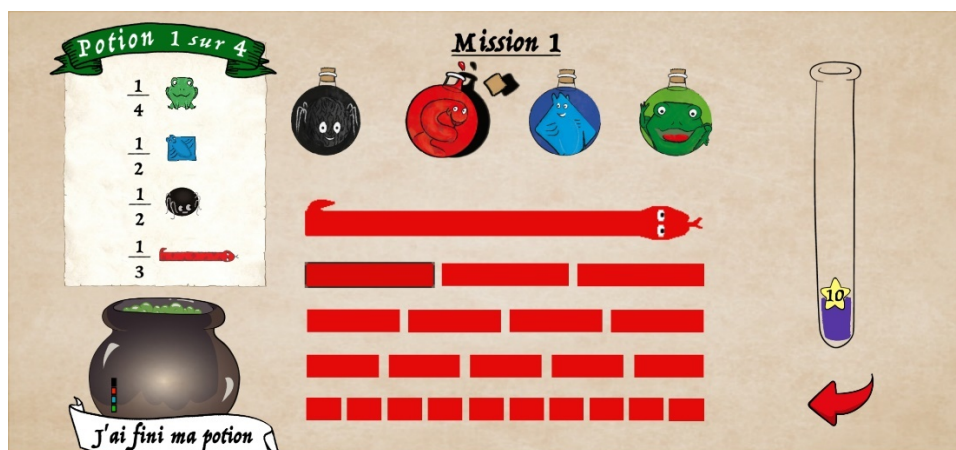


Figure 5.1. Quizz APP

L'évaluation comparative entre les deux versions nécessiterait une méthodologie rigoureuse. Des groupes d'élèves seraient assignés de façon équilibrée (e.g. par genre, niveau, anxiété, etc.) à utiliser soit la version RM du Chaudron Magique, soit la version numérique sans RM. Les performances des élèves seraient mesurées à l'aide de tests pré et post-intervention pour évaluer les gains d'apprentissage. De plus, des questionnaires et des entretiens seraient utilisés pour recueillir des données qualitatives sur l'engagement, la motivation et la perception des élèves concernant les deux modalités d'apprentissage.

Une analyse statistique des résultats permettrait de déterminer si les différences observées entre les deux groupes sont statistiquement significatives. Cette analyse inclurait des tests statistiques pour comparer les moyennes des scores des deux groupes et des analyses de variance pour examiner les interactions entre différentes variables (Field 2024; Tabachnick, Fidell, et Ullman 2013). De plus, des techniques de modélisation multivariée pourraient être utilisées pour contrôler les variables confondantes et isoler l'effet spécifique de la RM sur les résultats d'apprentissage.

L'une des hypothèses à tester serait que l'immersion et l'interactivité offertes par la RM conduisent à une meilleure compréhension des fractions et à une plus grande rétention des connaissances par rapport à la version numérique sans RM (Makransky et Lilleholt 2018). Cette hypothèse est liée à H1 de notre étude, qui postule que l'utilisation du jeu *Le Chaudron Magique* en RM soutient le processus d'apprentissage des fractions. Cependant, alors que H1 se focalise sur l'effet spécifique de l'utilisation de *Le Chaudron Magique* en RM pour l'apprentissage des fractions, la nouvelle hypothèse explore de manière plus générale si l'immersion et l'interactivité de la RM, indépendamment du contexte d'un jeu spécifique, offrent un avantage par rapport aux outils numériques sans RM en termes de compréhension et de rétention des concepts mathématiques. Cette comparaison permettrait de mieux comprendre les effets

spécifiques de la RM dans un cadre plus large, en identifiant les avantages qu'elle apporte en tant que technologie immersive par rapport aux approches numériques traditionnelles.

En termes de conception pédagogique, il est essentiel de mettre en avant les différences apportées par la RM par rapport à la version numérique traditionnelle, notamment en ce qui concerne l'immersion et l'interactivité. Bien que des éléments comme les aides interactives et le feedback immédiat soient importants pour les deux versions, car le feedback immédiat est crucial pour l'apprentissage des mathématiques (Wiliam 2011), l'intérêt principal de cette étude comparative est d'examiner comment l'intégration de la RM enrichit ces éléments pédagogiques. Par exemple, dans la version RM, le feedback pourrait être non seulement immédiat, mais aussi visuel et immersif, renforçant ainsi l'engagement et l'apprentissage des élèves. Il est important d'étudier dans quelle mesure ces éléments immersifs spécifiques à la RM améliorent la compréhension et la rétention des concepts mathématiques, en comparaison avec la version sans RM. Cette approche permettrait de mieux saisir les apports spécifiques de la RM, au-delà des aspects déjà bien établis dans les environnements numériques classiques.

En conclusion, la conception d'une version numérique du Chaudron Magique sans RM offre une opportunité intéressante pour évaluer l'impact spécifique de la RM sur l'apprentissage des fractions. Cette comparaison permettrait de mieux comprendre les avantages et les limitations de la RM dans un contexte éducatif et de guider le développement futur de technologies éducatives innovantes. Les résultats de cette étude comparative contribueraient à la littérature sur les technologies éducatives et fourniraient des recommandations basées sur des preuves pour les formateurs et les décideurs.

5.2.3 Perspective 3 : munir Ekko d'une intelligence artificielle générative

L'intégration d'une Intelligence Artificielle (IA) générative à Ekko, le personnage principal du jeu du *Chaudron Magique*, permettrait d'enrichir l'expérience d'apprentissage des élèves. Une IA générative peut analyser les interactions en se basant sur les réponses des élèves et leur comportement dans le jeu (e.g., choix de réponses, temps de réaction). Elle peut alors déduire les difficultés rencontrées, telles que des erreurs récurrentes dans le placement des fractions ou une lenteur excessive, et identifier des patterns typiques de blocage. Cette analyse pourrait ensuite permettre de proposer des solutions adaptées, en reformulant les questions, en offrant des pistes de réflexion ou en proposant des indices progressifs pour maintenir un équilibre entre assistance et autonomie (Holmes, Bialik, et Fadel 2019).

L'IA générative, comme les modèles de type GPT-4, permet de générer des réponses textuelles adaptées au contexte (Brown et al. 2020). Par exemple, si un élève ne comprend pas un concept particulier, Ekko pourrait reformuler l'explication, offrir des exemples supplémentaires ou utiliser des analogies pertinentes pour faciliter la compréhension (Zawacki-Richter et al. 2019; Brown et al. 2020).

L'intégration d'une IA générative pourrait également améliorer la capacité d'Ekko à fournir un feedback en temps réel ou différé, selon le besoin

pédagogique identifié (Holmes, Bialik, et Fadel 2019). En effet, en fonction des situations d'apprentissage, un feedback immédiat peut parfois bloquer la réflexion autonome de l'élève, alors qu'un feedback différé laisse à l'apprenant le temps de chercher par lui-même avant de recevoir un soutien explicatif. Cette approche permet d'adapter la nature du feedback en fonction des situations d'apprentissage spécifiques. Par exemple, si un élève se trompe dans le placement d'une fraction supérieure à 1 sur la droite graduée, l'IA pourrait identifier une *misconception* courante, telle que l'incapacité à visualiser la fraction comme un tout supérieur à l'unité, et proposer une explication ou une correction qui vise à corriger cette erreur en utilisant des exemples pertinents.

De plus, l'IA générative pourrait enrichir les interactions d'Ekko en rendant le personnage plus réactif et engageant. En utilisant des techniques avancées de traitement du langage naturel, Ekko pourrait répondre aux questions des élèves de manière plus naturelle et adapter le dialogue aux progrès de l'élève. Par exemple, Ekko pourrait poser des questions ouvertes pour encourager les élèves à réfléchir de manière critique ou utiliser des scénarios et des histoires pour rendre les concepts mathématiques plus concrets et intéressants (Brookfield 2011;)

Cependant, l'intégration d'une IA générative présente des défis techniques et éthiques. Il est nécessaire de s'assurer que l'IA respecte les normes de confidentialité et de sécurité des données, en particulier lorsqu'il s'agit de l'interaction avec des enfants. Les données collectées doivent être anonymisées et sécurisées pour protéger la vie privée des élèves. De plus, il est important de concevoir des algorithmes qui minimisent les biais et offrent un soutien équitable à tous les élèves, indépendamment de leur niveau de compétence ou de leur contexte socio-économique (Binns 2018; Veale et Binns 2017). Des efforts continus doivent être faits pour surveiller et évaluer les performances de l'IA afin de garantir qu'elle fonctionne de manière équitable et efficace pour tous les utilisateurs.

L'impact de l'IA générative sur l'apprentissage des élèves devrait être évalué rigoureusement. Des études expérimentales pourraient comparer les performances des élèves utilisant une version standard du *Chaudron Magique* avec ceux utilisant une version enrichie par une IA générative. Ces études devraient inclure des mesures quantitatives et qualitatives pour évaluer l'engagement des élèves, leur compréhension des fractions et leur niveau d'anxiété. Les données quantitatives pourraient être collectées via des tests de performance, tandis que les données qualitatives pourraient être obtenues à partir d'entretiens, de questionnaires et d'observations en classe.

Pour finir, l'intégration d'une IA générative pourrait offrir des opportunités pour des expériences d'apprentissage plus personnalisées et adaptatives (Luckin 2017). L'IA pourrait ajuster la difficulté des exercices en fonction des performances passées de l'élève, proposer des activités de révision ciblées pour renforcer les concepts mal compris et offrir des encouragements et des récompenses pour maintenir la motivation. Ces fonctionnalités adaptatives pourraient aider à créer un environnement d'apprentissage qui réponde aux besoins individuels de chaque élève.

5.2.4 Perspective 4 : développer un outil auteur fondé sur le modèle de conception de jeux en RM et étendre son utilisation à d'autres disciplines éducatives

La démarche de recherche et le modèle de conception de jeux en RM que nous avons développés pour l'enseignement des fractions avec *Le Chaudron Magique* (Marfisi-Schottman, Touel, et George 2021) peuvent servir de base pour la conception d'un **outil auteur** spécifiquement dédié à la conception de jeux éducatifs en RM. Ce modèle se concentrerait sur l'utilisation des technologies immersives pour représenter des concepts éducatifs sous forme d'interactions en RM, ce modèle mettrait l'accent sur l'exploitation des technologies immersives pour représenter des concepts éducatifs sous forme d'interactions en RM, plutôt que de simplement adapter des contenus numériques ou physiques classiques à cet environnement. Cet environnement auteur permettrait à tout enseignant de créer son propre jeu éducatif fondé sur ce modèle sans nécessité de connaissances en programmation.

En amont, il serait cependant nécessaire de valider le modèle et la démarche dans d'autres contextes éducatifs pour s'assurer de leur pertinence et de leur efficacité au-delà de l'enseignement des fractions. Ces validations pourraient inclure des disciplines variées, des niveaux d'enseignement différents et des contextes socioculturels diversifiés. Une fois ces validations effectuées, il serait pertinent de proposer et de développer un outil auteur fondé sur ce modèle et cette démarche, permettant aux enseignants de concevoir des jeux éducatifs en RM adaptés à leurs besoins spécifiques. Un tel outil pourrait s'inspirer de modèles d'outils auteurs existants tels que LEGADEE (Marfisi-Schottman 2012), qui propose un cadre structuré pour la conception de jeux éducatifs. De plus, il pourrait intégrer des outils de modélisation d'activités pédagogiques, à l'image de celui proposé par MISA (Paquette, Crevier, et Aubin 1997).

Cet outil auteur en RM permettrait aux enseignants de choisir et de configurer des interactions spécifiques propres à la RM, telles que des manipulations immersives, des simulations dynamiques ou des représentations en trois dimensions. Cela pourrait inclure des activités comme la manipulation de modèles en 3D dans les sciences ou la reconstitution d'événements historiques pour favoriser l'apprentissage interactif. L'objectif n'est pas simplement d'ajouter un support numérique, mais bien d'exploiter les capacités immersives uniques de la RM pour renforcer la compréhension des concepts, particulièrement ceux pouvant se représenter sous différentes formes.

L'outil auteur permettrait également de personnaliser et adapter les interactions immersives en fonction des objectifs pédagogiques spécifiques de chaque discipline. Par exemple, dans le domaine des sciences, cela pourrait se traduire en la visualisation simultanée de plusieurs représentations d'un même atome, telles que le modèle de Dalton, le modèle de Thomson, celui de Rutherford, de Bohr, et même le modèle quantique de Schrödinger. Les élèves pourraient interagir avec ces représentations en temps réel, en modifiant des paramètres comme l'énergie ou la charge, et observer instantanément les impacts sur chacune des versions. Cela leur permettrait de comprendre les liens entre ces différents modèles et d'analyser comment une modification de la structure

atomique se traduit à travers chacune des représentations, offrant ainsi une approche holistique de la compréhension des phénomènes atomiques et recréant des expériences qu'ils ne pourraient pas effectuer en classe. En biologie, la RM permettrait aux élèves de visualiser simultanément plusieurs représentations de l'ADN, comme sa structure en double hélice, une séquence linéaire de nucléotides (A, T, C, G), ou encore sous forme de cartes génomiques. Ils pourraient interagir avec ces représentations en temps réel, par exemple en modifiant des segments d'ADN, en introduisant une mutation ou en supprimant des nucléotides. Ces changements leur permettraient de voir immédiatement comment cela affecte la structure de la double hélice et la séquence linéaire de nucléotides, ainsi que l'impact potentiel sur les fonctions des gènes dans les cartes génomiques. De même, en explorant les interactions moléculaires dans le système immunitaire, ils pourraient ajuster la présence de certaines molécules ou protéines, observer les réponses immunitaires simulées à ces changements, et analyser comment cela modifie les prévisions des modèles mathématiques sur les réponses aux maladies. Cela leur offrirait une compréhension approfondie de la relation entre les représentations visuelles et les phénomènes biologiques réels.

En mathématiques, la RM permettrait de représenter les nombres complexes sous forme algébrique ($a + bi$), géométrique dans le plan complexe, ou encore sous forme exponentielle ou polaire, offrant une visualisation simultanée des différentes représentations. Les élèves pourraient également interagir avec des fonctions mathématiques sous forme graphique, algébrique, ou sous forme de tableau de valeurs, modifiant les paramètres et observant instantanément les effets sur chacune des représentations. Cela leur permettrait d'approfondir leur compréhension des liens entre ces différents modèles et d'analyser les concepts sous plusieurs perspectives complémentaires.

La mise en œuvre technique de l'outil auteur doit être adaptative pour prendre en considération les ressources disponibles et les besoins spécifiques de chaque contexte éducatif (Laurillard 2012). L'outil auteur pourrait inclure des options permettant de choisir entre différentes technologies, comme l'utilisation de tablettes et smartphones dans des environnements où les ressources technologiques sont limitées, ou l'intégration de matériel de RM plus sophistiqué dans des contextes mieux équipés. Cela garantirait que l'outil reste pertinent et accessible à un large éventail d'utilisateurs, tout en permettant une personnalisation en fonction des contraintes matérielles spécifiques.

Le scénario ludique, qui inclut les niveaux, les séquences d'actions et la trame narrative, pourrait également être conçu à l'aide de l'outil auteur pour chaque discipline afin de maintenir l'engagement des élèves tout en atteignant les objectifs pédagogiques (Salen Tekinbas et Zimmerman 2003; Koster 2013). L'outil pourrait offrir des modèles de scénarios ludiques en RM que les éducateurs peuvent adapter, leur permettant ainsi de créer des récits captivants et des interactions immersives qui pourraient influencer la capacité d'analyse des élèves et leurs esprits critiques (Facione 1990; Papert 1980).

En conclusion, cet outil auteur en RM, fondé sur le modèle développé dans cette thèse, propose une nouvelle solution flexible pour permettre aux enseignants d'intégrer la RM dans leurs pratiques pédagogiques. Il rendrait la création de jeux éducatifs en RM accessible, sans compétences techniques pointues, tout en offrant une personnalisation avancée des scénarios afin de répondre aux objectifs pédagogiques de diverses disciplines. Le développement d'un tel outil nécessite une démarche itérative, intégrant la validation du modèle dans des contextes éducatifs variés, ainsi que l'identification des types d'interactions RM les plus pertinents pour chaque domaine d'apprentissage. Les prochaines étapes clés incluraient la définition des fonctionnalités spécifiques de l'outil, la mise à disposition de configurations techniques adaptées aux ressources des établissements et l'accompagnement des enseignants pour en faciliter l'adoption. Cette démarche contribuerait à l'adoption de la RM dans l'éducation, simplifiant ainsi la création d'expériences immersives, engageantes et adaptées aux besoins spécifiques des élèves.

Bibliographie

- Abdul Hanid, M. F., Mohamad Said, M. N. H., Yahaya, N., & Abdullah, Z.** (2022). Effects of augmented reality application integration with computational thinking in geometry topics. *Education and Information Technologies*, 27(7), 9485–9521. <https://doi.org/10.1007/s10639-022-10994-w>
- Abdullah, A. A., Richardo, R., Rochmadi, T., Wijaya, A., & Nurkhamid, N.** (2022). The use of ethnomathematics learning media based on augmented reality for madrasah students. *AL-ISHLAH: Jurnal Pendidikan*, 14(1), 877–886. <https://doi.org/10.35445/alishlah.v14i1.1140>
- Alahmadati, A. A.** (2016). *Autour du concept de fraction à l'école primaire en France* [Thèse de doctorat, Univ. Lyon 2]. HAL. <https://shs.hal.science/tel-01302152/>
- Alibali, M. W., & Nathan, M. J.** (2012). Embodiment in mathematics teaching and learning: Evidence from learners' and teachers' gestures. *Journal of the Learning Sciences*, 21(2), 247–286. <https://doi.org/10.1080/10508406.2011.611446>
- All, A., Nuñez Castellar, E. P., & Van Looy, J.** (2016). Assessing the effectiveness of digital game-based learning: Best practices. *Computers & Education*, 92, 90–103.
- Anastassova, M., Burkhardt, J.-M., Megard, C., & Ehanno, P.** (2007). Ergonomics of augmented reality for learning: A review. *Travail Humain*, 70(2), 97–125.
- Anderson, J. R., Corbett, A. T., Koedinger, K. R., & Pelletier, R.** (1995). Cognitive tutors: Lessons learned. *The Journal of the Learning Sciences*. https://doi.org/10.1207/s15327809jls0402_2
- Anderson, L. W., & Krathwohl, D. R.** (2001). *A taxonomy for learning, teaching, and assessing: A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives: Complete edition*. Addison Wesley Longman, Inc. <https://eduq.info/xmlui/handle/11515/18824>
- Anderson, T., & Shattuck, J.** (2012). Design-based research: A decade of progress in education research? *Educational Researcher*, 41(1), 16–25. <https://doi.org/10.3102/0013189X11428813>
- Andrea, R., Lailiyah, S., Agus, F., & Ramadiani, R.** (2019). "Magic Boosed" an elementary school geometry textbook with marker-based augmented reality. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 17(3), 1242–1249.
- Aubry, C.** (2013). *Scrum-3e éd.: Le guide pratique de la méthode agile la plus populaire*. Dunod. https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=c-eg_HR6Rh0C
- Bailey, D. H., Siegler, R. S., & Geary, D. C.** (2014). Early predictors of middle school fraction knowledge. *Developmental Science*, 17(5), 775–785. <https://doi.org/10.1111/desc.12155>
- Baker, R. S., Corbett, A. T., & Koedinger, K. R.** (2004). Detecting student misuse of intelligent tutoring systems. In J. C. Lester, R. M. Vicari, & F. Paraguaçu (Eds.), *Intelligent tutoring systems* (pp. 531–540). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30139-4_50
- Behr, M. J., Lesh, R., Post, T., & Silver, E. A.** (1983). Rational number concepts. In *Acquisition of mathematics concepts and processes* (pp. 91–126).
- Beşevli, C., Salman, E., Goksun, T., Urey, H., & Özcan, O.** (2019). MaR-T: Designing a projection-based mixed reality system for nonsymbolic math development of preschoolers: Guided by theories of cognition and learning. In *Proceedings of the 18th ACM International Conference on Interaction Design and Children* (pp. 280–292). ACM. <https://doi.org/10.1145/3311927.3323147>
- Binns, R.** (2018). Fairness in machine learning: Lessons from political philosophy. In *Proceedings of the 1st Conference on Fairness, Accountability and Transparency* (pp. 149–159). PMLR. <https://proceedings.mlr.press/v81/binns18a.html>
- Birt, J., Stromberga, Z., Cowling, M., & Moro, C.** (2018). Mobile mixed reality for experiential learning and simulation in medical and health sciences education. *Information*, 9(2), 31.
- Bloom, B. S.** (1956). *Taxonomy of educational objectives: Handbook II*. David McKay.
- Boissiere, A.** (2023). *Jeux et apprentissages mathématiques: De la conception d'un jeu de société à un ingénierie didactique et ludique* [Thèse de doctorat, Université de Montpellier]. <https://theses.fr/api/v1/document/2023UMONS075>
- Boud, D., Keogh, R., & Walker, D.** (2013). *Reflection: Turning experience into learning*. Routledge.
- Brookfield, S. D.** (2011). *Teaching for critical thinking: Tools and techniques to help students question their assumptions*. John Wiley & Sons. <https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=r7DG2e41pZMC>

- Brown, T., Mann, B., Ryder, N., Subbiah, M., Kaplan, J. D., Dhariwal, P., Neelakantan, A., Shyam, P., Sastry, G., & Askell, A.** (2020). Language models are few-shot learners. *Advances in Neural Information Processing Systems*, *33*, 1877–1901.
- Brun, D., Ruer, P., Gouin-Vallerand, C., & George, S.** (2018). A toolkit for exploring augmented reality through construction with children. In *2018 20th Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)* (pp. 106–113). IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8802385/>
- Buchori, A., Sulianto, J., & Osman, S.** (2023). Interactive learning media with augmented reality (AR) Geogebra for teaching geometry in elementary school. *Profesi Pendidikan Dasar*, 17–30.
- Bujak, K. R., Radu, I., Catrambone, R., MacIntyre, B., Zheng, R., & Golubski, G.** (2013). A psychological perspective on augmented reality in the mathematics classroom. *Computers & Education*, *68*, 536–544.
- Bunt, L., Greeff, J., & Taylor, E.** (2024). Enhancing serious game design: Expert-reviewed, stakeholder-centered framework. *JMIR Serious Games*, *12*, e48099.
- Cahyono, A. N., Sukestiyarno, Y. L., Asikin, M., Ahsan, M. G. K., & Ludwig, M.** (2020). Learning mathematical modelling with augmented reality mobile math trails program: How can it work? *Journal on Mathematics Education*, *11*(2), 181–192.
- Carroll, J. M.** (1996). Encountering others: Reciprocal openings in participatory design and user-centered design. *Human-Computer Interaction*, *11*(3), 285–290. https://doi.org/10.1207/s15327051hci1103_5
- Cetintav, F., & Yilmaz, R.** (s. d.). The effect of augmented reality technology on middle school students' mathematic academic achievement, self-regulated learning skills, and motivation. *Journal of Educational Computing Research*, *61*(7), 1483–1504. <https://doi.org/10.1177/07356331231176022>
- Chandler, P., & Tricot, A.** (2015). Mind your body: The essential role of body movements in children's learning. *Educational Psychology Review*, *27*(3), 365–370. <https://doi.org/10.1007/s10648-015-9333-3>
- Chen, Y.-C.** (2019). Effect of mobile augmented reality on learning performance, motivation, and math anxiety in a math course. *Journal of Educational Computing Research*, *57*(7), 1695–1722.
- Cheng, K.-H.** (2018). Surveying students' conceptions of learning science by augmented reality and their scientific epistemic beliefs. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, *14*(4), 1147–1159.
- Cheung, C.** (2016). What are the effects of touchscreens on toddler development? *Parenting for a Digital Future*. <https://eprints.lse.ac.uk/76145/>
- Clark, D. B., Tanner-Smith, E. E., & Killingsworth, S. S.** (2016). Digital games, design, and learning: A systematic review and meta-analysis. *Review of Educational Research*, *86*(1), 79–122. <https://doi.org/10.3102/0034654315582065>
- Cochrane, T., Davis, N. E., & Mackey, J.** (2016). Design-based research with AGILE sprints to produce MUVES in vocational education. In *Utilizing virtual and personal learning environments for optimal learning* (pp. 291–313). IGI Global. <https://www.igi-global.com/chapter/design-based-research-with-agile-sprints-to-produce-muves-in-vocational-education/135678>
- Collins, A., Joseph, D., & Bielaczyc, K.** (2004). Design research: Theoretical and methodological issues. *Journal of the Learning Sciences*, *13*(1), 15–42. https://doi.org/10.1207/s15327809jls1301_2
- Coquin, D., & Camos, V.** (2006). Décimaux et fractions. In *La cognition mathématique chez l'enfant* (pp. 145–154).
- Cramer, K. A., & Post, T. R.** (2002). Initial fraction learning by fourth- and fifth-grade students: A comparison of the effects of using commercial curricula with the effects of using the rational number project curriculum. *Journal for Research in Mathematics Education*, *33*(2), 111–144.
- Csikszentmihalyi, M.** (1990). *Flow: The psychology of optimal experience*. Harper & Row.
- Da Costa, J., Szilas, N., & Mueller, A.** (2019). Réalité augmentée pour l'apprentissage conceptuel en sciences: Quels principes de conception pour les EIAH? Cas du dispositif DEAPE Learn en électromagnétisme. In *Actes de la 9ème Conférence sur les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain* (pp. 181–192).
- Kolb, D. A.** (1984). *Experiential learning: Experience as the source of learning and development*. Prentice-Hall.

- Direction générale de l'enseignement scolaire.** (2023). Eduscol (Programme du cycle 3 en vigueur à la rentrée 2023). *Direction générale de l'enseignement scolaire*. <https://eduscol.education.fr/87/j-enseigne-au-cycle-3>
- Dondlinger, M. J.** (2007). Educational video game design: A review of the literature. *Journal of Applied Educational Technology*, 4(1), 21–31.
- Drascic, D., & Milgram, P.** (1996). Perceptual issues in augmented reality. In *Stereoscopic displays and virtual reality systems III* (Vol. 2653, pp. 123–134). SPIE.
- Durlak, J. A., Weissberg, R. P., Dymnicki, A. B., Taylor, R. D., & Schellinger, K. B.** (2011). The impact of enhancing students' social and emotional learning: A meta-analysis of school-based universal interventions. *Child Development*, 82(1), 405–432. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2010.01564.x>
- Dweck, C. S.** (2006). *Mindset: The new psychology of success*. Random House. https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=ft6UOEe7_kQC
- Empson, S. B., & Levi, L.** (2011). Extending children's mathematics: Fractions and decimals. *Mathematics Education*, 27(4), 403–434.
- Facione, P. A.** (1990). *Critical thinking: A statement of expert consensus for purposes of educational assessment and instruction. Research findings and recommendations*. <https://eric.ed.gov/?id=ED315423>
- Field, A.** (2024). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics*. Sage Publications Limited. <https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=83L2EAAAQBAJ>
- Fredricks, J. A., Blumenfeld, P. C., & Paris, A. H.** (2004). School engagement: Potential of the concept, state of the evidence. *Review of Educational Research*, 74(1), 59–109.
- Fuchs, L. S., Schumacher, R. F., Long, J., Namkung, J., Malone, A. S., Wang, A., Hamlett, C. L., Jordan, N. C., Siegler, R. S., & Changas, P.** (2016). Effects of intervention to improve at-risk fourth graders' understanding, calculations, and word problems with fractions. *The Elementary School Journal*, 116(4), 625–651. <https://doi.org/10.1086/686303>
- Fugate, J. M. B., Macrine, S. L., & Cipriano, C.** (2019). The role of embodied cognition for transforming learning. *International Journal of School & Educational Psychology*, 7(4), 274–288.
- Fuller, F. F., & Manning, B. A.** (1973). Self-confrontation reviewed: A conceptualization for video playback in teacher education. *Review of Educational Research*, 43(4), 469–528. <https://doi.org/10.3102/00346543043004469>
- Gargrish, S., Mantri, A., & Kaur, D. P.** (2022). Evaluation of memory retention among students using augmented reality based geometry learning assistant. *Education and Information Technologies*, 27(9), 12891–12912. <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11147-9>
- Gauthier, A., Porayska-Pomsta, K., Mayer, S., Dumontheil, I., Farran, E. K., Bell, D., Mareschal, D., & UnLocke Team.** (2022). Redesigning learning games for different learning contexts: Applying a serious game design framework to redesign Stop & Think. *International Journal of Child-Computer Interaction*, 33, 100503.
- Gecu-Parmaksiz, Z., & Delialioglu, O.** (2019). Augmented reality-based virtual manipulatives versus physical manipulatives for teaching geometric shapes to preschool children. *British Journal of Educational Technology*, 50(6), 3376–3390. <https://doi.org/10.1111/bjet.12740>
- Gog, T. van, Paas, F., & Sweller, J.** (2010). Cognitive load theory: Advances in research on worked examples, animations, and cognitive load measurement. *Educational Psychology Review*, 22(4), 375–378. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9145-4>
- Gresalfi, M. S., Rittle-Johnson, B., Loehr, A., & Nichols, I.** (2018). Design matters: Explorations of content and design in fraction games. *Educational Technology Research and Development*, 66(3), 579–596. <https://doi.org/10.1007/s11423-017-9557-7>
- Hanid, M. F. A., Mohamad Said, M. N. H., Yahaya, N., & Abdullah, Z.** (2022). The elements of computational thinking in learning geometry by using augmented reality application. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM)*, 16(02), 28–41. <https://doi.org/10.3991/ijim.v16i02.27295>
- Hannafin, M., Land, S., & Oliver, K.** (2013). Open learning environments: Foundations, methods, and models. In *Instructional-design theories and models* (pp. 115–140). Routledge.
- Hattie, J.** (2008). *Visible learning: A synthesis of over 800 meta-analyses relating to achievement*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203887332>
- Hidi, S., & Renninger, K. A.** (2006). The four-phase model of interest development. *Educational Psychologist*, 41(2), 111–127.

- Holden, C. L., & Sykes, J. M.** (2011). Leveraging mobile games for place-based language learning. *International Journal of Game-Based Learning (IJGBL)*, 1(2), 1–18. <https://doi.org/10.4018/ijgbl.2011040101>
- Holmes, W., Bialik, M., & Fadel, C.** (2019). *Artificial intelligence in education: Promises and implications for teaching and learning* (1st ed.). Center for Curriculum Redesign. <https://circls.org/primers/artificial-intelligence-in-education-promises-and-implications-for-teaching-and-learning>
- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H., & van de Weijer, J.** (2011). *Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures*. OUP Oxford.
- Hughes, C. E., Stapleton, C. B., Hughes, D. E., & Smith, E. M.** (2005). Mixed reality in education, entertainment, and training. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 25(6), 24–30.
- Hung, C.-M., Huang, I., & Hwang, G.-J.** (2014). Effects of digital game-based learning on students' self-efficacy, motivation, anxiety, and achievements in learning mathematics. *Journal of Computers in Education*, 1(2–3), 151–166. <https://doi.org/10.1007/s40692-014-0008-8>
- Ibáñez, M.-B., & Delgado-Kloos, C.** (2018). Augmented reality for STEM learning: A systematic review. *Computers & Education*, 123, 109–123.
- Jabar, J. M., Hidayat, R., Samat, N. A., Rohizan, M. F. H., Rosdin, N. A., Salim, N., & Norazhar, S. A.** (2022). Augmented reality learning in mathematics education: A systematic literature review. *Journal of Higher Education Theory and Practice*, 22(15). <https://articlearchives.co/index.php/JHETP/article/view/5335>
- Jenkins, H.** (2004). Game design as narrative architecture. *Computer*, 44(3), 118–130.
- Johnson, D. W., & Johnson, R. T.** (1987). *Learning together and alone: Cooperative, competitive, and individualistic learning*. Prentice-Hall, Inc. <https://psycnet.apa.org/record/1986-98283-000>
- Johnson-Glenberg, M. C., & Megowan-Romanowicz, C.** (2017). Embodied science and mixed reality: How gesture and motion capture affect physics education. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 2(1), 24. <https://doi.org/10.1186/s41235-017-0060-9>
- Jordan, N. C., Hansen, N., Fuchs, L. S., Siegler, R. S., Gersten, R., & Micklos, D.** (2013). Developmental predictors of fraction concepts and procedures. *Journal of Experimental Child Psychology*, 116(1), 45–58.
- Kalenine, S., Pinet, L., & Gentaz, E.** (2011). The visual and visuo-haptic exploration of geometrical shapes increases their recognition in preschoolers. *International Journal of Behavioral Development*, 35(1), 18–26. <https://doi.org/10.1177/0165025410367443>
- Kang, S., Shokeen, E., Byrne, V. L., Norooz, L., Bonsignore, E., Williams-Pierce, C., & Froehlich, J. E.** (2020). ARMath: Augmenting everyday life with math learning. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1–15). ACM. <https://doi.org/10.1145/3313831.3376252>
- Kashdan, T. B., & Fincham, F. D.** (2004). Facilitating curiosity: A social and self-regulatory perspective for scientifically based interventions. In *Positive psychology in practice* (pp. 482–503).
- Kaufmann, H.** (2004). Geometry education with augmented reality [PhD thesis]. https://www.academia.edu/download/41909056/Geometry_education_with_augmented_realit20160202-30232-gui49.pdf
- Kazanidis, I., Palaigeorgiou, G., & Bazinas, C.** (2018). Dynamic interactive number lines for fraction learning in a mixed reality environment. In *2018 South-Eastern European Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Society Media Conference (SEEDA_CECNSM)* (pp. 1–5). IEEE.
- Kiili, K.** (2005). Digital game-based learning: Towards an experiential gaming model. *The Internet and Higher Education*, 8(1), 13–24.
- Kolb, D. A.** (2014). *Experiential learning: Experience as the source of learning and development*. FT Press. <https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=jpbeBQAAQBAJ>
- Koster, R.** (2013). *Theory of fun for game design*. O'Reilly Media, Inc.
- Kotranza, A., Lind, D. S., Pugh, C. M., & Lok, B.** (2009). Real-time in-situ visual feedback of task performance in mixed environments for learning joint psychomotor-cognitive tasks. In *2009 8th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality* (pp. 125–134). IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5336485/>

- Kretschmann, R.** (2015). Physical education teachers' subjective theories about integrating information and communication technology (ICT) into physical education. *Turkish Online Journal of Educational Technology - TOJET*, 14(1), 68–96.
- Laurillard, D.** (2012). *Teaching as a design science: Building pedagogical patterns for learning and technology*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203125083>
- Le Bulletin officiel de l'éducation nationale, de la jeunesse et des sports.** (s. d.). Ministère de l'Éducation Nationale et de la Jeunesse. (Consulté le 21 avril 2024). <https://www.education.gouv.fr/le-bulletin-officiel-de-l-education-nationale-de-la-jeunesse-et-des-sports-89558>
- Learn, How People.** (2000). Brain, mind, experience, and school. *Committee on Developments in the Science of Learning*.
- Lemoine, B.** (2022). Conception et génération d'activités d'apprentissage ludiques adaptables. In *9ième Rencontres Jeunes Chercheurs EIAH 2022. Actes de la conférence RJC EIAH 2022*. Lille, France. <https://hal.science/hal-03711644>
- Lin, H.-C. K., Hsieh, M.-C., Wang, C.-H., Sie, Z.-Y., & Chang, S.-H.** (2011). Establishment and usability evaluation of an interactive AR learning system on conservation of fish. *Turkish Online Journal of Educational Technology-TOJET*, 10(4), 181–187.
- Collins, L. M.** (2006). Analysis of longitudinal data: The integration of theoretical model, temporal design, and statistical model. *Annual Review of Psychology*, 57, 505–528. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.57.102904.190146>
- Liou, H.-H., Yang, S. J. H., Chen, S. Y., & Tarng, W.** (2017). The influences of the 2D image-based augmented reality and virtual reality on student learning. *Journal of Educational Technology & Society*, 20(3), 110–121.
- Luckin, R.** (2017). Towards artificial intelligence-based assessment systems. *Nature Human Behaviour*, 1(3), 1–3.
- Makransky, G., & Lilleholt, L.** (2018). A structural equation modeling investigation of the emotional value of immersive virtual reality in education. *Educational Technology Research and Development*, 66(5), 1141–1164. <https://doi.org/10.1007/s11423-018-9581-2>
- Makransky, G., Terkildsen, T. S., & Mayer, R. E.** (2019). Adding immersive virtual reality to a science lab simulation causes more presence but less learning. *Learning and Instruction*, 60, 225–236. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2017.12.007>
- Malone, T. W., & Lepper, M. R.** (2021). Making learning fun: A taxonomy of intrinsic motivations for learning. In *Aptitude, learning, and instruction* (pp. 223–254). Routledge.
- Maniam, P., Schnell, P., Dan, L., Portelli, R., Erolin, C., Mountain, R., & Wilkinson, T.** (2020). Exploration of temporal bone anatomy using mixed reality (HoloLens): Development of a mixed reality anatomy teaching resource prototype. *Journal of Visual Communication in Medicine*, 43(1), 17–26. <https://doi.org/10.1080/17453054.2019.1671813>
- Marfisi-Schottman, I.** (2012). *Méthodologie, modèles et outils pour la conception de Learning Games* [Thèse de doctorat, INSA de Lyon]. <https://theses.hal.science/tel-00952892/>
- Marfisi-Schottman, I.** (2023). *Designing serious games, mobile learning and extended reality applications for and with teachers* [Thèse de doctorat, Le Mans Université]. <https://hal.science/tel-04302536/>
- Marfisi-Schottman, I., George, S., & Tarpin-Bernard, F.** (2010). Tools and methods for efficiently designing serious games. In *Proceedings of the 4th European Conference on Games Based Learning (ECGBL)* (pp. 226–234).
- Marfisi-Schottman, I., Touel, S., & George, S.** (2021). Designing a mixed reality extension for an educational board game on fractions. *International Journal of Virtual Reality*, 21(1).
- Marichal, S., Rosales, A., Gonzalez Perilli, F., Pires, A. C., Bakala, E., Sansone, G., & Blat, J.** (2017). Ceta: Designing mixed-reality tangible interaction to enhance mathematical learning. In *Proceedings of the 19th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services* (pp. 1–13). <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3098279.3098536>
- Mayer, R. E.** (2002). Rote versus meaningful learning. *Theory Into Practice*, 41(4), 226–232. https://doi.org/10.1207/s15430421tip4104_4
- Mayer, R. E.** (2005). Cognitive theory of multimedia learning. In *The Cambridge handbook of multimedia learning* (pp. 31–48).
- McKenney, S., & Reeves, T.** (2018). *Conducting educational design research*. Routledge. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9781315105642>

- Mercier, P.** (2004). *Le passage de l'école primaire à l'école secondaire dans l'enseignement et l'apprentissage des fractions* [Mémoire ou thèse]. Université Laval.
- Merrill, M. D.** (2012). *First principles of instruction*. John Wiley & Sons.
- Mikułowski, D., & Brzostek-Pawłowska, J.** (2020). Multi-sensual augmented reality in interactive accessible math tutoring system for flipped classroom. In V. Kumar & C. Troussas (Eds.), *Intelligent tutoring systems* (Vol. 12149, pp. 1–10). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49663-0_1
- Milgram, P., & Kishino, F.** (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 77(12), 1321–1329.
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & The PRISMA Group.** (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLOS Medicine*, 6(7), e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Moreno, R., & Mayer, R. E.** (2007). Interactive multimodal learning environments: Special issue on interactive learning environments: Contemporary issues and trends. *Educational Psychology Review*, 19(3), 309–326. <https://doi.org/10.1007/s10648-007-9047-2>
- Nadzeri, M. B., Musa, M., Chew, C. M., & Ismail, I. M.** (2023). Teachers' perspectives on the development of augmented reality application in geometry topic for elementary school. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM)*, 17(15), 38–52. <https://doi.org/10.3991/ijim.v17i15.40097>
- Nevarini, M., Agustiani, R., & Zahra, A.** (2023). Application of augmented reality in geometry learning in increasing student learning motivation. *Journal of Curriculum and Pedagogic Studies (JCPS)*, 2(1), 40–50.
- Nicho, M.** (2017). Modelling serious games for enhancing end user cyber security awareness. *IADIS International Journal of Computer Science and Information Systems*, 15(2), 91–106.
- Norman, D.** (2013). *The design of everyday things: Revised and expanded edition*. Basic Books.
- Orliac, C. C.** (2013). *Modèles et outils pour la conception de Learning Games en Réalité Mixte* [Thèse de doctorat, INSA de Lyon]. <https://theses.hal.science/tel-00952892/>
- Palaigeorgiou, G., Tsolopani, X., Liakou, S., & Lemonidis, C.** (2018). Movable, resizable and dynamic number lines for fraction learning in a mixed reality environment. In *International Conference on Interactive Collaborative Learning* (pp. 118–129). Springer.
- Papert, S.** (1980). *Mindstorms: Children, computers, and powerful ideas*. Basic Books, Inc.
- Paquette, G., Crevier, F., & Aubin, C.** (1997). Méthode d'ingénierie d'un système d'apprentissage (MISA). *Revue informations in cognito*, 8, 37–52.
- Pelay, N.** (2011). *Jeu et apprentissages mathématiques: Élaboration du concept de contrat didactique et ludique en contexte d'animation scientifique* [Thèse de doctorat, Université Claude Bernard-Lyon I].
- Pelay, N.** (2019). L'atelier des potions: Un jeu de société didactique et ludique pour apprendre les fractions. *Revue de Mathématiques Pour l'école*, 231, 6–11.
- Pintrich, P. R.** (2000). The role of goal orientation in self-regulated learning. In *Handbook of self-regulation* (pp. 451–502). Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780121098902500433>
- Post, T., Behr, M., Harel, G., & Lesh, R.** (1993). Rational numbers: Towards a semantic analysis—emphasis on the operator construct. In *Rational numbers: An integration of research* (p. 13).
- Praharaj, S.** (2022). *Measuring the unmeasurable?: Towards automatic co-located collaboration analytics*. SIKS Dissertation Series. Netherlands: Open Universiteit.
- Putri, A., Wahyuningsih, T., Ananti, N. S., Wicaksono, A., Gharitza, Z. S., As'ari, A. R., Purwanto, P., & Osman, S.** (2023). EUCLIDA: 3D augmented reality card for learning numeracy about geometry. *TEM Journal*, 12(2), 1174.
- Radu, I.** (2014). Augmented reality in education: A meta-review and cross-media analysis. *Personal and Ubiquitous Computing*, 18(6), 1533–1543. <https://doi.org/10.1007/s00779-013-0747-y>
- Radu, I., McCarthy, B., & Kao, Y.** (2016). Discovering educational augmented reality math applications by prototyping with elementary-school teachers. In *2016 IEEE Virtual Reality (VR)* (pp. 271–272). IEEE.
- Ramirez, G., Gunderson, E. A., Levine, S. C., & Beilock, S. L.** (2013). Math anxiety, working memory, and math achievement in early elementary school. *Journal of Cognition and Development*, 14(2), 187–202.

- Rebollo, C., Remolar, I., Rossano, V., & Lanzilotti, R.** (2022). Multimedia augmented reality game for learning math. *Multimedia Tools and Applications*, 81(11), 14851–14868. <https://doi.org/10.1007/s11042-021-10821-3>
- Reeve, J.** (2006). Teachers as facilitators: What autonomy-supportive teachers do and why their students benefit. *The Elementary School Journal*, 106(3), 225–236.
- Roedavan, R., Pudjoatmodjo, B., Siradj, Y., Salam, S., & Hardianti, B. O.** (2021). Serious game development model based on the game-based learning foundation. *Journal of ICT Research & Applications*, 15(3). <https://pdfs.semanticscholar.org/d016/e47b20f097180e8a25664dd79d1ab5948038.pdf>
- Rohrer, D., & Pashler, H.** (2010). Recent research on human learning challenges conventional instructional strategies. *Educational Researcher*, 39(5), 406–412.
- Rouche, N.** (1998). *Pourquoi ont-ils inventé les fractions ?* Ellipses.
- Rutten, N., Van Joolingen, W. R., & Van Der Veen, J. T.** (2012). The learning effects of computer simulations in science education. *Computers & Education*, 58(1), 136–153.
- Ryan, R. M., & Deci, E. L.** (2000). Intrinsic and extrinsic motivations: Classic definitions and new directions. *Contemporary Educational Psychology*, 25(1), 54–67.
- Salen Tekinbas, K., & Zimmerman, E.** (2003). *Rules of play: Game design fundamentals*. <https://stars.library.ucf.edu/etextbooks/612/>
- Sarama, J., & Clements, D. H.** (2009). *Early childhood mathematics education research: Learning trajectories for young children*. Routledge. <https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=Z5KOAqAAQBAJ>
- Schraw, G.** (2006). Knowledge: Structures and processes. In *Handbook of educational psychology* (Vol. 2, pp. 245–260).
- Shaghaghian, Z., Burte, H., Song, D., & Yan, W.** (2022). Learning spatial transformations and their math representations through embodied learning in augmented reality. In P. Zaphiris & A. Ioannou (Eds.), *Learning and collaboration technologies. Novel technological environments* (Vol. 13329, pp. 112–128). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-05675-8_10
- Sharpe, H., Rogers, Y., & Preece, J.** (2007). Interaction design: Beyond human-computer interaction (2nd ed). In H. Sharpe, Y. Rogers, & J. Preece.
- Sharples, M., Corlett, D., & Westmancott, O.** (2002). The design and implementation of a mobile learning resource. *Personal and Ubiquitous Computing*, 6, 220–234.
- Shute, V., & Towle, B.** (2003). Adaptive e-learning. In *Aptitude*. Routledge.
- Siegler, R. S., & Pyke, A. A.** (2013). Developmental and individual differences in understanding of fractions. *Developmental Psychology*, 49(10), 1994–2004. <https://doi.org/10.1037/a0031200>
- Slavin, R. E.** (2002). Evidence-based education policies: Transforming educational practice and research. *Educational Researcher*, 31(7), 15–21.
- Squire, K.** (2006). From content to context: Videogames as designed experience. *Educational Researcher*, 35(8), 19–29. <https://doi.org/10.3102/0013189X035008019>
- Süss, D., Lampert, C., Wijnen, C. W., & Wolf, A.** (2019). *Ergebnisbericht zur MIKE-Studie 2019*. MIKE.
- Tabachnick, B. G., Fidell, L. S., & Ullman, J. B.** (2013). *Using multivariate statistics* (Vol. 6). Pearson Boston, MA. <https://www.pearsonhighered.com/assets/preface/0/1/3/4/0134790545.pdf>
- Tomlinson, C. A.** (2014). *The differentiated classroom: Responding to the needs of all learners*. ASCD.
- Uriarte-Portillo, A., Zatarain-Cabada, R., Barrón-Estrada, M. L., Ibañez, M. B., & González-Barrón, L.-M.** (2023). Intelligent augmented reality for learning geometry. *Information*, 14(4), 245. <https://doi.org/10.3390/info14040245>
- Van Krevelen, D. W. F., & Poelman, R.** (2010). A survey of augmented reality technologies, applications and limitations. *International Journal of Virtual Reality*, 9(2), 1–20.
- VanLehn, K.** (2006). The behavior of tutoring systems. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 16(3), 227–265.
- Varela, F. J., Thompson, E., & Rosch, E.** (1991). *The embodied mind: Cognitive science and human experience*. The MIT Press.
- Veale, M., & Binns, R.** (2017). Fairer machine learning in the real world: Mitigating discrimination without collecting sensitive data. *Big Data & Society*, 4(2), 2053951717743530. <https://doi.org/10.1177/2053951717743530>

- Volioti, C., Orovas, C., Sapounidis, T., Trachanas, G., & Keramopoulos, E.** (2023). Augmented reality in primary education: An active learning approach in mathematics. *Computers*, 12(10), 207. <https://doi.org/10.3390/computers12100207>
- Vygotsky, L. S., & Cole, M.** (1978). *Mind in society: Development of higher psychological processes*. Harvard University Press.
- Wang, F., & Hannafin, M. J.** (2005). Design-based research and technology-enhanced learning environments. *Educational Technology Research and Development*, 53(4), 5–23. <https://doi.org/10.1007/BF02504682>
- Watts, T. W., Duncan, G. J., Siegler, R. S., & Davis-Kean, P. E.** (2014). What's past is prologue: Relations between early mathematics knowledge and high school achievement. *Educational Researcher*, 43(7), 352–360. <https://doi.org/10.3102/0013189X14553660>
- Weng, C., Rathinasabapathi, A., Weng, A., & Zagita, C.** (2019). Mixed reality in science education as a learning support: A revitalized science book. *Journal of Educational Computing Research*, 57(3), 777–807. <https://doi.org/10.1177/0735633118757017>
- William, D.** (2011). *Embedded formative assessment*. Solution Tree Press.
- Willingham, D. T.** (2021). *Why don't students like school?: A cognitive scientist answers questions about how the mind works and what it means for the classroom*. John Wiley & Sons.
- Wilson, M.** (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(4), 625–636. <https://doi.org/10.3758/BF03196322>
- Woolf, B. P.** (2010). *Building intelligent interactive tutors: Student-centered strategies for revolutionizing e-learning*. Morgan Kaufmann. https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=MnrUj3J_VuEC
- Yanuarto, W. N., & Iqbal, A. M.** (2022). The augmented reality learning media to improve mathematical spatial ability in geometry concept. *Edumatica: Jurnal Pendidikan Matematika*, 12(01), 30–40. <https://doi.org/10.22437/edumatica.v12i01.17615>
- Yeager, D. S., & Dweck, C. S.** (2012). Mindsets that promote resilience: When students believe that personal characteristics can be developed. *Educational Psychologist*, 47(4), 302–314. <https://doi.org/10.1080/00461520.2012.722805>
- Zawacki-Richter, O., Marín, V. I., Bond, M., & Gouverneur, F.** (2019). Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education – Where are the educators? *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 16(1), 39. <https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0>
- Zimmerman, B. J.** (2002). Becoming a self-regulated learner: An overview. *Theory Into Practice*, 41(2), 64–70. https://doi.org/10.1207/s15430421tip4102_2
- Zimmermann, R., Staab, M., Nasser, M., & Brandtner, P.** (2024). Leveraging large language models for literature review tasks – A case study using ChatGPT. In T. Guarda, F. Portela, & J. M. Diaz-Nafria (Eds.), *Advanced research in technologies, information, innovation and sustainability* (pp. 313–323). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48858-0_25
- Zins, J. E.** (2004). *Building academic success on social and emotional learning: What does the research say?* Teachers College Press. https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=MuDGDHCb_iwC
- Zorrilla, M. E., & Álvarez, E.** (2008). MATEP: Monitoring and analysis tool for e-learning platforms. In *2008 Eighth IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies* (pp. 611–613). IEEE.

Annexes

LISTE DES ANNEXES

Déroulée du jeu <i>Le Chaudron Magique</i>	131
Prompt : Etat de l'art	153
Questionnaires donnés aux enseignants.....	156
Guide d'utilisation Pour l'application <i>Le Chaudron Magique</i>	160

Déroulée du jeu Le Chaudron Magique

HISTOIRE - LA RENCONTRE AVEC EKKO

L'enfant rencontre Ekko le gentil fantôme. Celui-ci va lui expliquer comment fonctionne le chaudron magique et son magimètre en lui faisant créer 4 animaux. Il l'accompagne à travers des dialogues l'enfant tout au long de sa progression dans le jeu.

L'objectif pédagogique de cette première partie est d'aider l'enfant à prendre en main la droite graduée (le magimètre) et de comprendre qu'il y a une correspondance entre les pièces posées dans le chaudron et leur valeur qui s'affiche sur la droite en Réalité Augmentée.

Dialogue du jeu :

EKKO :

(Un peu perdu) Oh... bonjour ?

...

Oh, je vois que tu as su activer le chaudron magique...

(Long silence pendant lequel Ekko ne fait rien)

(S'écrit) HEIN ?! M-MAIS ! LE CHAUDRON MAGIQUE FONCTIONNE À NOUVEAU !

(Très surpris, puisque le chaudron n'a pas marché depuis des années)

YOUPI ! Oh, bienvenue à toi !

(Il saute et danse)

Je m'appelle Ekko, et je garde ce chaudron depuis au moins 1000 ans déjà ! Il m'a été confié par ma maîtresse. C'était une grande magicienne ! Elle a créé ce chaudron et il permet de donner la vie à toutes sortes d'animaux fantastiques !

...

Mais... Pour l'utiliser il faut avoir un cœur pur... Et je n'ai rencontré personne qui en possède un depuis la disparition de ma maîtresse...

(Soudainement triste en se souvenant d'elle)

Mais toi c'est différent ! Je sens la magie en toi, et en plus tu as une bonne bouille. Je vais t'apprendre à utiliser le chaudron.

(Ekko présente le chaudron magique à l'enfant ainsi que son fonctionnement)

Voici le chaudron magique. Pour l'utiliser tu devras placer des ingrédients dedans. Il y a 4 types d'ingrédients : des morceaux d'araignée, de serpent, de grenouille et de raie.

(L'écran se grise, seuls Ekko et le chaudron restent normaux)

Et voici son magimètre, un outil indispensable pour créer tes potions parce qu'il indique la quantité et le type d'ingrédient dans le chaudron.





(Le chaudron se grise, le magimètre revient à la normale

Si tu veux que le magimètre fonctionne correctement, tu dois :

Utiliser un seul type d'ingrédient à la fois

Ne pas mettre les pièces les unes sur les autres

Utiliser le moins de pièces possibles

(L'écran revient à la normale, Ekko propose à l'enfant de faire ses premiers animaux)

Maintenant découvrons ensemble le pouvoir du chaudron. On va commencer par faire un oiseau ! C'est joli les oiseaux ! Ma maîtresse en faisait de toutes les couleurs.

(Des formes en RA se dessinent à l'intérieur du chaudron)

Trouve les ingrédients correspondants aux formes dessinées dans le chaudron et place-les au même endroit.

Recette de l'oiseau :

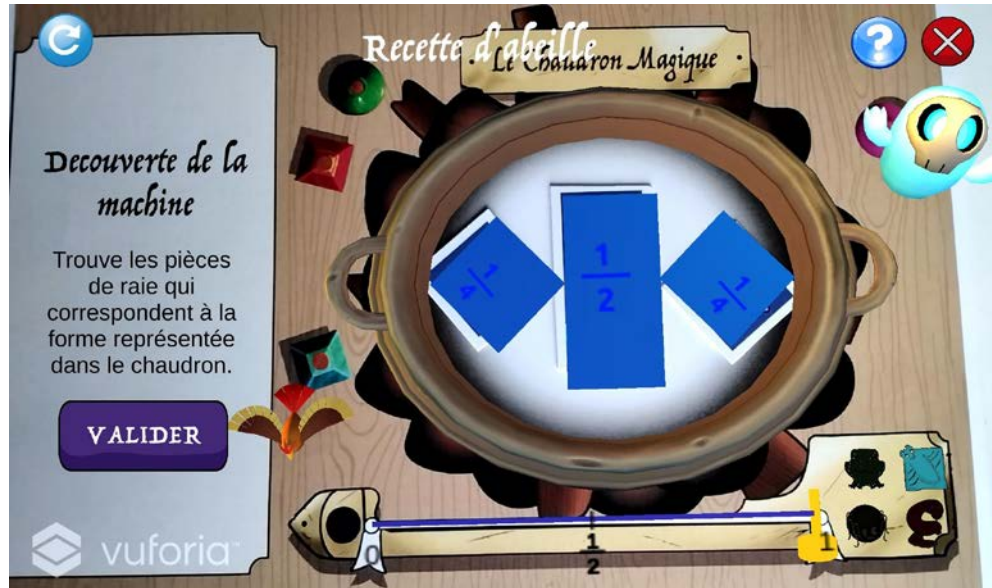


(Après que l'oiseau ait été créé avec succès : l'enfant fait le premier animal qui va vers la droite de l'écran et volette autour du conseiller)

(Une fois l'animation finie)

Maintenant, tu peux tenter une recette plus piquante : une abeille !

Recette de l'abeille :



(Après que l'enfant ait réussi l'abeille qui s'en va vers la gauche et volette autour d'une potion)

Woah, elle est magnifique cette petite abeille ! Tu te débrouilles très bien...
Faisons un chat maintenant, j'adore quand ils ronronnent.

Recette du chat :



(Après que l'enfant ait réussi le chat qui va sur la droite de l'écran et fait sa toilette ou s'assoie en semblant s'ennuyer)

Oh... Ce chat est très bien réussi, mais il a l'air de s'ennuyer. Peut-être qu'il aimerait un ami ? Faisons un chien pour lui tenir compagnie !

Recette du chien :



(L'enfant fait le chien qui rejoint la poule et le chat.)

HISTOIRE - L'ARRIVEE D'ARKAN

Arkan, le méchant diablequin est jaloux du fait que l'enfant sache utiliser le chaudron alors qu'il n'y arrive pas. Il décide alors de jeter un sort sur le chaudron qui va bloquer le curseur du magimètre.

Dialogues du jeu :

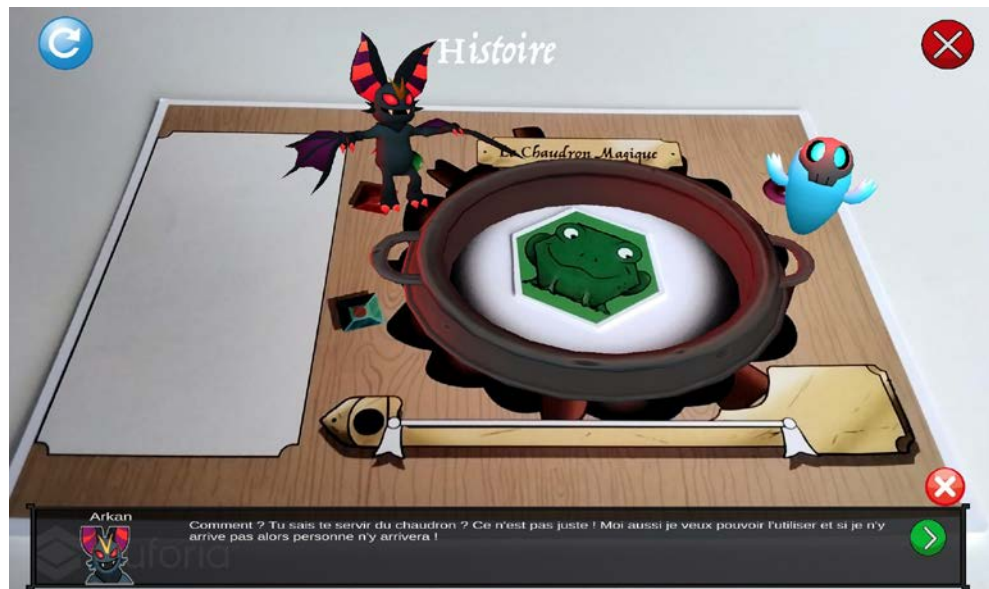
L'atmosphère s'assombrit (ou animation d'orage) et on entend un ricanement. Le chat et le chien prennent la fuite vers le bord droit, apeurés. Arkan fait son entrée.

ARKAN



Comment osez-vous vous servir de MON chaudron ? Il est à moi et à moi seul !

Comment ? Tu as réussi à te servir du chaudron ? Ce n'est pas juste ! Moi aussi je veux pouvoir l'utiliser et si je n'y arrive pas alors personne n'y arrivera !



(Il jette un premier sort)

Voyons voir si tu arrives à te servir du chaudron maintenant ! Hahahaha !

(Il disparaît dans un nuage de fumée, après avoir jeté un sort, mais l'atmosphère reste sombre : le chaudron ne fonctionne plus)



EKKO

C'était Arkan le diablequin. Il a volé le chaudron il y a quelques années. J'ai eu beau lui expliquer comment faire des potions, il n'y est jamais arrivé. Et ça l'énerve

Mais entre nous, je suis bien content qu'il n'arrive pas à utiliser le chaudron. Par contre, il maîtrise à la perfection les sorts de destructions et de carnage comme tu peux le voir.

EXERCICES DE TYPE 1

Avec l'aide d'Ekko, l'enfant essaie de rééquilibrer le magimètre en plaçant le curseur où il devrait être, en s'aidant des ingrédients. Il va effectuer 6 activités de type 1 : placer une fraction sur la droite graduée avec l'aide des pièces. La valeur des pièces et leurs équivalences sur la droite graduée sont affichées en Réalité Augmentée.

Dialogues du jeu :

EKKO



Le sort d'Arkan a bloqué le curseur du magimètre. Le curseur ne peut plus se déplacer correctement pour indiquer la quantité d'ingrédients qu'il y a dans le chaudron.

Il va falloir que tu le remettes au bon endroit jusqu'à ce que le sort soit levé.

Mets les ingrédients dans le chaudron pour t'aider et ensuite, utilise les flèches pour déplacer le curseur.

De cette façon, la position du curseur correspond au contenu du chaudron !

J'ai confiance en toi, tu peux lever le sort. Si tu as besoin d'aide, je suis là !

(L'enfant fait les exercices de type 1, le fantôme peut réagir de temps en temps uniquement oralement : Bravo ! /Pas mal du tout ! /Bien joué ! ou Ah, raté... /Essaie encore, tu y es presque !)

Exercice 1.A :



Pour certains exercices difficiles, Ekko propose une aide à l'enfant, pour le débloquent sur des problématiques qu'il ne sait pas forcément résoudre.

Aide Ekko : "Clique sur les flèches jaunes pour placer le curseur au bon endroit"

Exercice 1.B :



Ekko ne propose pas d'aide pour cet exercice.

Exercice 1.C :



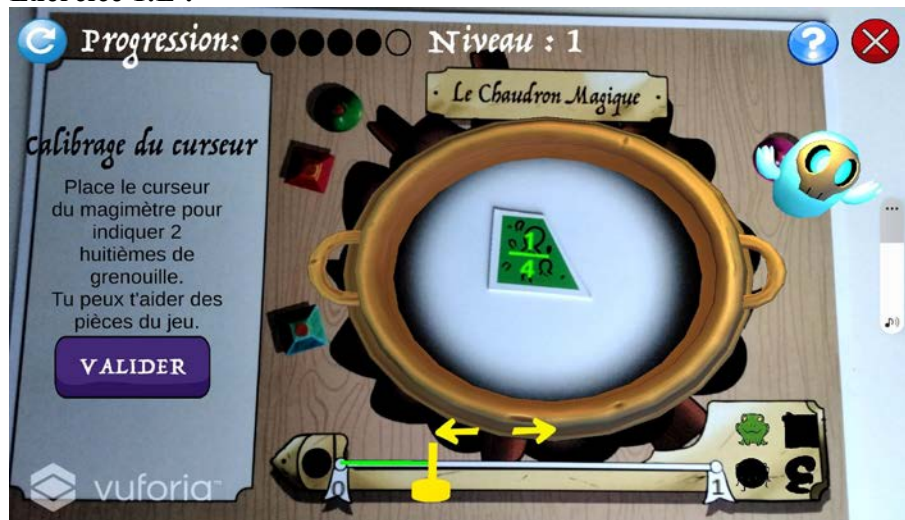
Ekko ne propose pas d'aide pour cet exercice.

Exercice 1.D :



Aide Ekko : “Tu n’as pas assez de quarts, mais tu peux utiliser d’autres pièces.”

Exercice 1.E :



Aide Ekko : “Il n’y a pas de grenouille partagée en 8 parts égales, c’est-à-dire en huitième. Trouve un autre partage qui peut correspondre.”

Exercice 1.F :



Aide Ekko : “Dans 4/3, il y a déjà une araignée entière.”



HISTOIRE - LE SECOND SORT

Le sort est levé, mais Arkan revient aussitôt pour jeter un nouveau sort, encore plus puissant, qui bloque le curseur du magimètre mais aussi le chaudron. Le curseur ne fonctionne plus et il est maintenant impossible de mettre des ingrédients dans le chaudron pour s'aider...

Dialogues du jeu :

À la fin, une explosion se produit, le sort se lève et l'atmosphère redevient bonne.

EKKO

Bravo ! On a ré...

(Le “pouf” du diablotin qui vient d'apparaître, et l'atmosphère se dégrade au même moment)

ARKAN

Alors tu comptais t'en sortir comme ça ? C'est Ekko qui t'a aidé. J'en suis sûr !

La bouboule, toujours attachée à son chaudron depuis 1000 ans. Tu n'as pas mieux à faire ? Essayez donc avec ce mauvais sort là ! hahahaha

(Il jette un sort et disparaît alors que son rire résonne)

EKKO

Oh non ! Ce sort est encore plus puissant ! Le curseur est à nouveau bloqué et cette fois, tu ne peux plus mettre de pièces dans le chaudron.

EXERCICES DE TYPE 2

Ekko montre à l'enfant comment utiliser le découpeur pour découper la droite en part égale pour placer les fractions au bon endroit. L'enfant devra finir 6 exercices de ce type et toutes les découpes ne sont pas toujours disponibles. Les formes des pièces apparaissent en Réalité Augmentée dans le chaudron.

Dialogues du jeu :

EKKO

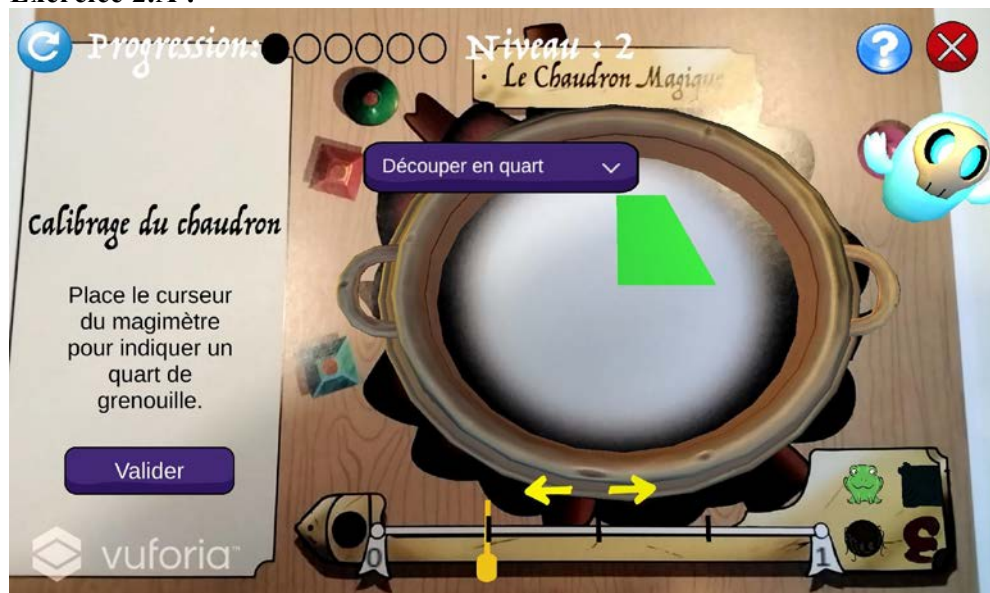
Mais ne t'en fais pas, tu peux utiliser le magimètre d'une autre manière, grâce au découpeur. C'est la molette ici.

(Toute l'interface se grise sauf le découpeur)

Le découpeur te permet de découper le magimètre en parts égales. Cela t'aidera pour placer le curseur au bon endroit.

Essayons de débloquer le curseur encore une fois. Place-le au bon endroit.

Exercice 2.A :



Aide Ekko : "Clique sur le découpeur, c'est le bouton violet en haut du chaudron."

Puis : "Clique sur les flèches jaunes pour placer le curseur au bon endroit."

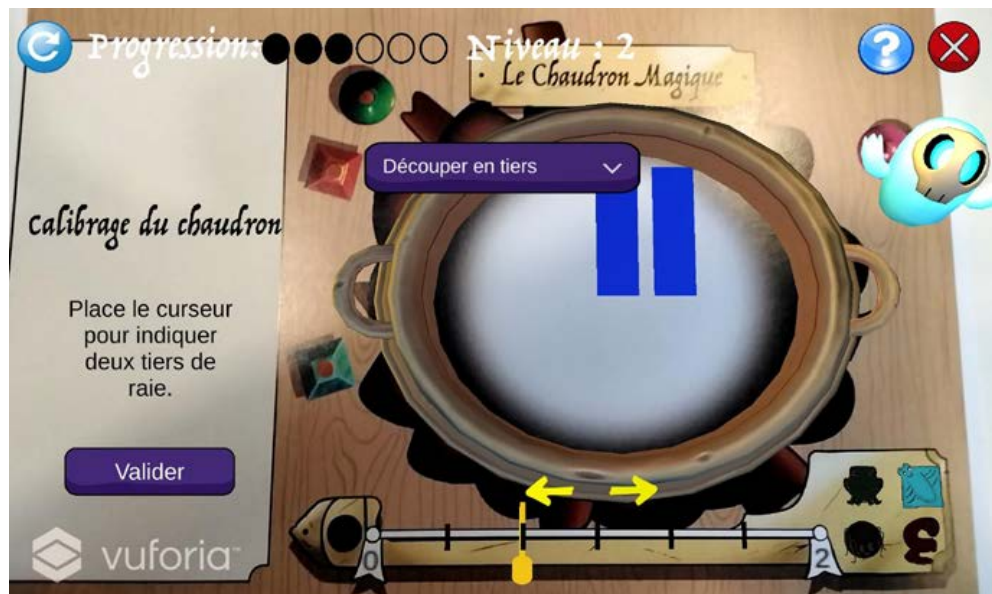
Et enfin : "Pour t'aider, commence par repérer la position du 1 sur le magimètre."

Exercice 2.B :



Ekko ne propose pas d'aide pour cet exercice.

Exercice 2.C :



Ekko ne propose pas d'aide pour cet exercice.

Exercice 2.D :



Aide Ekko : “Certains découpages ne sont pas disponibles.”
Puis : “Trouve un autre partage qui peut correspondre.”

Exercice 2.E :



Aide Ekko : “Observe les pièces du jeu pour t’aider.”
Puis : “Pour faire $\frac{1}{3}$ tu peux utiliser $\frac{2}{6}$.”

Exercice 2.F :



Aide Ekko : “Regarde bien le dénominateur.”
Puis : “Pour t’aider, commence par repérer la position du 1 sur le magimètre.”
(Une fois les exercices terminés, tout revient à la normale)

HISTOIRE - LE DERNIER SORT

Le sort est levé, mais Arkan revient pour jeter un ultime sort. Cette fois, le sort bloque la droite du magimètre.

Dialogues du jeu :

(Le diabolin revient et l’ambiance redevient triste)

ARKAN

Encore !! Cette fois-ci vous dépassez les bornes !!

J'ai un nouveau sort qui sera encore plus puissant !

(Arkan lance un dernier sort. Visuellement plus puissant, puis Arkan disparaît)

EKKO

Après un sort aussi puissant il ne pourra plus en lancer !! On en profitera pour l'amadouer. Je connais son point faible.

EXERCICES DE TYPE 3

L'enfant doit trouver les pièces correspondantes à la fraction indiquée sur le magimètre . Il doit faire 6 exercices de ce type pour lever le sort. La valeur des pièces est affichée en Réalité Augmentée pour l'aider.

Dialogues du jeu :

EKKO

Cette fois, le sort d'Arkan a carrément dérégulé le magimètre... Il n'indique plus la quantité d'ingrédients pour t'aider. Ça va être coton !

Tu dois ajouter au chaudron autant de pièces que nécessaire, pour correspondre à la valeur indiquée par le curseur.

Exercice 3.A :



Aide Ekko : "Trouve la bonne pièce et place-la dans le chaudron"

Puis : "Regarde le magimètre pour trouver le bon type d'ingrédient"

Exercice 3.B :



Aide Ekko : “Il n’y a pas assez de quart. Trouve un autre partage qui peut correspondre. Tu peux utiliser l’unité entière avec d’autres pièces.”

Exercice 3.C :



Ekko ne propose pas d’aide pour cet exercice.

Exercice 3.D :



Ekko ne propose pas d'aide pour cet exercice.

Exercice 3.E :



Aide Ekko : "Il n'y a pas assez de quart. Trouve un autre partage qui peut correspondre."

Exercice 3.F :



Aide Ekko : “Attention, le magimètre commence à 1”
Puis : “Une unité correspond à 4/4”

HISTOIRE - LE DEVOUEMENT

Le sort est levé et Ekko propose à l’enfant de vite utiliser les pouvoirs du chaudron pour faire un ami chauve-souris pour Arkan. Dans un premier temps, Arkan rejette la chauve-souris mais finit par voir qu’elle a un bon potentiel maléfique et décide de devenir son mentor. Il laisse le chaudron à l’enfant et à Ekko.

Dialogues du jeu :

EKKO

Excellent !! Arkan va revenir bientôt. Je te propose de profiter des pouvoirs du chaudron magique pour lui faire une surprise !

J’ai une idée !! Et si on lui faisait un ami ?

Fais la recette de la chauve-souris. Je pense que ça va lui plaire.

Recette de la chauve-souris :



(L'élève fait la recette de la chauve-souris. Une fois qu'il a fini, Arkan apparaît)

ARKAN

Attention, je vais finir par m'énerver !

(Il apparaît face à la chauve-souris et ils se regardent quelques secondes. La chauve-souris tourne autour d'Arkan, l'air toute contente)

Mais qu'est-ce qu'il me veut, cet asticot !

EKKO

On dirait son petit frère !

ARKAN

Arrête de me tourner autour, je ne veux pas te faire de câlins !

(L'oiseau passe dans le bas de l'écran à gauche, en train de manger des graines. La chauve-souris le voit et l'attaque ! L'oiseau s'envole aussi vite que possible)

Hahaha ! Mais ce n'est pas comme ça qu'on doit s'y prendre ! Je t'aime bien, finalement. Viens avec moi, je vais t'apprendre à lancer des sorts de congélation. On va bien rigoler !

EKKO

Aïe, pas sûr que l'on ait eu une bonne idée...

(Arkan et la chauve-souris s'en vont, l'un avec l'autre. Arkan finit par revenir tout seul)

ARKAN

Mppffff de toute manière ce chaudron ne m'a jamais vraiment intéressé. Prends-le, il est à toi puisque tu es si fort, de toute manière j'ai mieux à faire !
(Arkan repart)

EKKO

Bravo ! On a réussi à amadouer Arkan et le chaudron est à toi ! Tu vas pouvoir créer de nouveaux animaux fantastiques !

Tu as réellement des capacités exceptionnelles. Je suis content que le chaudron soit entre de bonnes mains.



Bravo !!!

Le Chaudron Magique
Un jeu développé par Plaisir Maths
et le Laboratoire d'Informatique de
l'Université du Mans



Prompt : Etat de l'art



CUSTOM GPT

Scholar GPT

En utilisant Scholar GPT pour faire l'état de l'art, voici les données en entrées utilisées pour avoir le résultat voulu :

Etape 1 :

Pour bonifier mon état de l'art du chapitre 2, j'aimerais stp fait moi des recherches d'article scientifiques en fonctions de :

année 2022 et plus. Voici les mots clés.

- (« teaching » OU « learning » OU « school »),
- ET (« math » OU « fraction » OU « geometry »),
- ET (« augmented reality » OU « mixed reality »).

Etape 2 :

Pour chaque article j'ai besoin de savoir :

ID, Nom du Projet, année, Type d'interaction, Rétroactions, Technologie utilisée, Matériel nécessaire, Âge cible, Domaine d'application, Objectifs pédagogiques. et à la fin la référence complète incluant le nom de l'auteur stp.

J'ai interrompu la recherche pour demander :

Etape 3 :

mets les en tableaux stp et les références en dehors du tableau !

Etape 4 :

très bien, il faut faire la même chose sur pleins d'autres articles en appliquant les règles suivantes :

des recherches d'article scientifiques en fonctions de :
année 2022 et plus. voici les mots clés.

- (« teaching » OU « learning » OU « school »),
- ET (« math » OU « fraction » OU « geometry »),
- ET (« augmented reality » OU « mixed reality »).

Etape 5 :

pourquoi t'arreter à 6 donne moi le maximum, et à la fin donne moi selon la méthode PRISMA, combien tu avais au début etc. jusqu'à arriver au chiffre à la fin. exe: n= ???, à n = 30, puis à n=8.

Etape 6 :

dans le tableau je veux avoir ID, Title, année, Authors, Type d'interaction, Rétroactions, Technologie utilisée, Matériel nécessaire, Âge cible, Domaine d'application, Objectifs pédagogiques, Link.

Etape 7 :
as-tu accès ou il faut que je t'aide ?

Etape 8, il a déterminé que des éléments pour 10 articles alors qu'il y'avait 20 :
accède à ceux que tu peux, et remplis les, et je vais t'aider avec ceux qui reste il
faut faire les 20 mon ami !

Etape 9 (j'ai fournis le doc complets pour chacun des articles):
pour le 1er le document est ci-joint, n'oublie pas de me mettre l'info en français !

Etape 10 (je l'entraîne à :

la partie interaction et rétroaction et âge cible ainsi que domaine d'application ne
sont pas bon.
entretiens et évaluations ne sont pas des types d'interaction avec la RA.
L'amélioration de la pensée n'est pas une rétroaction,
Elève de première année, au primaire, collège etc. précise.
Domaine d'application Mathématique : géométrie pas éducation.

Etape 11 :

Non, elles ne sont pas très juste et j'aimerais que tu rajoutes aux tableaux, si l'ap-
plication a été évalué et si oui sur combien de personne (dans la même colonne)

Etape 12 :
toute est bon il manque juste la partie rétroactions qui n'est pas bonne, la rétroac-
tion c'est les feedbacks que l'application donne à l'utilisateur pour l'aider ou le gui-
der ou le corriger !

Etape 13 :

Oui elle répond :), on fait la même chose pour le 2e article.

Pour le 2e état de l'art

Etape 1-Bis :
Je veux faire le même état de l'art mais pour des projets semblables à LEGADEE et
MIRLEGADEE qui présente un architecteur ou un modèle de conception de jeu sé-
rieux ou d'application. suis les mêmes étapes précédentes stp, et n'hésite pas à
me revenir si tu as des questions.

Etape 2-Bis :
Ne te limite pas à 2022, pas de date de début précise. En utilisant la méthode
PRISMA comme avant stp.

Etape 3-Bis :
La première recherche était très pertinente, reste dans le même contexte sans
l'année 2022, et inclus le maximum d'article, si tu trouves des modèles qui s'appli-
quent au RM précise le moi stp.

Etape 4-Bis :
Serious Game Development Model Based on the Game-Based Learning Foundation
et Redesigning learning games for different learning contexts: Applying a
serious game design framework to redesign Stop & Think et Enhancing Serious
Game Design: An ExpertReviewed, Stakeholder-Centred Framework sont pertinent,
essaye de trouver d'autres choses comme ça

Etape 5-Bis :

Oui mais je veux dire maintenant il faut trouver d'autre article pertinent semblable à LEGADEE et MIRLEGADEE et Serious Game Development Model Based on the Game-Based Learning Foundation et Redesigning learning games for different learning contexts: Applying a serious game design framework to redesign Stop & Think et Enhancing Serious Game Design: An ExpertReviewed, Stakeholder-Centred Framework sont pertinent

Questionnaires donnés aux enseignants

Questionnaires enseignants

Le sondage prendra environ 5 minutes.

* Obligatoire

1. Inscrivez vos informations svp (Nom, prénom, Ecole) *

2. Est-ce que le chaudron magique permet aux élèves de s'améliorer dans la compréhension des fractions ? *

Non, Pas du tout ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ Oui, Parfaitement

3. Est-ce que le chaudron magique permet aux élèves de s'améliorer dans le positionnement des fractions inférieures à 1 sur une droite numérique ? *

Non, Pas du tout ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ Oui, Parfaitement

4. Est-ce que le chaudron magique permet aux élèves de s'améliorer dans le positionnement des fractions supérieures à 1 sur une droite numérique ? *

Non, Pas du tout ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ Oui, Parfaitement

5. Argumentez vos réponses 2, 3 et 4 *

6. Est-ce que le chaudron magique rend les élèves plus autonomes ? *

Non, Pas du tout ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ Oui, Parfaitement

7. Argumentez votre réponse à la question 6 *

8. Est-ce que le chaudron magique accroît la motivation et l'engagement des élèves ? *

Pas du tout ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ Enormément

9. Est-ce que le chaudron magique accroît l'enthousiasme des élèves ? *

Pas du tout ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ Enormément

	Pas du tout utile	Inefficace	Superflu	Utile	Très utile	Indispensable
Aide d'Ekko	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Affichage de la valeur des ingrédients	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Croix rouges sur les mauvais type d'ingrédients	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Affichage simultanée de la position de la fraction sur la droite graduée, pour les exercices utilisant les ingrédients	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Affichage des ingrédients en Réalité Augmentée pour les exercices utilisant la droite graduée	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

	Pas du tout d'accord	Plutôt en désaccord	Ni d'accord, ni en désaccord	Plutôt d'accord	Tout à fait d'accord
L'expérience a permis aux élèves de cette année d'acquérir un meilleur niveau en fractions que leurs prédécesseurs	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
L'expérience a permis aux élèves de cette année d'acquérir un meilleur niveau en fractions inférieures à 1 que leurs prédécesseurs	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
L'expérience a permis aux élèves de cette année d'acquérir un meilleur niveau en fraction supérieure à 1 que leurs prédécesseurs	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
L'expérience a permis aux élèves de comprendre les notions basique des fractions	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
L'expérience (prétest et posttest) est suffisante pour déduire si le niveau des élèves s'est amélioré ou pas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
L'utilisation du chaudron magique d'une façon personnelle à la maison aiderait les élèves à s'améliorer	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Les élèves sont très motivés pour utiliser le chaudron magique	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Les élèves sont très enthousiastes lors de l'utilisation du chaudron magique	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Les élèves posent plus de questions pertinentes sur les fractions pendant ou après avoir joué au chaudron magique	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Les élèves comprennent les énoncés des exercices du chaudron magique facilement



13. **Combien de fois** vous avez réutilisé le Chaudron Magique après l'expérimentation ? Dans quels **contextes** ? Et pour quels **objectifs** ? *

14. Quelles sont les aspects et fonctionnalités qui devraient être améliorés/changés/ajoutés dans le chaudron magique ?

15. Veuillez nous faire part de tout commentaire supplémentaire concernant votre expérience

Guide d'utilisation Pour l'application *Le Chaudron Magique*

Projet SMART-Fractions <https://smart-fractions.univ-le-mans.fr/fr/index.html>
30 décembre 2021

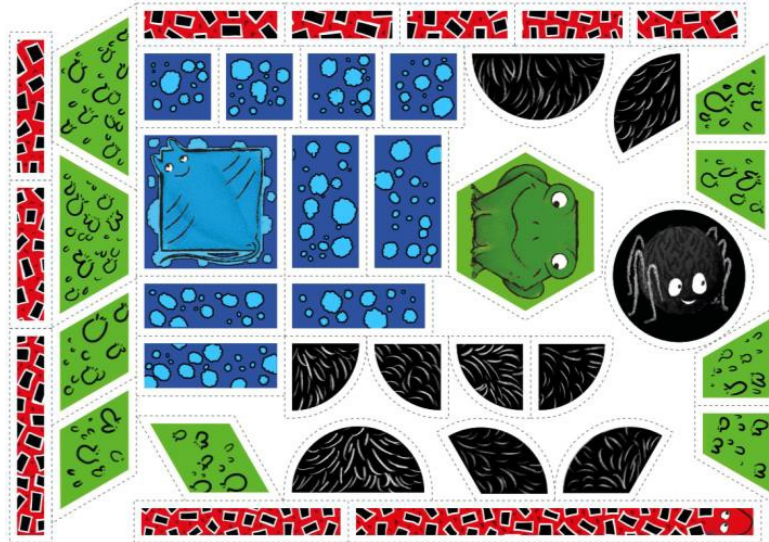


Matériel de jeu

Le Chaudron Magique est une application en Réalité Mixte qui nécessite un matériel spécifique :
1 fiche : Le document *fiche.pdf* est à imprimer au format 4A, de préférence en couleur, mais fonctionne aussi en noir et blanc.



Il faut les 40 pièces de jeu : Le document piecesDeJeu.pdf est à imprimer au format 4A, de préférence en couleur et sur du papier mat. Nous vous conseillons de le coller sur du carton pour que les pièces soient plus solides et faciles à manipuler. Les pièces doivent être découpées, en suivant les traits gris pointillés. Il est important de ne pas couper une partie du dessin sur les pièces. L'application de RM a besoin de voir l'intégralité du dessin sur la pièce pour bien la reconnaître.



Une tablette Android avec les configurations suivantes :

- Version Android 6.0 ou plus
- Caméra arrière : 8 MP ou plus
- RAM installée : 3 Go ou plus
- Fréquence du processeur : Octa Core 1.8 GHz ou plus

Voici la liste des appareils recommandés : <https://library.vuforia.com/platform-support/vuforia-engine-recommended-devices.html>

1. L'application Le Chaudron Magique : la dernière version de l'application peut être téléchargée sur le PlayStore Android.
2. Un support de tablette : la tablette doit être tenue à plat, à environ 20 cm au-dessus de la table au-dessus de la table. Le support doit être assez solide pour que l'enfant puisse cliquer dessus sans que la tablette ne bouge. Il est fortement conseillé d'utiliser un support (ex : ZenCT Support Tablette), car cela libère les mains du joueur et évite des erreurs de renaissance de pièces liées au changement de position de la tablette. Il est aussi envisageable de fabriquer un tel support avec 2 cartons comme dans l'image ci-dessous.



Une table : Pour une utilisation optimale du jeu, le matériel de jeu doit être disposé sur une table. La tablette doit aussi être fixée à cette table, comme dans l'image ci-dessous. En fonction de la hauteur de la table, il est possible que l'enfant soit obligé d'être debout.



Connexion au compte utilisateur

Quand vous ouvrez l'application Le Chaudron Magique, l'application va vous demander de vous connecter à un compte utilisateur. Ce compte nous permet de collecter des données sur l'usage de l'application qui seront ensuite utilisées pour nos recherches.

1. Vous devez donc connecter la tablette à internet
2. Si vous n'avez pas encore de compte, vous devez en créer un dans la partie de droite et cliquez sur le bouton « enregistrer »
3. Utilisez notre nouvel identifiant dans la partie de gauche pour vous connecter.

The screenshot shows the user interface of the 'Le Chaudron Magique' application, version 13.6. The background is a textured, parchment-like brown. At the top center, the title 'Le Chaudron Magique' is written in a stylized, cursive font, with 'V13.6' below it. The interface is divided into two main sections: login on the left and registration on the right. In the login section, there are three input fields: 'PrenomN', 'Mot de passe', and 'Confirmation Mot de passe'. Below these is a 'Connexion' button. In the registration section, there is a dropdown menu labeled 'Choisir la classe', followed by three input fields: 'PrenomN', 'Mot de passe', and 'Confirmation Mot de passe'. Below these is an 'Enregistrer' button. A 'Déconnexion' button is located in the center between the two sections.

Conditions optimales pour la Réalité Mixte

La Réalité Mixte s'appuie sur des technologies de reconnaissances d'image appelées marqueurs. Dans Le Chaudron Magique, la fiche et les pièces de jeu sont des marqueurs. La reconnaissance de ces marqueurs fonctionne de façon optimale quand ils sont grands et bien éclairés. De plus, nous poussons la technologie à ses limites, car nous utilisons des tablettes (qui n'ont pas des processeurs aussi puissants que des ordinateurs) et certaines activités requièrent la reconnaissance simultanée de 5 marqueurs (1 fiche et 4 pièces de jeu). Il est donc important de suivre les recommandations suivantes pour obtenir des conditions optimales afin que ces marqueurs soient bien reconnus.

1. Placez la table à côté d'une fenêtre : L'éclairage naturel est clairement le meilleur. Il faut donc placer la table à proximité d'une fenêtre. Placer l'enfant de l'autre côté de la table pour ne pas qu'il bloque la lumière du jour.

S'il ne fait pas jour, il faudra utiliser une lampe avec une ampoule de 60W minimum, avec une lumière blanche. Cette lampe doit être placée juste au-dessus des feuilles en veillant à ce qu'elle ne fasse pas trop de reflets.

Attention à ne pas placer la fiche de jeu juste en dessous d'un néon qui va certainement faire des reflets et compliquer la reconnaissance d'image.

2. Placez la tablette à la bonne distance de la feuille : La tablette doit être placée à la bonne hauteur, au-dessus de la feuille, de façon à voir tous les éléments de la feuille, y compris le magimètre, comme dans la photo ci-dessous. Il ne faut pas placer la tablette trop haute, car, plus elle sera haute, plus elle aura du mal à reconnaître les pièces de jeu qui seront trop petites. En fonction de la qualité et de la focale sur la caméra, la tablette devra être placée plus ou moins haute (environ de 15 à 20 cm) pour avoir ce rendu. Dans certains cas, la caméra se trouve dans l'angle en haut à gauche de la tablette. Il faudra donc déplacer la fiche pour qu'elle soit directement en dessous de la caméra. Vous pouvez tourner la tablette à 180° pour trouver la meilleure configuration.



Test de la reconnaissance des marqueurs : Visuellement, il est simple de voir si les marqueurs sont reconnus :

Si la fiche est reconnue, un chaudron 3D apparaît sur l'écran

Si une pièce est reconnue, on entend un petit son « poc » et la fraction correspondant à la valeur de la pièce apparaît dessus.



Résolution de problèmes


Il est possible d'avoir les problèmes d'affiche suivant :

- Le chaudron 3D n'apparaît pas
- Les pièces apparaissent floues dans la tablette
- Les pièces ne sont pas reconnues



Voici 4 manipulations que vous pouvez tenter, dans l'ordre, afin de résoudre ces problèmes :

1. Passez votre main devant la caméra. Cela peut l'aider à se réinitialiser et retrouver les marqueurs.

2. Vérifiez que vous avez des conditions d'éclairage optimales (voir section précédente)
3. Cliquez sur le bouton  en haut à gauche de l'écran sur l'écran pour recharger la scène.
4. Approchez la tablette autant que possible de la table, de façon à agrandir les marqueurs des pièces de jeu, tout en gardant la fiche visible.

Titre : Conception de jeux sérieux en réalité mixte : application à l'apprentissage des fractions

Mot clés : Fraction, Réalité mixte, Apprentissage, Jeux sérieux, Anxiété, Mathématique.

Résumé : La thèse s'articule autour de la conception et l'analyse du *Chaudron Magique*, un jeu sérieux, en Réalité Mixte (RM), pour enseigner les fractions à des élèves (de 9 à 12 ans). Ce jeu est le fruit d'une collaboration étroite avec des didacticiens de mathématiques, des enseignants et leurs élèves. Il constitue une extension numérique d'un jeu commercialisé, l'Atelier des Potions, qui a été créé par un didacticien des mathématiques lors de sa thèse. Grâce à l'utilisation de la RM, notre objectif est d'améliorer la compréhension des différentes représentations des fractions (portion d'un tout, quotient, pourcentage, position sur une droite graduée...), qui sont particulièrement complexes, et de rendre leur apprentissage plus engageant.

Cette thèse apporte deux principales contributions scientifiques. La première est une démarche de recherche collaborative et itérative, inspirée du *Design-Based Research* (DBR) et des méthodes *Agiles*. Elle vise à trouver de nouvelles façons d'utiliser les technologies innovantes, telles que la RM, au service de la pédagogie. La seconde contribution est un modèle de conception de jeux sérieux en RM. Ce modèle propose notamment un cadre structuré pour prendre en compte les contraintes organisationnelles inhérentes à l'usage d'applications numériques en classe, optimiser l'usage du matériel disponible et réduire les coûts de développement, tout en intégrant les objectifs pédagogiques à atteindre.

Cette démarche et ce modèle ont été utilisés pour créer le jeu *Le Chaudron Magique*. Celui-ci offre une variété d'exercices ludiques conçue pour renforcer la compréhension des fractions représentées comme des positions sur une droite graduée. Le jeu est enrichi de rétroactions instantanées et d'outils d'aide pour promouvoir l'autonomie des élèves. L'évaluation des impacts de ce jeu a été réalisée lors d'expérimentations menées auprès de 228 élèves. Le jeu a notamment révélé un potentiel pour l'apprentissage des fractions. Les expériences ont aussi montré une augmentation de l'autonomie et une réduction du stress chez les élèves, grâce aux fonctionnalités interactives et les éléments immersifs du jeu.

Nos résultats corroborent l'intérêt de la démarche de recherche collaborative proposée et notamment l'intérêt de la RM pour l'apprentissage des fractions. Celle-ci pourrait également être pertinente pour d'autres matières impliquant différentes représentations d'un concept (comme les fractions). En outre, les résultats valident la pertinence du modèle de conception de jeux sérieux en RM proposé. Celui-ci s'appuie notamment sur un processus de transposition d'un jeu de plateau traditionnel en expérience immersive en RM. Ce processus, qui vise à conserver l'aspect tangible de certains objets physiques du jeu, tout en ajoutant des augmentations numériques, peut s'adapter à tout type de jeu de plateau pédagogique.

Title: Design of Serious Games in Mixed Reality: Application to Fractions

Keywords: Fraction, Math Anxiety, Mixed Reality, Learning, Serious Games.

Abstract: This PhD thesis focuses on the design and analysis of The Magic Cauldron, a Mixed Reality (MR) serious game for teaching fractions to students (9 to 12 years old). The game was designed in close collaboration with experts in Math didactics, Math teachers and their students. This game was designed as a digital extension of a commercial board game, The potions workshop, originally created by an expert in Math didactics during this PhD. By using Mixed Reality, the objective is to help students understand the multiple representations of fractions (portion of whole, p/q, percentage, position on a number line...), which are particularly complex to grasp, and make their learning experience more engaging.

The PhD thesis offers two main scientific contributions. The first is a collaborative and iterative research approach, inspired by Design-Based Research (DBR) and Agile methodologies, which aims at discovering new ways to employ new technologies, such as MR, to support education goals. The second contribution is a design model for MR serious games.

This model provides a structured framework to address organizational constraints inherent to the use of digital applications in classrooms, to optimize the use of available equipment and reduce development costs, while incorporating the target educational goals.

This approach and the model were used to design the game The Magic Cauldron. It offers a variety of fun activities designed to strengthen understanding of fractions, represented as positions on a number line. The game offers instant feedback and support tools to promote student autonomy. The assessment of the game's impact was conducted through experiments involving 228 students. The game revealed significant potential for learning fractions. The experiments also indicated an increase in student autonomy and a reduction in stress, attributed to the interactive features and immersive elements of the game.

Our results corroborate the value of the collaborative research approach proposed and especially the use of MR for learning fractions. It may also be relevant for other educational fields involving different representations of concepts (such as fractions). Moreover, the results validate the relevance of the proposed MR serious game design model. This process, which aims to preserve the tangible aspect of certain physical objects in the game, while adding digital augmentations, can be adapted to any type of educational board game.