

Le Chaudron Magique :

un jeu en Réalité Mixte pour l'apprentissage des fractions en autonomie

Sofiane Touel¹, Iza Marfisi-Schottman¹, Sébastien George¹, Lucas Hattab², Nicolas Pelay²

¹ LIUM, Le Mans Université 72085, le Mans, France
prenom.nom@univ-lemans.fr

² Plaisir Math Lab, Paris, France
prenom.nom@plaisir-maths.fr

Résumé. Les concepts mathématiques, et notamment la notion de fractions, sont complexes à acquérir. De plus, l'appréhension et l'anxiété que certains élèves peuvent ressentir envers les mathématiques ne facilitent pas leur apprentissage. Pour tenter de répondre à cette problématique, nous avons conçu un jeu pédagogique nommé Le Chaudron Magique, en collaboration avec des didacticiens de mathématiques, des enseignants et leurs élèves. Il s'agit d'une extension numérique du jeu existant et qui utilise la technologie de la Réalité Mixte pour faciliter l'apprentissage des fractions. Il propose plusieurs types d'exercice pour soutenir l'apprentissage des fractions sur la droite numérique, à travers un scénario ludique. Le jeu propose aussi des rétroactions, en temps réel, et des aides, pour rendre les élèves plus autonomes. Nous présentons l'expérimentation de ce jeu sur 228 élèves, en situation écologique de classe ainsi que les premiers résultats.

Mots-clés : Fraction, Réalité Mixte, jeux sérieux, anxiété de mathématique, apprentissage.

Abstract. Mathematical concepts, and especially the notion of fractions, are complex to acquire. Moreover, the apprehension and anxiety that some students may feel towards mathematics do not make their learning easier. To try to address this issue, we have designed an educational game called *The Magic Cauldron*, in collaboration with mathematics didacticians, teachers and their students. It is a digital extension of an existing game that uses Mixed Reality technology to facilitate the learning of fractions. It offers several types of exercises to support learning fractions on the number line, through a fun scenario. The game also provides real-time feedback and assistance to make students more autonomous. We present the experimentation of this game with 228 students, in an ecological classroom situation, as well as the preliminary results.

Keywords: Fraction, Mixed Reality, serious games, math anxiety, learning.

1 Introduction

L'enseignement des fractions représente une réelle difficulté [1]. Parmi les obstacles didactiques les plus fréquents se trouvent notamment le placement des fractions sur une droite graduée, la compréhension des fractions supérieures à un et la comparaison des fractions. Les évaluations internationales (PISA, TIMSS) pointent, année après année, les difficultés des élèves qui s'accroissent en France [2]. L'étude de Post et al. [3] montre que la complexité des fractions est notamment engendrée par la coexistence de plusieurs aspects de ce concept. Ils dénombrent cinq « personnalités » : une fraction peut être un opérateur, une partie d'un tout, un ratio, un quotient, une mesure et un décimal. Chacun de ces aspects est travaillé à travers différentes activités pédagogiques qui utilisent une grande multitude de représentations : sections d'une figure géométrique, paquets d'objets, droite numérique... Il semble y avoir un consensus sur le fait que la difficulté d'apprentissage des fractions repose sur la complexité du concept, la multiplicité de ces aspects et des représentations utilisées par les enseignants [1].

Un autre aspect, qui complique l'apprentissage des fractions, est l'anxiété que peuvent éprouver les élèves envers les mathématiques. D'après l'étude de Wigfield et Meece [4], l'anxiété précoce envers les mathématiques peut entraîner une augmentation du stress, des stratégies d'évitement et une répulsion des mathématiques, et plus tard, de toutes matières scientifiques, d'où l'importance de proposer des mesures d'atténuation de ce phénomène, dès le plus jeune âge.

Une des stratégies qui semble efficace pour réduire cette anxiété est d'introduire les mathématiques sous forme de jeu. L'entreprise *Plaisir Maths* a, par exemple, développé *l'Atelier des Potions*, un jeu didactique pour l'apprentissage des fractions qui montre des résultats très positifs en termes de motivation et d'apprentissage [5]. Un autre atout de ce jeu est le fait que les enfants manipulent des objets, ce qui facilite la comparaison des fractions de façon visuelle et intuitive [6]. Cependant, comme la grande majorité des ressources pédagogiques, ce jeu se focalise uniquement sur une forme de représentation (sections d'une figure géométrique) puisque les pièces de jeu sont des carrés, cercles, hexagones, et des rectangles découpés en demi, tiers, quarts...

Dans cet article, nous présentons le travail mené sur une extension numérique de ce jeu, nommé *Le Chaudron Magique*. Ce jeu combine, de façon simultanée, la représentation de sections d'une figure géométrique (pièces de jeu manipulées) avec la représentation de la droite graduée, grâce à la technologie de Réalité Mixte (RM). L'objectif est de faciliter la compréhension de cette nouvelle forme de représentation des fractions. La deuxième partie de cet article dresse un aperçu des recherches menées sur l'apprentissage des fractions et des atouts pédagogiques la RM. La section trois présente *Le Chaudron Magique*. La section quatre représente la méthodologie utilisée lors de l'expérimentation du jeu avec 228 élèves et les premiers résultats et analyses. Enfin, la dernière section propose des conclusions et perspectives.

2 État de l'art

La RM est une technologie qui se base sur la reconnaissance d'image. Elle permet non seulement aux utilisateurs de voir des informations virtuelles sur des objets réels (Réalité Augmentée), mais aussi d'interagir avec ces éléments virtuels en manipulant les objets réels. La RM présente de nombreux intérêts pédagogiques. Tous d'abord, cette technologie a l'avantage de s'appuyer sur la **manipulation d'objets** physiques, ce qui facilite l'apprentissage [7, 8]. Les augmentations (en Réalité Augmentée) facilitent également l'apprentissage de concepts compliqués [9].

En ce qui concerne les fractions, il est possible d'utiliser la RM pour reconnaître les pièces de jeu et **afficher, de façon dynamique, une autre forme de représentation**. Les travaux du collectif du *Rational Number Project* montrent d'ailleurs que les enfants comprennent mieux les fractions quand elles sont enseignées avec plusieurs représentations et en faisant le lien entre celles-ci [10, 11]. Le principe est déjà utilisé dans plusieurs domaines comme la géométrie 2D et 3D [12, 13]. Ce principe a aussi donné de bons résultats pour enseigner les fractions [14].

En outre, la RM peut être utilisée pour afficher de l'aide contextualisé pour débloquer les élèves en difficulté [12]. Elle permet aussi de valider automatiquement les exercices [15] et ainsi **accroître l'autonomie** des élèves afin que l'enseignant puisse se concentrer sur les élèves en difficulté. L'application *Le marathon des fractions* [15] propose notamment un mécanisme d'autocorrection et d'aide. Si les élèves font une erreur, ils perdent des points et sont invités à cliquer sur le bouton d'aide. Cette étude a démontré que les mécanismes de correction et d'aide ont été particulièrement efficaces pour leur donner plus d'autonomie aux élèves.

Enfin, la RM peut **accroître la motivation et l'engagement des élèves** [16] ce qui pourrait réduire l'anxiété liée aux mathématiques, comme démontré dans les projets *de magic boosed* [12] et le *marathon des fractions* [15].

3 Le Chaudron Magique

Le Chaudron Magique est un jeu en RM qui a été conçu en suivant une méthode de Design-Based Research avec des didacticiens des mathématiques, cinq enseignants et leurs classes, avec plusieurs cycles itératifs de conception et de développement [17]. Lors de ce travail avec les enseignants pilotes, il est apparu, qu'en France, le moment le plus délicat dans l'apprentissage des fractions est le passage des fractions, qui sont d'abord enseignées comme des sections d'une figure géométrique aux fractions sur la droite graduée (CM1, CM2, 6ème). Il semblait donc pertinent d'utiliser la RM et le jeu pour faciliter le passage entre ses deux formes de représentation.

Le Chaudron Magique propose un scénario de 30 à 45 minutes qui peut être faite en autonomie. Le scénario plonge l'élève dans la peau d'un apprenti sorcier qui découvre un chaudron magique. Malheureusement, un méchant diabolot sorcier dérègle le chaudron et l'enfant devra la rééquilibrer en complétant plusieurs activités. Comme le montre la Figure 1, les apprenants utilisent des pièces inspirées de l'*Atelier des Potions* qui sont reconnues par l'application. Il s'agit de formes géométriques qui représentent

quatre types d'animaux : raie, grenouille, araignée et serpent. Ils placent ses pièces sur une fiche, sous la tablette. Les élèves peuvent, à tout moment, demander de l'aide au petit fantôme, en cliquant sur le bouton « ? ». Ces aides ont été définies, par les enseignants, après avoir testé le jeu avec une classe. Un choix délibéré a été fait de ne pas utiliser le mot « droite graduée » qui est présenté dans le jeu comme le « magimètre ». Celui-ci est placé sous le chaudron et se met à jour quand les pièces de jeu sont posées dans le chaudron. En fonction des exercices, les valeurs affichées, en Réalité Augmentée, au début et à la fin du magimètre peuvent varier (ex : 0 à 1 ou 0 à 2) et il peut aussi être découpé en section (demi, tiers, quart...).

Le jeu est composé de trois niveaux (figure 2), qui proposent chacun un type d'activité pédagogique. Chaque niveau propose six exercices avec une difficulté croissante. Les élèves doivent réussir les exercices pour avancer dans le scénario.



Fig. 1. Matériel du jeu Le Chaudron Magique

Niveau 1 : Placer une fraction sur la droite avec l'aide des pièces de jeu. Chaque exercice possède des instructions du type : “Place le curseur du magimètre pour indiquer X de Y. Tu peux t'aider des pièces du jeu.” où X indique la quantité demandée (sous forme de fraction) et Y le type d'ingrédient (ici un des quatre animaux). Quand l'élève place les pièces de jeu dans le chaudron, la valeur de la pièce apparaît sur celle-ci, en Réalité Augmentée, et une ligne apparaît sur le magimètre pour indiquer la bonne position. L'élève doit ensuite déplacer le curseur du magimètre au bout de cette ligne.

Niveau 2 : Placer une fraction sur la droite en la coupant en parts égales. Dans ce niveau, le curseur ne peut se déplacer que sur les graduations du découpage choisi par l'apprenant. Le principe de ce niveau est semblable au précédent : il faut placer le curseur sur la droite graduée pour la quantité demandée. Les consignes sont de la même forme que le niveau 1. Les différences étant que, cette fois-ci, placer les pièces dans le chaudron n'aidera pas l'apprenant, car cela n'entraînera pas de rétroaction. L'application montre en revanche les pièces correspondantes, en Réalité Augmentée, lorsque le

curseur est déplacé. Tous les découpages ne sont pas toujours proposés ce qui requière de travailler la notion d'équivalence des fractions.

Niveau 3 : Trouver les pièces de jeu qui correspondent à la fraction sur la droite. La dernière situation est la situation inverse au niveau 1. C'est-à-dire qu'à partir de la fraction indiquée sur le magimètre, l'apprenant doit placer la quantité d'ingrédients correspondante dans le chaudron. Le curseur sur la droite graduée est fixe. Là encore, le lien est fait entre la représentation sections d'une figure géométrique et la droite graduée.



Fig. 2. Interfaces du jeu Le Chaudron Magique

4 Expérimentation

L'expérimentation a pour objectif de valider ou invalider les hypothèses suivantes :

- H1 - L'utilisation du jeu Le Chaudron Magique en RM peut soutenir le processus d'apprentissage des fractions.
- H2 - Les rétroactions du jeu Le Chaudron Magique en RM peuvent rendre les élèves plus autonomes (aide, correction et validation automatiques).
- H3 - L'utilisation du jeu Le Chaudron Magique en RM peut accroître le plaisir et la motivation et contribuer à la baisse de l'anxiété des enfants concernant l'apprentissage des fractions.

4.1 Protocole expérimental

Afin de valider ces hypothèses, nous avons choisi de mettre en place une étude comparative entre un groupe test, qui utilise Le Chaudron Magique (GA), et un groupe contrôle, qui utilise des exercices classiques, sur papier, proposés par leurs enseignants (GB). Chaque groupe a suivi les étapes suivantes (figure 3): remplissage du pré-test de

connaissance, session d'apprentissage (soit classique soit avec Le Chaudron Magique), remplissage du post-test (identique au pré-test), session d'apprentissage avec la méthode d'enseignement qu'ils n'avaient pas encore testé (soit classique soit avec Le Chaudron Magique) et puis finir, remplissage d'un questionnaire final. Les deux groupes ont été équivalents (nombre de filles/garçons, niveau, motivation). De plus, les enseignants ont été impliqués dans la mise en place de l'étude et ont veillé à ce que les exercices classiques proposés au groupe contrôle soient représentatifs de la manière dont les fractions sont généralement enseignées.

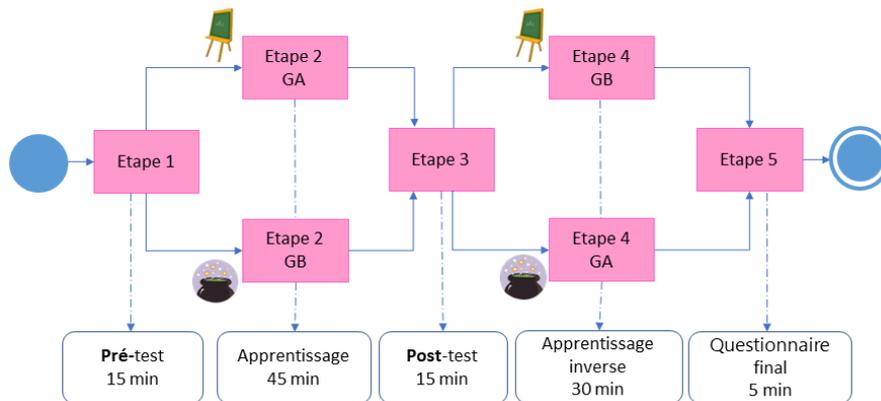


Fig. 3. Protocole expérimental

Les pré-test et post-test servent à mesurer la progression sur les compétences clés des fractions avant et après la session d'apprentissage surtout de la comparer entre groupes (H1). Ces tests sont composés de 12 questions : six pour évaluer les compétences sur les fractions inférieure ou égale à 1 et six pour évaluer les compétences sur les fractions supérieures à 1. Ils contiennent également des questions sur le gabarit *Child Math Anxiety Questionnaire* (CMAQ) [18] 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 4). Ils doivent dessiner une flèche pour exprimer leur état émotionnel. Ces résultats sont reportés sur une échelle de 1 à 16.



Fig. 4. Moyen de mesure de l'anxiété chez les enfants

Les sessions d'apprentissage ont été filmées, dans leur intégralité, pour compter le nombre de fois que les élèves ont sollicité l'aide de l'enseignant (H2). Pour finir, une fois que les deux groupes ont testé les deux méthodes d'enseignement, le questionnaire final permet de recueillir des informations sur la motivation des élèves et leurs comparaisons des deux sessions d'apprentissage (H3).

D'autres expérimentations complémentaires ont été menées, mais ne seront pas détaillées dans cet article par manque de place. Par exemple, pour avoir une vision sur l'impact du Chaudron Magique à plus long terme, le matériel de jeu a été laissé aux enseignants pendant une période complète (entre deux vacances scolaires).

4.2 Résultats

L'expérimentation a eu lieu entre janvier et juin 2022 sur huit classes : deux classes de CM1-CM2 à l'école Eugène Hairy, Laval (classe 1 : 23 élèves et classe 2 : 19 élèves), une classe de 5ème SEGPA du collègue Allain Gerbault, Laval (classe 3 : 19 élèves), cinq classes de 6ème au collège de la foresterie, Bonnetable (classe 4: 27 élèves, classe 5: 27 élèves, classe 6: 28 élèves, classe 7: 28 élèves, classe 8: 27 élèves) et une classe de 5e au même collège (classe 9: 30 élèves). L'expérience concerne 228 élèves au total.

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 les différences de progression entre les groupes. 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 indépendants (le groupe test et le groupe contrôle) sur une variable continue (la progression des élèves). Pour l'hypothèse H2, qui concerne la différence de répartition des réponses correctes/incorrectes entre les deux groupes, le test du Chi-carré (χ^2) est utilisé. Ce test permet de comparer la répartition de fréquences observées dans deux groupes indépendants pour une variable catégorielle.

Pré-traitement

Les données ont été filtrées pour enlever les absents au pré-test ou au post-test et les feuilles blanches (échantillon de 211 élèves). Nous avons aussi retiré une classe de 5ème SEGPA (classe d'enfant présentant de graves et durables difficultés scolaires) pour une question d'homogénéité, car le cours « classique » de l'enseignante était en fait composé de mini-ateliers de jeu de manipulation. Elle participait aussi activement à ces ateliers pour motiver ses élèves, ce qui aurait faussé les calculs d'autonomie. Les analyses suivantes ont donc été faites sur 195 élèves.

La fiabilité du questionnaire d'anxiété a été calculée avec le coefficient alpha de Cronbach pour les 12 questions. Le résultat de 0.738 suggère que les éléments ont une cohérence interne acceptable.

H1 - L'utilisation du jeu Le Chaudron Magique en RM peut soutenir le processus d'apprentissage des fractions.

Selon le test statistique de Wilcoxon, il y a une différence significative entre les résultats obtenus entre le pré-test et le post-test ($p = 2.281 \text{ e-}15$). Autrement dit, tous les élèves ont acquis des compétences relatives aux fractions, qu'ils soient dans le GA ou le GB. La progression sur les compétences des fractions inférieures ou égales à 1 est aussi

bonne entre le GA et le GB ($p = 0.6655$). En revanche, la progression apparaît moins bonne dans le GA par rapport au GB pour les compétences relatives aux fractions supérieures à 1 ($p = 0.007392$).

Nous nous attendions à avoir ce résultat, car la durée de l'expérimentation ne permet pas d'avoir une évolution remarquable. Cependant cette différence se manifeste uniquement dans les exercices qui traitent les fractions supérieures à 1, donc nous pensons que Le Chaudron Magique peut soutenir l'apprentissage des fractions chez les enfants. Nous estimons donc que notre hypothèse H1 est partiellement vérifiée.

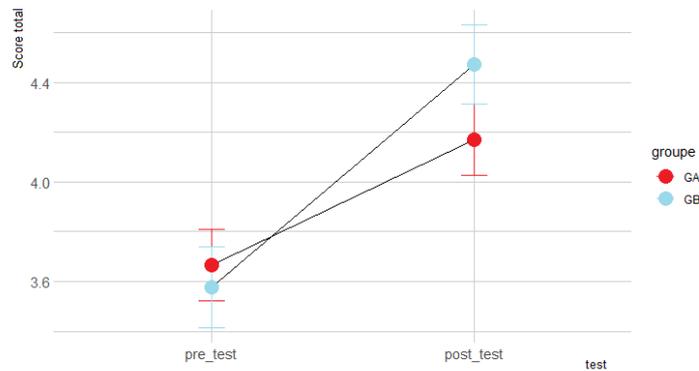


Fig. 5. Résultat aux tests de fractions du GA et GB (pre-test/post-test)

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

Nous avons comparé les proportions de demande d'aide pour le GA et le GB, pour les trois niveaux de classe (cm1-cm2, 6ème et 5ème). Comme le montre la figure 5, les élèves demandent, en moyenne plus d'aide dans le GB. Selon le test statistique *khi-deux*, cette différence est significative ($p = 3.528e-09$). Grâce aux rétroactions en temps réel ainsi que le système d'aide à la demande, les élèves qui utilisent Le Chaudron Magique sont donc plus autonomes et sollicitent beaucoup moins leurs enseignants que les élèves qui participent à une séance classique, quel que soit leurs âges.

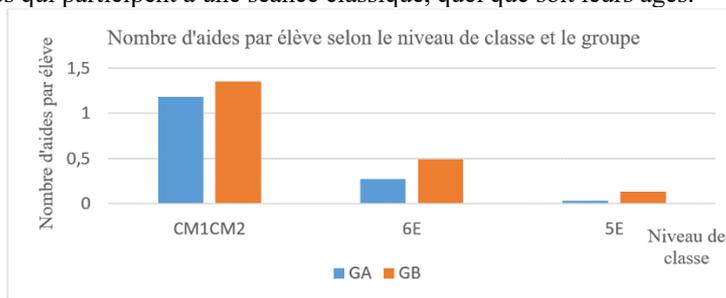


Fig. 6. Nombre d'aides moyens par élève du GA et GB

H3 - L'utilisation du jeu Le Chaudron Magique en RM peut accroître le plaisir, la motivation et contribuer également à la baisse de l'anxiété des enfants concernant l'apprentissage des fractions.

Comme le montre la figure 6, l'anxiété a baissé entre le pré-test et post-test pour les deux groupes (échelle de 1 - stressé à 16 - calme). Cette différence est statistiquement significative. Cependant, il n'existe pas de différence statistiquement significative entre GA et GB selon le test statistique de Wilcoxon ($p = 0.01636$). Le Chaudron Magique a donc contribué à la baisse de l'anxiété des enfants concernant l'apprentissage des fractions de façon significative, mais pas plus que l'activité classique, ce qui nous amène à analyser d'autres aspects afin de déterminer l'impact réel sur les différents sentiments ressentis lors de la séance telle que l'amusement, l'ennui ou encore la motivation.

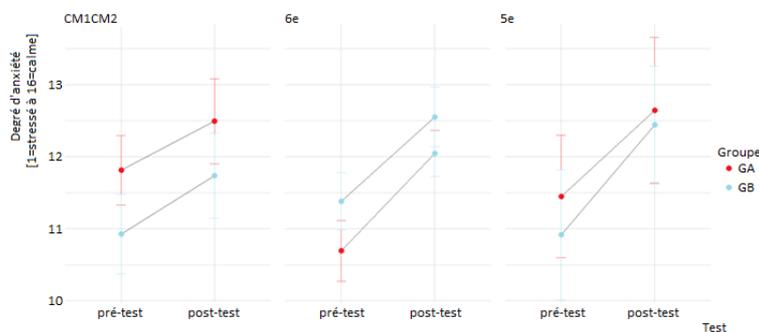


Fig. 7. Degré d'anxiété des élèves pendant le pré-test et le post-test par niveau

Nous remarquons aussi que les deux groupes sont moins stressés à la fin de l'expérimentation et aucune différence notable entre le GA et GB, d'après le questionnaire rempli par les élèves, cependant les mots que les élèves ont utilisés pour décrire les deux sessions d'apprentissage ainsi que la question sur leurs préférences, montre que ces derniers ont une préférence pour Le Chaudron Magique et sont plus motivés à utiliser ou réutiliser ce dernier.

La figure 8 montre le nuage de mot recueilli aux deux questions suivantes : « Écris 3 mots pour décrire la séquence d'exercices sur papier » et « Écris 3 mots pour décrire Le Chaudron Magique » posée dans le questionnaire final. Le top 10 des mots les plus répondus pour les activités classiques sont : 64 « bien », 42 « ennuyant », 39 « facile », 35 « long », 23 « dur », 22 « fraction », 19 « difficile », 18 « amusant », 16 « nul » et 10 « simple ». Le top 10 des mots les plus répondus pour Le Chaudron Magique sont : 83 « bien », 60 « amusant », 33 « facile », 31 « drôle », 28 « magique », 27 « super », 24 « rigolo », 24 « cool », 23 « chaudron » et 22 « fraction ». Nous remarquons que huit sur dix des mots les plus choisis par les élèves pour Le Chaudron Magique sont positifs, les deux autres sont neutres, contrairement à ceux des activités classiques, ce qui vient confirmer que les élèves ont plus de plaisir à jouer au Le Chaudron Magique qu'à participer à l'activité classique.

En ce qui concerne la motivation, les réponses sont aussi en faveur du Chaudron Magique. En effet, à la question « Que préfères-tu ? » les élèves ont choisis à 91% Le

Chaudron Magique contre 5% pour la séance papiers et 4% des élèves qui n'ont pas fourni de réponse ou ont donné des réponses erronées. Ceci vient confirmer le fait que les élèves ressentent plus de motivation à jouer au Chaudron Magique qu'à faire l'activité classique.

Nous pouvons donc conclure que l'utilisation du Chaudron Magique a permis d'accroître le plaisir et la motivation et contribuer également à la baisse de l'anxiété des enfants concernant l'apprentissage des fractions ce qui valide l'hypothèse H3.

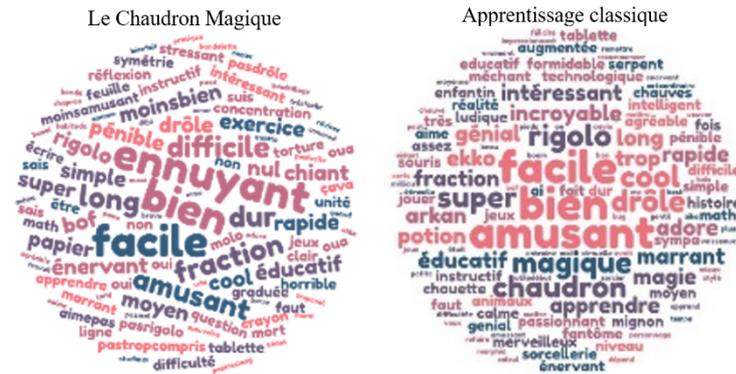


Fig. 8. Nuage de mots pour la session d'apprentissage classique et avec Le Chaudron Magique

4.3 Analyse et discussion

Bien que notre étude ait montré des résultats positifs en termes d'autonomie et de satisfaction des élèves, il est important de discuter des limites du jeu, notamment pour l'apprentissage des fractions supérieures à 1. Une piste d'amélioration pourrait consister à adapter le jeu pour mieux prendre en compte cet aspect, en intégrant par exemple des exercices spécifiques et des aides adaptées pour les fractions supérieures à 1.

De plus, l'autonomie des élèves a été mesurée en comptant le nombre de fois que ceux-ci levaient la main pour demander une question à l'enseignant. Cet indicateur présente toutefois des limites et des études futures pourraient explorer le temps passé à résoudre des problèmes de manière indépendante ou le nombre de problèmes résolus sans assistance.

Il serait également intéressant de développer une version du Chaudron Magique sans RM pour mesurer l'impact du jeu et de la RM séparément.

5 Conclusion et perspectives

Les fractions demeurent une matière très mal aimée et difficile pour les élèves. De plus l'anxiété que ces derniers ressentent envers les matières des mathématiques, amplifie ce sentiment et décourage les élèves à essayer de comprendre et maîtriser les fractions. Nous avons vu dans notre étude que les jeux pouvaient aider à atténuer ce sentiment envers les mathématiques. En nous basant sur *l'Atelier des potions*, qui a été conçu à

cet effet, nous avons donc développé une extension numérique qui s'appelle Le Chaudron Magique et qui intègre la technologie de Réalité Mixte (RM). Ce jeu a été conçu grâce à la collaboration entre des chercheurs informatiques, des didacticiens des mathématiques, des enseignants et leurs élèves. Il propose un parcours qui aide les élèves du cycle 2 (cm1, cm2 et 6ème) à mieux comprendre les fractions sur une droite graduée. Grâce à la RM, le jeu propose aussi un système d'aide contextualisé et d'autocorrection.

Nous avons testé notre jeu sur plus de 200 élèves. Nous avons remarqué que, durant cette séance de test, les élèves ont acquis des compétences sur les fractions, même si la différence dans une séance d'une heure ne montre pas d'amélioration significative par rapport aux cours classiques. Les élèves qui utilisent Le Chaudron Magique apprennent les fractions inférieure ou égale à 1 aussi bien que les élèves qui participent au cours classique. En revanche, ils apprennent légèrement moins bien les fractions supérieures à 1 avec Le Chaudron Magique. Nous remarquons aussi que les élèves qui ont joué au Chaudron Magique étaient plus autonome qu'en cours classique. Ceci est sans doute dû aux rétroactions, en temps réel, que nous permet d'afficher la MR ainsi que l'aide proposé dans le scénario du jeu. Enfin, Le Chaudron Magique a fait baisser le niveau de stress ressenti par les élèves, mais pas plus que le cours classique. En revanche, ils ont beaucoup plus apprécié jouer au Chaudron Magique.

Nous traitons actuellement les données récoltées sur les expériences à long terme avec Le Chaudron Magique et nous pensons que les résultats montreront des différences plus significatives entre les deux groupes, car il est difficile de démontrer l'apport du jeu en une seule séance. D'autres études complémentaires pourraient être menées pour affiner les résultats obtenus et explorer d'autres aspects susceptibles d'influencer l'impact du jeu sur l'apprentissage des élèves. Par exemple, il pourrait être intéressant d'étudier l'impact du jeu sur différents groupes d'élèves (selon leur niveau scolaire, profil).

References

1. Mercier, P.: Le passage de l'école primaire à l'école secondaire dans l'enseignement et l'apprentissage des fractions. Université Laval (2004).
2. Roditi, E., Martinez, S.: Programmes scolaires et apprentissage de la notion de fraction à l'école élémentaire. Quelques enseignements tirés de TIMSS. *Éducation & formations*. 94, 23–40 (2017).
3. Post, T., Behr, M., Harel, G., Lesh, R.: Rational numbers: Towards a semantic analysis—emphasis on the operator construct. *Rational numbers: An integration of research*. 13, (1993).
4. Wigfield, A., Meece, J.L.: Math anxiety in elementary and secondary school students. *Journal of educational Psychology*. 80, 210 (1988).
5. Pelay, N.: Jeu et apprentissages mathématiques: élaboration du concept de contrat didactique et ludique en contexte d'animation scientifique, (2011).
6. Pelay, N.: L'atelier des potions: Un jeu de société didactique et ludique pour apprendre les fractions. *Revue de Mathématiques Pour l'école*. 231, 6–11 (2019).
7. Fugate, J.M., Macrine, S.L., Cipriano, C.: The role of embodied cognition for transforming learning. *International Journal of School & Educational Psychology*. 7, 274–288 (2019).

8. Wilson, M.: Psychonomic bulletin & review. Six views of embodied cognition. 9, 625–636 (2002).
9. Da Costa, J., Szilas, N., Mueller, A.: 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 (2019).
10. Cramer, K.A., Post, T.R.: 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, 111–144 (2002).
11. Behr, M.J., Lesh, R., Post, T., Silver, E.A.: Rational number concepts. Acquisition of mathematics concepts and processes. 91, 126 (1983).
12. Andrea, R., Lailiyah, S., Agus, F., Ramadiani, R.: “Magic Boosed” an elementary school geometry textbook with marker-based augmented reality. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*. 17, 1242–1249 (2019).
13. Liou, H.-H., Yang, S.J., Chen, S.Y., Tarn, W.: The influences of the 2D image-based augmented reality and virtual reality on student learning. *Journal of Educational Technology & Society*. 20, 110–121 (2017).
14. Radu, I., McCarthy, B., Kao, Y.: Discovering educational augmented reality math applications by prototyping with elementary-school teachers. In: 2016 IEEE Virtual Reality (VR). pp. 271–272. IEEE (2016).
15. Palaigeorgiou, G., Tzolopani, X., Liakou, S., Lemonidis, C.: 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 (2018).
16. Chen, Y.: Effect of mobile augmented reality on learning performance, motivation, and math anxiety in a math course. *Journal of Educational Computing Research*. 57, 1695–1722 (2019).
17. Marfisi-Schottman, I., Touel, S., George, S.: Designing a Mixed Reality Extension for an Educational Board Game on Fractions. *International journal of virtual reality*. 21, (2021).
18. Ramirez, G., Gunderson, E.A., Levine, S.C., Beilock, S.L.: Math anxiety, working memory, and math achievement in early elementary school. *Journal of Cognition and Development*. 14, 187–202 (2013).