

Conception et développement d'un prototype de système CAVE
pour les applications liées au développement des habiletés
sociales des personnes autistes

par

Fatma BEJI

MÉMOIRE PAR ARTICLES PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE "15 MAI 2026"

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Fatma Beji, 2026



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

Prof. William de Paula Ferreira, directeur de mémoire
Département de génie des systèmes, École de technologie supérieure

Prof. Vitor Matias, codirecteur
Université de Québec à Montréal

Prof. Gaixia Zhang, président du jury
Département de génie électrique, École de technologie supérieure

Prof. Bassant Selim, membre du jury
Département de génie des systèmes, École de technologie supérieure

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE "28 AVRIL 2026"

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma sincère gratitude à mon directeur de recherche, le Professeur William de Paula Ferreira, pour son encadrement, sa disponibilité et la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ce projet. Ses conseils, son soutien constant et la richesse de ses réflexions ont grandement contribué à l'aboutissement de ce mémoire.

Je souhaite également remercier chaleureusement mon co-directeur, le Professeur Vitor Matias, pour son accompagnement, son expertise et ses commentaires pertinents, qui ont permis d'enrichir la qualité scientifique et méthodologique de ce travail.

J'adresse aussi mes sincères remerciements à ma co-superviseuse, Isabelle Pivotto Dabat, pour son soutien, sa bienveillance et la qualité de ses conseils tout au long de cette recherche. Je lui suis également reconnaissante pour les échanges enrichissants et l'accompagnement humain qu'elle m'a apportés durant ce parcours.

Mes remerciements s'adressent également à l'équipe de Productique Québec, notamment Vincent Thomasset, Sébastien Houle, Simon Lacroix, David Brodeur, Jocelyn Perron, Isabelle Rioux et Anthony Gauthier, pour leur accueil, leur soutien technique et leur précieuse collaboration dans le cadre du développement du prototype.

Je souhaite également remercier le laboratoire LaRTIC, en particulier le Professeur Conrad Boton, Fabian Andrés Ardila et Andrés Arias Fernández, pour les ressources mises à disposition ainsi que pour l'environnement de travail stimulant et enrichissant.

Je tiens aussi à remercier Axel Guitton pour sa contribution au projet, ainsi que les étudiants du projet de fin d'études Andréas Cottet, Frédéric Dubuc, Russel René Bulaon, Mehdi Feknous et Mathieu Floréal-Marcelin pour leur implication et leur travail au sein du projet.

Mes remerciements vont également à l'équipe de Ludic ainsi qu'à l'équipe d'Autisme Montréal pour leur collaboration et leur engagement dans le cadre de cette recherche.

Je souhaite aussi remercier le Ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie (MEIE) ainsi que le Fonds de recherche du Québec (FRQ) pour leur soutien financier, qui a contribué à la réalisation de ce projet.

Je remercie également toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'avancement et à la réalisation de ce mémoire.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance envers ma famille, la personne qui partage ma vie ainsi que mes amis, pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements et leur présence tout au long de ce parcours.

Conception et développement d'un prototype de système CAVE pour les applications liées au développement des habiletés sociales des personnes autistes

Fatma BEJI

RÉSUMÉ

Les technologies immersives, et en particulier les systèmes de type CAVE (Cave Automatic Virtual Environment), offrent des possibilités importantes dans des domaines tels que l'éducation, la santé et les interventions sociales. Toutefois, les systèmes CAVE traditionnels demeurent coûteux, complexes et difficilement transportables, ce qui limite leur accessibilité dans des environnements non spécialisés. Ce mémoire vise à concevoir, développer et évaluer un système CAVE transportable, modulaire et à faible coût, adapté notamment aux contextes communautaires et aux interventions auprès d'enfants autistes. La méthodologie adoptée s'appuie sur la recherche en sciences de la conception (Design Science Research), structurée en trois cycles complémentaires. Le premier cycle repose sur une analyse des brevets afin d'identifier les tendances technologiques et les lacunes existantes dans le domaine des systèmes CAVE. Le deuxième cycle consiste en une analyse comparative des solutions existantes, permettant de définir un ensemble d'exigences de conception en termes de portabilité, de coût et d'accessibilité. Le troisième cycle correspond à la conception, au développement et à l'évaluation d'un prototype de système CAVE transportable. Les résultats obtenus démontrent la faisabilité de concevoir un système immersif accessible sans compromettre significativement la qualité de l'expérience utilisateur. Le prototype développé intègre une architecture modulaire et des technologies adaptées aux contraintes de déploiement dans des contextes réels. Ce travail contribue à la démocratisation des technologies immersives en proposant une approche innovante permettant de rendre les systèmes CAVE plus accessibles, flexibles et adaptés aux besoins des utilisateurs.

Mots-clés: CAVE, réalité virtuelle, technologies immersives, portabilité, Design Science Research, autisme

Design and Development of a Portable and Low-Cost CAVE System

Fatma BEJI

ABSTRACT

Immersive technologies, particularly CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) systems, offer significant potential in fields such as education, healthcare, and social interventions. However, traditional CAVE systems remain expensive, complex, and difficult to deploy, which limits their accessibility in non-specialized environments. This research aims to design, develop, and evaluate a portable, modular, and low-cost CAVE system, particularly suited for community-based settings and interventions involving autistic children. The methodology is based on Design Science Research and is structured into three complementary cycles. The first cycle involves a patent analysis to identify technological trends and existing gaps in the field of CAVE systems. The second cycle consists of a comparative analysis of existing solutions, leading to the definition of key design requirements in terms of portability, cost, and usability. The third cycle focuses on the design, development, and evaluation of a portable CAVE prototype. The results demonstrate the feasibility of developing an accessible immersive system without significantly compromising the quality of the user experience. The proposed prototype integrates a modular architecture and technologies adapted to real-world deployment constraints. This work contributes to the democratization of immersive technologies by proposing an innovative approach that makes CAVE systems more accessible, flexible, and suitable for real-world applications.

Keywords: CAVE, virtual reality, immersive technologies, portability, Design Science Research, autism

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
0.1 Contexte de la recherche	1
0.2 Problématiques et objectifs	2
0.3 Contributions	4
0.4 Organisation du mémoire	5
CHAPITRE 1 MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE	7
CHAPITRE 2 CAVE AUTOMATIC VIRTUAL ENVIRONMENT TECHNOLOGY : A PATENT ANALYSIS	11
2.1 Résumé	11
2.2 Introduction	12
2.3 Contexte général	13
2.4 Méthodologie	15
2.5 Résultats	16
2.6 Discussion	22
2.6.1 Développement technologique de CAVE	22
2.6.2 Domaines d'application de CAVE	23
2.6.3 Développement de la technologie CAVE	24
2.6.4 Tendances et dynamiques	24
2.7 Conclusion	25
CHAPITRE 3 LOW-COST AND TRANSPORTABLE CAVE SYSTEMS	27
3.1 Résumé	27
3.2 Introduction	28
3.3 Méthodologie	31
3.3.1 Conception de la recherche	31
3.3.2 Analyse de brevets	32
3.3.3 Revue systématique de la littérature	33
3.3.4 Littérature grise	34
3.4 Résultats	35
3.4.1 Analyse comparative	35
3.4.2 Besoins	38
3.4.3 Architecture	39
3.5 Discussion	40
3.6 Conclusion et travaux futurs	41
CHAPITRE 4 DEVELOPING A PORTABLE CAVE SYSTEM FOR COMMUNITY- BASED ORGANIZATIONS	43
4.1 Résumé	43

4.2	Introduction	44
4.3	Revue de littérature	46
4.4	Méthodologie	49
4.5	Résultats	50
4.5.1	Cycle 1 : Recherche exploratoires et résultats préliminaires	50
4.5.2	Cycle 2 : Développement et évaluation du prototype non transportable ...	51
4.5.3	Conception et développement du prototype transportable	54
4.6	Discussion	58
4.7	Conclusion et perspectives	63
CHAPITRE 5 DISCUSSION GÉNÉRALE		65
5.1	Analyse de l'évolution technologique des systèmes CAVE	65
5.2	Analyse comparative et accessibilité des systèmes CAVE	66
5.3	Définition des exigences de conception adaptées aux contextes réels	66
5.4	Conception et validation du prototype	67
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		71
ANNEXE I PREUVES DES PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES		75
BIBLIOGRAPHIE		79

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Cadre méthodologique général 10
Figure 2.1	Illustration du système CAVE Tirée de Visbox, Inc. (2020) 14
Figure 2.2	Nombre de brevets et de citations pour CAVE 17
Figure 2.3	Répartition géographique des auteurs selon leur affiliation 18
Figure 2.4	Nombre de brevets 19
Figure 2.5	Domaines d'application des brevets 19
Figure 2.6	Évolution des brevets sur CAVE basée sur CPC 20
Figure 2.7	Analyses des clusters 21
Figure 4.1	Prototype CAVE 3D 57
Figure 4.2	Prototype CAVE 61
Figure 5.1	Vue d'ensemble des contributions 69

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ETS	École de Technologie Supérieure
UQAM	Université du Québec à Montréal
CAVE	Cave Automatic Virtual Environment
VR	Virtual Reality (Réalité virtuelle)
RV	Réalité virtuelle
HMD	Head-Mounted Display (Casque de réalité virtuelle)
3D	Three-Dimensional (Trois dimensions)
2D	Two-Dimensional (Deux dimensions)
ART	Advanced Realtime Tracking
IMU	Inertial Measurement Unit
GPU	Graphics Processing Unit
CPC	Cooperative Patent Classification
DSR	Design Science Research

INTRODUCTION

0.1 Contexte de la recherche

Au cours des dernières décennies, les technologies immersives ont connu un développement rapide et leurs domaines d'application se sont multipliés, notamment en éducation, en santé, dans l'industrie et les sciences cognitives, tout en s'imposant comme des outils clés en recherche scientifique, en ingénierie ainsi que dans les secteurs de la construction et de l'architecture ou encore de l'art et la culture (Chong, Lim, Rafi, Tan & Mokhtar, 2022; Radianti, Majchrzak, Fromm & Wohlgenannt, 2020; Turhan & Gümüş, 2022). La réalité virtuelle (RV) constitue l'une des principales modalités de ces technologies immersives. Elle peut être définie comme un ensemble de technologies permettant de plonger un utilisateur dans un environnement numérique tridimensionnel interactif simulé, dans lequel il peut percevoir, explorer et interagir en temps réel. Elle repose sur trois caractéristiques fondamentales : l'immersion, qui correspond au degré d'engagement sensoriel de l'utilisateur dans l'environnement virtuel ; l'interactivité, qui renvoie à la capacité d'agir sur cet environnement ; et le sentiment de présence, défini comme l'impression subjective d'être là dans le monde virtuel (Slater & Sanchez-Vives, 2016; Muhanna, 2015). Les différentes modalités de réalité virtuelle (RV) représentent une valeur ajoutée grâce à leur aptitude à simuler des situations complexes de façon sécuritaire et à proposer des environnements interactifs et immersifs, particulièrement pertinents pour la modélisation, la visualisation, la simulation et le soutien (Misersky, Peeters & Flecken, 2022; Slater & Sanchez-Vives, 2016). Parmi les divers outils de VR, les systèmes CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) constituent une forme avancée de VR, permettant une immersion à l'échelle d'une pièce grâce à la projection d'environnements virtuels sur plusieurs surfaces (Manjrekar *et al.*, 2014; Muhanna, 2015). Contrairement aux dispositifs de réalité virtuelle basés sur des casques (HMD), les systèmes CAVE permettent une interaction naturelle, une collaboration entre plusieurs utilisateurs et une coprésence physique, ce qui les rend particulièrement adaptés

aux applications éducatives, industrielles et thérapeutiques qui requièrent de tenir compte des aspects verbaux et non verbaux d'une situation d'intégration non médiatisée (Febretti *et al.*, 2013; Coban, Bolat & Goksu, 2022; Ohno & Kageyama, 2005).

Cependant, malgré leur potentiel, les systèmes CAVE traditionnels présentent plusieurs limitations importantes. Ils sont généralement coûteux, non transportables, complexes à installer et nécessitent des infrastructures dédiées ainsi qu'une expertise technique avancée. Ces contraintes limitent leur accessibilité, notamment pour les organisations communautaires, les écoles ou les centres spécialisés (Febretti *et al.*, 2013; Manjrekar *et al.*, 2014). Dans ce contexte, l'intérêt pour le développement de systèmes CAVE portables, modulaires et à faible coût s'est accru. Cette nouvelle façon de faire vise à démocratiser l'accès aux technologies immersives et à permettre leur déploiement dans des environnements non spécialisés. Une telle approche est particulièrement pertinente dans le domaine des interventions auprès des enfants présentant des troubles du développement et en particulier les enfants autistes (Bailey & Bailenson, 2017; Mesa-Gresa, Gil-Gómez, Lozano-Quilis & Gil-Gómez, 2018; Savickaite, McDonnell & Simmons, 2022). Ces environnements immersifs peuvent contribuer au développement des compétences sociales, à condition qu'ils soient accessibles, sécuritaires et adaptés aux sensibilités sensorielles des utilisateurs.

0.2 Problématiques et objectifs

Malgré les avancées technologiques dans le domaine des systèmes CAVE (Muhanna, 2015), plusieurs défis majeurs persistent et limitent leur adoption dans des contextes réels, notamment communautaires et éducatifs. D'un point de vue technologique, les systèmes existants sont majoritairement conçus pour des environnements spécialisés, ce qui les rend difficilement transportables et peu adaptés à des contextes dynamiques nécessitant une installation rapide et flexible. De plus, les coûts élevés liés aux équipements, aux infrastructures et à la maintenance constituent un obstacle important pour les organisations disposant de ressources limitées. La

complexité technique des systèmes, incluant le calibrage, le suivi et l'intégration logicielle, limite également leur utilisation par des utilisateurs non experts (Febretti *et al.*, 2013; Manjrekar *et al.*, 2014). Par ailleurs, une problématique sociale se manifeste dans l'accès limité aux technologies immersives adaptées pour certaines populations ayant des besoins particuliers, notamment les enfants autistes. Les solutions de réalité virtuelle basées sur des casques présentent certaines limites pour ces utilisateurs, en raison de contraintes liées à la surcharge sensorielle, à l'inconfort physique et à la réduction des interactions sociales directes (Kemeny, Chardonnet & Colombet, 2020; Mesa-Gresa *et al.*, 2018). De plus, peu de solutions immersives accessibles et adaptées aux contextes communautaires sont actuellement disponibles pour soutenir des activités favorisant la participation sociale et le développement des habiletés sociales. Face à ces constats, la question de recherche s'est imposée : comment concevoir un système CAVE qui soit à la fois transportable, abordable, facile à déployer et adapté aux besoins des utilisateurs dans des contextes non spécialisés, tout en maintenant un niveau d'immersion et d'interactivité élevé ?

Afin de répondre à cette problématique, l'objectif général de ce mémoire est de concevoir, développer et évaluer un prototype de système CAVE transportable et à faible coût, adapté aux environnements communautaires et aux interventions auprès des enfants autistes. Ce projet s'inscrit dans une initiative d'innovation sociale visant à favoriser l'accès aux technologies immersives de type CAVE dans des contextes de loisir. Il a également pour ambition de soutenir le développement des habiletés sociales chez les jeunes autistes à travers leur participation à des activités de réalité virtuelle.

Plus spécifiquement, les objectifs de recherche sont les suivants :

- Analyser l'évolution technologique des systèmes CAVE à travers une étude des brevets afin d'identifier les tendances, les acteurs clés et les opportunités d'innovation ;
- Étudier et comparer les solutions CAVE existantes, en mettant l'accent sur les dimensions de coût, de portabilité, d'adaptabilité et de facilité d'utilisation ;

- Définir un ensemble d'exigences fonctionnelles, techniques et sensorielles pour la conception d'un système CAVE adapté aux contextes communautaires ;
- Concevoir et développer un prototype de système CAVE transportable intégrant une architecture modulaire, des technologies de projection et de suivi adaptées ;
- Évaluer le prototype à travers des expérimentations et des observations afin d'identifier ses performances, ses limites et ses perspectives d'amélioration.

0.3 Contributions

Ce mémoire apporte plusieurs contributions scientifiques, technologiques et méthodologiques dans le domaine des technologies immersives et des systèmes CAVE. Premièrement, il propose une analyse approfondie du paysage technologique des systèmes CAVE basée sur les données de brevets (Beji, Ferreira, Pivotto Dabat & Matias, 2025), permettant d'identifier les principales tendances d'innovation ainsi que les lacunes existantes, notamment en ce qui concerne l'absence des systèmes portables et à faible coût. Deuxièmement, il fournit une analyse comparative structurée des solutions CAVE existantes issues de la littérature scientifique, des brevets et de la littérature grise, mettant en évidence les limites actuelles en termes d'accessibilité, de portabilité et d'adaptabilité. Troisièmement, ce travail contribue à la définition d'un cadre de conception intégrant des considérations techniques, sensorielles, expérientielles et sociales, notamment les besoins spécifiques des enfants autistes en matière de sensibilité sensorielle, d'interaction, de collaboration et de participation à des activités immersives adaptées. Quatrièmement, il propose et met en œuvre un prototype de système CAVE transportable basé sur une architecture modulaire, intégrant des technologies de projection multi-surfaces, un système de suivi des mouvements et des scénarios interactifs conçus pour favoriser l'engagement et la collaboration. Enfin, ce mémoire s'inscrit dans une approche interdisciplinaire mobilisant le génie, les technologies immersives, les sciences de l'éducation et les interventions sociales à travers une démarche de

recherche en science de la conception (Design Science Research). Il contribue à démontrer la faisabilité de déployer des systèmes immersifs dans des environnements communautaires tout en mettant en évidence le potentiel des technologies immersives pour favoriser l'accessibilité technologique, l'inclusion et le développement des habiletés sociales chez les enfants autistes. Ce travail illustre également le rôle de l'ingénierie dans la conception de solutions technologiques innovantes répondant à des besoins sociaux réels et adaptées aux populations ayant des besoins particuliers.

0.4 Organisation du mémoire

Le présent travail est structuré sous la forme d'un mémoire par articles et comprend cinq chapitres correspondant aux différentes contributions de recherche. Ainsi, après avoir présenté le contexte de la recherche, exposé la problématique et énoncé les objectifs de l'étude, le premier chapitre décrit la méthodologie utilisée. Le deuxième chapitre correspond à l'article intitulé « CAVE Automatic Virtual Environment Technology : A Patent Analysis » (Beji *et al.*, 2025). Il porte sur l'analyse des brevets liés à la technologie CAVE et met en évidence les tendances technologiques, les principaux domaines d'application ainsi que les acteurs clés du domaine. Il contribue aux objectifs liés à l'analyse de l'évolution technologique des systèmes CAVE. Le troisième chapitre présente l'article intitulé « Low-Cost and Transportable CAVE Systems » (Beji, Pivotto, Matias & Ferreira, 2026). Il propose une analyse comparative des systèmes CAVE existants, en mettant l'accent sur les solutions portables et à faible coût, et permet d'identifier les exigences de conception nécessaires pour le développement d'un système adapté aux environnements communautaires. Le quatrième chapitre correspond à un article soumis portant sur la conception, le développement et l'évaluation d'un prototype de système CAVE transportable. Il s'inscrit dans les objectifs liés à la conception et à la validation du système proposé et est actuellement en attente de réponse. Le cinquième chapitre présente une discussion intégrée des principaux résultats et contributions du mémoire. Il met en évidence la manière

dont les différents articles et activités de recherche s'articulent pour aboutir à la conception du prototype CAVE.

CHAPITRE 1

MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

La méthodologie adoptée dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la Recherche en Sciences de la Conception (Design Science Research – DSR), telle que proposée par (Hevner, March, Park & Ram, 2004) et appliquée dans des travaux antérieurs portant sur les technologies immersives (de Paula Ferreira, Armellini & De Santa-Eulalia, 2020). Cette approche est particulièrement pertinente pour les travaux dont l'objectif n'est pas seulement de produire des connaissances théoriques, mais aussi de concevoir, développer et évaluer un artefact technologique répondant à une problématique réelle. Elle a notamment été mobilisée dans le développement de systèmes interactifs et d'environnements immersifs, notamment dans des contextes de simulation et de technologies immersives (Hevner *et al.*, 2004; Peffers, Tuunanen, Rothenberger & Chatterjee, 2007; de Paula Ferreira *et al.*, 2020). Dans le cadre de cette recherche, l'artefact correspond à un système CAVE transportable, modulaire et économiquement abordable, destiné à être déployé dans des environnements non spécialisés, notamment au sein d'organisations communautaires travaillant avec des enfants autistes. La démarche de recherche adoptée s'appuie sur une structuration en trois cycles itératifs et mobilise plusieurs méthodes de collecte et d'analyse de données de nature variée. Les deux premiers cycles s'appuient principalement sur des approches de recension et d'analyse documentaire, incluant l'analyse de brevets, la revue de la littérature scientifique et l'examen de la littérature grise. Ces analyses ont été complétées par des traitements descriptifs et des explorations de données, notamment à l'aide de techniques de regroupement implémentées en Python. Par ailleurs, le troisième cycle repose sur des observations terrain ainsi que sur une analyse descriptive des interactions et des conditions de déploiement du prototype.

La DSR repose sur une articulation continue entre l'environnement d'application, la base de connaissances et le processus de développement de l'artefact (Hevner *et al.*, 2004). D'une part, l'environnement fournit les besoins, les contraintes et les attentes qui motivent la recherche. Dans ce projet, ces éléments proviennent à la fois des limites observées dans les systèmes CAVE existants, des réalités des milieux communautaires et des exigences propres aux interventions

impliquant des enfants autistes, notamment en matière de sécurité, de simplicité d'installation, de transportabilité et de contrôle sensoriel. D'autre part, la base de connaissances regroupe les apports de la littérature scientifique, des brevets, des technologies existantes et des cadres conceptuels mobilisés pour structurer la réflexion et orienter les choix de conception. En faisant dialoguer ces deux sources d'information, le processus de conception permet de transformer les connaissances disponibles et les besoins du terrain en une solution technologique concrète, puis de l'évaluer afin d'en affiner progressivement la conception.

Comme l'illustre la Figure 1.1, la démarche de recherche présentée du haut vers le bas suivie dans ce mémoire s'est déployée selon une logique itérative en trois cycles complémentaires inspirée du cadre de la Recherche en Sciences de la Conception proposé par Hevner *et al.* (2004). Ces cycles ne constituent pas des étapes complètement indépendantes, mais plutôt des phases successives et interreliées, dans lesquelles les résultats produits à une étape servent d'intrants à la suivante. Cette structuration méthodologique reflète la progression du projet, depuis l'exploration du paysage technologique jusqu'au développement du prototype final.

Le premier cycle de recherche avait une visée exploratoire et analytique. Il consistait à mieux comprendre l'évolution de la technologie CAVE et à identifier les grandes tendances d'innovation dans ce domaine. Pour cela, une analyse des brevets a été menée afin de cartographier les principaux axes de développement technologique, les composants les plus étudiés, les domaines d'application ainsi que les lacunes existantes. Cette étape a permis de mettre en évidence le fait que, malgré la diversité des innovations liées aux systèmes CAVE, les solutions réellement transportables, modulaires et financièrement accessibles demeurent rares. Ce premier cycle a ainsi fourni une compréhension structurée du paysage technologique et a permis d'identifier un espace d'innovation pertinent pour la suite de la recherche (Beji *et al.*, 2025).

Le deuxième cycle visait à approfondir cette compréhension à travers une analyse comparative des systèmes CAVE existants. Cette phase s'appuyait sur des sources variées, incluant la littérature scientifique, les brevets et la littérature grise, afin de comparer les solutions disponibles selon plusieurs dimensions : configuration spatiale, type de projection, technologies de suivi,

mécanismes d'interaction, temps d'installation, degré de portabilité, robustesse structurelle, coûts et adéquation à des usages réels. L'objectif de cette étape était non seulement d'identifier les forces et les limites des systèmes existants, mais aussi de dégager un ensemble d'exigences de conception pour un système CAVE adapté aux contextes communautaires. Ce deuxième cycle a donc joué un rôle charnière dans la recherche, en traduisant les constats théoriques et technologiques en critères concrets de conception (Beji *et al.*, 2026).

Le troisième cycle correspond à la phase de conception, de développement et d'évaluation du prototype. En s'appuyant sur les résultats des deux premiers cycles, cette phase a conduit à la définition d'une architecture de système intégrant une structure modulaire transportable, des technologies de projection adaptées, un système de suivi des mouvements, ainsi qu'un environnement immersif permettant des interactions collaboratives. Le développement du prototype s'est effectué selon une logique itérative, incluant le choix et l'intégration des composants matériels et logiciels, la conception de la structure physique, l'élaboration de scénarios interactifs et la validation progressive de l'ensemble. Ce cycle s'appuie sur une démarche de prototypage itératif, accompagnée d'une validation technique exploratoire du système à travers son développement, son intégration et sa mise en fonctionnement. Cette étape a permis de confronter les choix de conception aux contraintes réelles de déploiement et d'identifier les compromis nécessaires entre immersion, coût, robustesse, facilité de montage et accessibilité, dans une perspective intégrative mobilisant l'ensemble des trois cycles de recherche.

Dans son ensemble, cette méthodologie permet d'assurer une cohérence forte entre les objectifs scientifiques du mémoire et sa finalité technologique. L'analyse des brevets a permis de situer la recherche dans son contexte d'innovation, l'analyse comparative a contribué à transformer les connaissances recueillies en exigences de conception, et le développement du prototype a permis de matérialiser ces exigences sous la forme d'un artefact concret. Ainsi, le mémoire ne se limite pas à décrire un prototype final, mais documente l'ensemble du processus de recherche qui a conduit à sa conception. Cette approche renforce à la fois la rigueur scientifique du travail et la pertinence pratique des résultats obtenus.

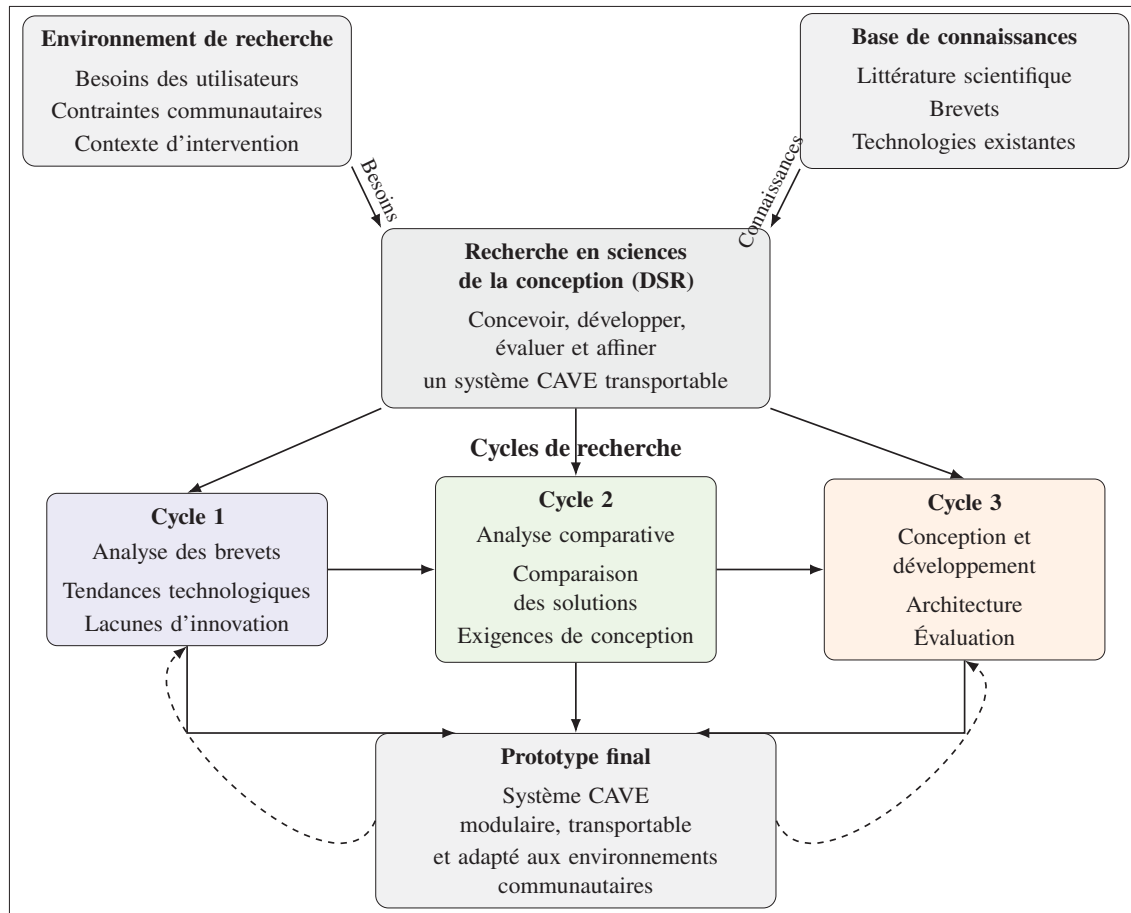


Figure 1.1 Cadre méthodologique général

CHAPITRE 2

CAVE AUTOMATIC VIRTUAL ENVIRONMENT TECHNOLOGY : A PATENT ANALYSIS

Fatma Beji¹ , William de Paula Ferreira¹ , Isabelle Pivotto Dabat¹ , Vitor Matias²

¹ Département de Génie des systèmes, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

² Département d'éducation et formation spécialisée, Université du Québec à Montréal ,
405 Rue Sainte-Catherine Est, Montréal, QC H2L 2C4

Article publié dans « 7th International Conference on Knowledge Innovation and Invention 2024 », septembre 2025

Le manuscrit présenté dans ce chapitre a été rédigé en collaboration avec mon directeur de recherche, William de Paula Ferreira, ainsi que Isabelle Pivotto Dabat et Vitor Matias. En tant que première auteure, ma contribution à cet article est estimée à 90 %. L'article a été soumis le 20 mai 2024, il a été accepté le 17 juin 2024 et présenté lors de la conférence du 16 au 18 août 2024 au Japon, avant d'être publié le 25 février 2025. L'article est référencé comme suit :Beji, F., Ferreira, W. D. P., Pivotto Dabat, I., & Matias, V. (2025). CAVE Automatic Virtual Environment Technology : A Patent Analysis. Engineering Proceedings, 89(1), 9.doi.org/10.3390/engproc2025089009

2.1 Résumé

La technologie CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) offre une expérience hautement immersive dans les environnements de réalité virtuelle (RV), transcendant les limites traditionnelles des casques VR. La technologie CAVE est utilisée dans de nombreux domaines, notamment l'éducation, la construction, la santé et l'industrie manufacturière. Malgré son importance, les études examinant l'évolution de la technologie CAVE et les orientations de la recherche font encore défaut. Pour combler cette lacune, nous avons analysé les brevets utilisant la technologie CAVE afin de comprendre son développement et d'identifier les opportunités pour la recherche, le développement et l'innovation futurs. Les données sur les brevets ont été collectées à partir de la base de données Lens et analysées à l'aide de techniques d'exploration de données. Le nombre

de brevets CAVE délivrés est en augmentation, ce qui reflète la croissance et les investissements importants dans ce domaine. Les résultats mettent en évidence les tendances émergentes dans le développement des systèmes CAVE, en soulignant diverses configurations techniques et applications innovantes dans un large éventail de domaines.

Mots clés : CAVE ; analyse de brevets ; exploration de données ; réalité virtuelle ; technologies immersives

2.2 Introduction

Un système CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) consiste en une salle de réalité virtuelle (RV) en forme de cube dont le sol, le plafond et les murs servent de surfaces de projection sur lesquelles plusieurs projecteurs affichent des images, créant ainsi un environnement RV 3D immersif (Muhanna, 2015). Il représente une avancée dans le domaine de la RV, offrant aux utilisateurs une immersion 3D qui transcende les limites traditionnelles de l'expérience virtuelle fournie par les casques RV (Kageyama & Tomiyama, 2016; Flynn, 2014). Le laboratoire de visualisation électronique a développé pour la première fois un système VR CAVE à l'université de l'Illinois, à Chicago, au début des années 1990 (Manjrekar *et al.*, 2014). Il a considérablement évolué depuis lors et a été utilisé pour différentes applications dans divers secteurs tels que l'éducation (Freina & Ott, 2015), la médecine et les soins de santé (Wiebe *et al.*, 2022; Gromer *et al.*, 2018; Pivotto, Matias & de Paula Ferreira, 2024), les loisirs et la culture (Ishii *et al.*, 2019) et la fabrication (Yang *et al.*, 2015). Malgré l'importance de la technologie CAVE, les études examinant son évolution technologique et ses orientations de recherche font encore défaut. Par conséquent, une analyse des brevets fournit des informations sur la dynamique concurrentielle et les innovations qui caractérisent son évolution. Elle comprend des étapes essentielles, telles que l'exploration technologique pour identifier les nouvelles avancées, l'évaluation du paysage technologique pour orienter la recherche et le développement, l'analyse concurrentielle pour positionner les brevets par rapport à ceux des concurrents, et le classement des brevets pour quantifier leur force et identifier les nouvelles demandes de brevets (Shalaby & Zadrozny,

2019). Même si des analyses de brevets sur la réalité augmentée (RA) et la RV ont été réalisées (Taotao & Yun, 2012; Evangelista *et al.*, 2020), il existe un écart notable dans les analyses des brevets liés à la technologie CAVE. Cette étude vise à combler cette lacune en appliquant une approche innovante basée sur l'exploration de données à des analyses quantitatives afin de comprendre les brevets associés aux systèmes CAVE. Les résultats fournissent des informations sur les principaux développements technologiques CAVE, les domaines d'application CAVE existants, les entreprises qui investissent dans la technologie CAVE et la développent, ainsi que la classification des brevets CAVE. Le reste de cet article est organisé comme suit : la section 2.3 présente un aperçu général des systèmes CAVE. La section 2.4 présente la méthodologie de recherche. La section 2.5 présente les résultats et la section 2.6 contient une discussion des résultats. Enfin, la section 2.7 conclut cette étude.

2.3 Contexte général

Les systèmes CAVE sont classés en deux catégories : les versions entièrement immersives, qui plongent l'utilisateur dans un univers virtuel à 360 degrés, et les versions partiellement immersives, qui offrent une expérience immersive sur une sélection restreinte de surfaces (Muhanna, 2015). Un exemple de système CAVE est illustré à la figure 2.1. La mise en œuvre des systèmes CAVE repose sur des techniques de projection directe ou indirecte, permettant de projeter un environnement virtuel sur les murs de l'espace dédié (Pivotto *et al.*, 2024). Comme le décrivent Manjrekar et al. Manjrekar *et al.* (2014), un système CAVE comprend six composants principaux : (1) un système audio ; (2) un système vidéo ; (3) un calibrage de la caverne ; (4) un rendu stéréographique ; (5) des systèmes de suivi ; et (6) un moteur graphique. Le système audio enrichit l'immersion grâce à des environnements sonores spatiaux, et le système vidéo, qui utilise des projecteurs de haute qualité, crée une illusion de profondeur en affichant des images stéréoscopiques sur les murs et les sols. Un calibrage précis de ces systèmes est essentiel pour aligner parfaitement les projections et suivre les mouvements de l'utilisateur. La stéréoscopie offre deux perspectives légèrement différentes pour chaque œil, et les systèmes de suivi ajustent les perspectives visuelles en fonction des mouvements de l'utilisateur, contribuant ainsi à l'effet

immersif. Les moteurs graphiques, optimisés pour les performances élevées requises par les CAVE, gèrent le rendu des environnements virtuels.

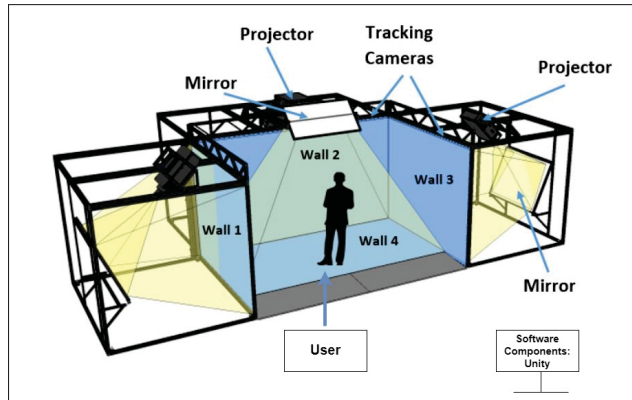


Figure 2.1 Illustration du système CAVE
Tirée de Visbox, Inc. (2020)

Pour une immersion totale, les systèmes CAVE intègrent des caméras à 360 degrés capables de capturer l'ensemble de l'espace environnant afin de permettre une reconstruction virtuelle complète. Pour les configurations partiellement immersives, on préfère utiliser des caméras à 180 degrés, qui concentrent l'immersion sur des zones spécifiques de l'environnement (Pivotto *et al.*, 2024; de Paula Ferreira, Armellini, de Santa-Eulalia & Rebolledo, 2021; de Paula Ferreira, Armellini, de Santa-Eulalia & Thomasset-Laperrière, 2022a). En général, quatre à huit caméras sont utilisées pour assurer une couverture complète et un suivi précis des mouvements de l'utilisateur. Les projecteurs jouent également un rôle clé dans la création de l'illusion d'un monde virtuel. Leur nombre varie en fonction de la configuration du CAVE. Un système entièrement immersif peut nécessiter entre quatre et six projecteurs pour couvrir tous les murs, le sol et parfois le plafond. Les projecteurs doivent avoir une haute résolution pour maintenir une qualité d'image supérieure et peuvent être répartis de manière à éviter les chevauchements et les ombres indésirables. Les technologies de projection adoptées varient, allant des projecteurs à traitement numérique de la lumière aux projecteurs à cristaux liquides, chacun présentant des avantages en termes de luminosité, de contraste et de fidélité des couleurs (Muhanna, 2015). Le système de suivi dans une CAVE est essentiel pour une expérience immersive réussie. Divers capteurs sont utilisés dans une CAVE, notamment des capteurs optiques, magnétiques et inertiels.

Ces capteurs détectent les mouvements de l'utilisateur et ajustent l'environnement virtuel en conséquence. Le nombre de capteurs nécessaires dépend de la complexité du système de suivi et de la précision souhaitée. Une configuration standard comprend une douzaine de capteurs répartis stratégiquement dans l'espace afin de capturer tous les aspects des mouvements de l'utilisateur. Le matériel nécessaire comprend des projecteurs haute résolution, des capteurs de mouvement, des lunettes 3D et des systèmes audio multidirectionnels, tandis que le logiciel comprend des moteurs de rendu tels que Unity ou Unreal Engine, des logiciels d'étalonnage et des intergiciels VR tels que VR Juggler ou CAVElib, facilitant l'interaction entre le matériel et les applications. La combinaison de ces composants matériels et logiciels fait des systèmes CAVE une plateforme exceptionnelle pour l'exploration de données et les simulations environnementales à des fins diverses.

2.4 Méthodologie

Nous adoptons une méthodologie d'analyse quantitative des brevets pour identifier les tendances technologiques émergentes, évaluer les activités des concurrents et détecter les opportunités de développement et de collaboration (Shalaby & Zadrozny, 2019; Míguez, Porteiro, Pérez-Orozco, Patiño & Gómez, 2020). Elle contribue également à atténuer les risques de contrefaçon et de litiges en clarifiant la propriété intellectuelle d'une technologie (Abbas, Zhang & Khan, 2014). De plus, des analyses de brevets sont menées afin de découvrir des domaines de recherche inexplorés et d'orienter les investissements en recherche et développement, garantissant ainsi un alignement stratégique avec les évolutions du marché (Abbas *et al.*, 2014). En outre, cette méthodologie aide à formuler des stratégies pour protéger et capitaliser sur les inventions, renforçant ainsi la position innovante du monde universitaire et de l'industrie à long terme (Míguez *et al.*, 2020). La base de données de brevets Lens a été choisie comme principale source de données pour les brevets liés à la technologie CAVE, pour des raisons spécifiques. Tout d'abord, Lens offre un accès gratuit à une vaste base de données mondiale de brevets, ce qui facilite l'exploration d'un large éventail de documents pertinents pour notre analyse. Lens compile des données provenant de diverses sources, notamment des offices nationaux des brevets

de plusieurs juridictions et d'autres institutions internationales. En outre, Lens offre une interface de recherche conviviale et intuitive ainsi que des fonctionnalités avancées de visualisation des données qui facilitent l'analyse des brevets.

Le tableau 2.1 présente le protocole de recherche utilisé dans cette étude. Nous avons identifié 264 brevets, parmi lesquels 215 ont été sélectionnés pour analyse, à l'exclusion des brevets redondants déposés dans différentes juridictions. Après avoir examiné chaque brevet, résumé et revendication, nous avons exclu 73 brevets qui dépassaient le cadre de cette recherche. Il s'agissait notamment de brevets concernant des grottes aquatiques, des caves à vin, des conteneurs pour plantes appelés « caves » ou des dispositifs médicaux utilisés dans des environnements CAVE. Les résultats de l'examen ont permis d'inclure 142 brevets pour une analyse plus approfondie à l'aide de statistiques descriptives et d'exploration de données (par exemple, des techniques de regroupement) basées sur le langage de programmation Python et ses bibliothèques spécialisées (par exemple, Pandas, Matplotlib, Seaborn, Scikit-learn).

Tableau 2.1 Search protocol

Data source	The Lens
Search string	(CAVE AND immersive) OR (CAVE AND virtual)
Period	From 1992 (emergence of the 1st CAVE) to June 7, 2024
Search fields	Title, abstract, and claims
Language	English
Document	Patents

2.5 Résultats

Parmi les brevets inclus dans l'échantillon, 39,4% sont des brevets actifs ; 32,4% sont des brevets en attente d'évaluation, ce qui signifie qu'ils sont toujours en cours d'examen par l'office des brevets et n'ont pas encore été accordés ; 19,7% sont des brevets interrompus ou abandonnés par leurs demandeurs avant d'être accordés ou rejetés ; 5,6% sont des brevets inactifs, ce qui signifie qu'ils ne sont pas commercialisés ou qu'ils sont en attente de renouvellement de leurs droits. Enfin, 2,6% sont des brevets expirés, ce qui signifie que leur période de validité légale a pris fin

et qu'ils ne sont plus protégés. Tous ces brevets non actifs ont été inclus dans l'analyse, car ils fournissent des informations sur le développement de la technologie CAVE.

La figure 2.2 montre l'évolution des brevets CAVE au fil du temps. Depuis les premiers dépôts observés au début des années 1990, correspondant à la création du premier CAVE, on observe une augmentation progressive des publications de brevets jusqu'au début des années 2000. À partir de là, on observe une accélération marquée, avec un pic notable en 2022 avec 21 brevets, ce qui suggère un intérêt accru pour la technologie CAVE en raison d'avancées technologiques clés, de l'émergence de nouveaux marchés d'application ou d'une reconnaissance plus large du potentiel commercial et des applications de la technologie immersive. De plus, les citations de brevets indiquent une technologie qui n'est pas reconnue comme essentielle par la communauté, mais qui continue d'avoir un impact sur l'innovation actuelle.

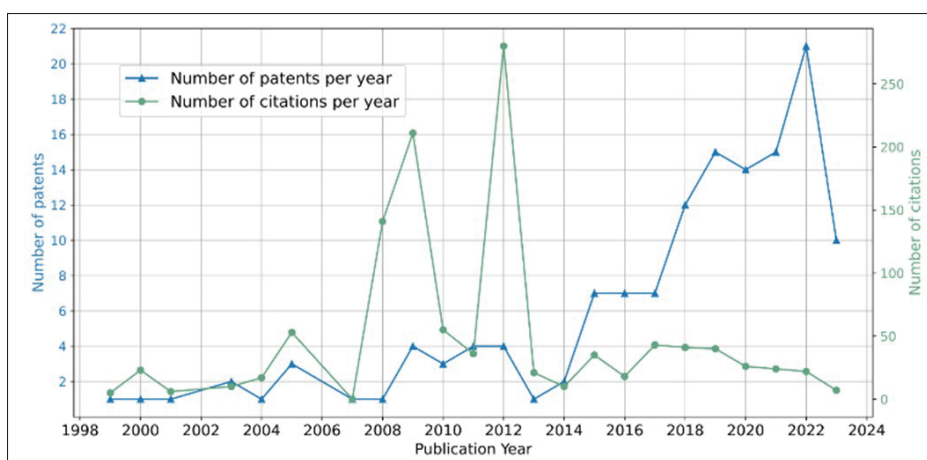


Figure 2.2 Nombre de brevets et de citations pour CAVE

La répartition géographique des brevets liés à la technologie CAVE met en évidence la portée mondiale de l'innovation et la diversité des acteurs impliqués. La figure 2.3 montre que la Chine et les États-Unis dominent largement le domaine avec respectivement 54% et 24% des brevets. D'autres pays, dont le Royaume-Uni et le Japon, détiennent entre 1 et 3 brevets, ce qui témoigne de l'intérêt et des investissements mondiaux dans cette technologie.

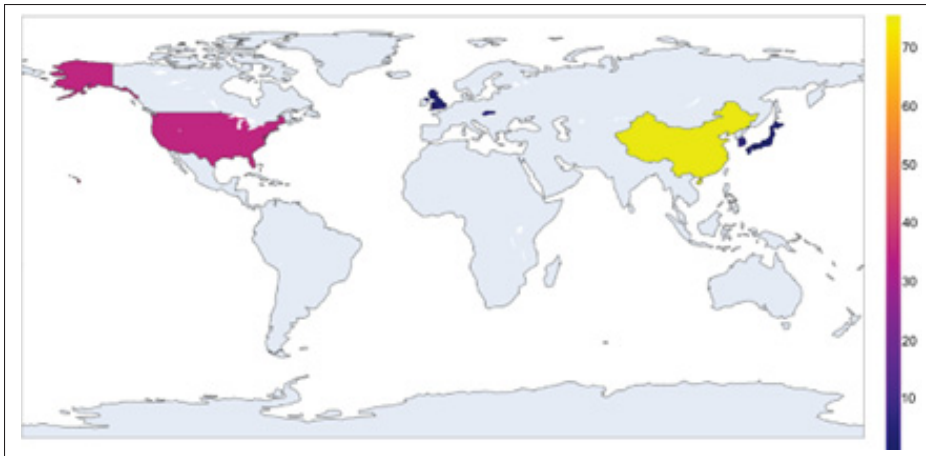


Figure 2.3 Répartition géographique des auteurs selon leur affiliation

La figure 2.4 présente les principaux déposants de brevets relatifs aux systèmes CAVE. Parmi les principaux déposants figurent des entreprises renommées dans les secteurs de l'aéronautique et de la fabrication, telles que Lockheed Corporation, basée à Bethesda, dans le Maryland (États-Unis), avec quatre brevets, et Geely Holding Group, dont le siège social se trouve à Hangzhou, dans la province du Zhejiang (Chine), avec cinq brevets. D'autres entités, telles que Hangzhou Yiyuqianxiang Technology, également située à Hangzhou, dans la province du Zhejiang, en Chine, et 3Di LLC, basée aux États-Unis, détiennent chacune trois brevets. Les industries et les universités contribuent au développement de la technologie CAVE. Par exemple, l'université de Jinan, située à Guangzhou, dans la province du Guangdong, en Chine, a déposé trois brevets, démontrant ainsi l'implication du monde universitaire dans l'avancement de ce domaine.

La figure 2.5 résume les domaines de demande de brevets CAVE. Elle indique que les deux domaines principaux sont la technologie VR (fabrication d'équipements audio et vidéo), avec 88 brevets, suivie par l'industrie manufacturière, avec 16 brevets. L'industrie du jeu vidéo fait également des progrès considérables en matière d'innovation, avec huit brevets. Elle est suivie de près par la recherche et le développement dans les secteurs de la biotechnologie et de la santé, ainsi que par l'industrie automobile, avec sept brevets chacun. Parmi les autres

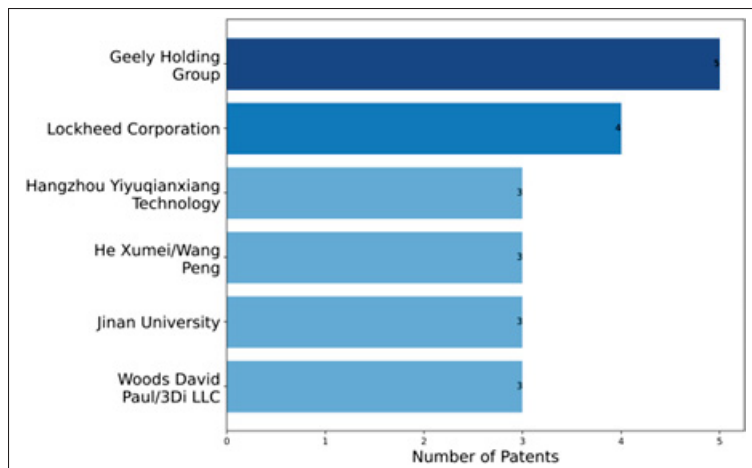


Figure 2.4 Nombre de brevets

domaines notables, citons l'éducation, l'interface homme-machine (IHM), l'ingénierie minière, le théâtre, le traitement vidéo, la photographie, le conseil en marketing et la géosynchronisation. La diversité des domaines illustre la grande applicabilité des systèmes CAVE.

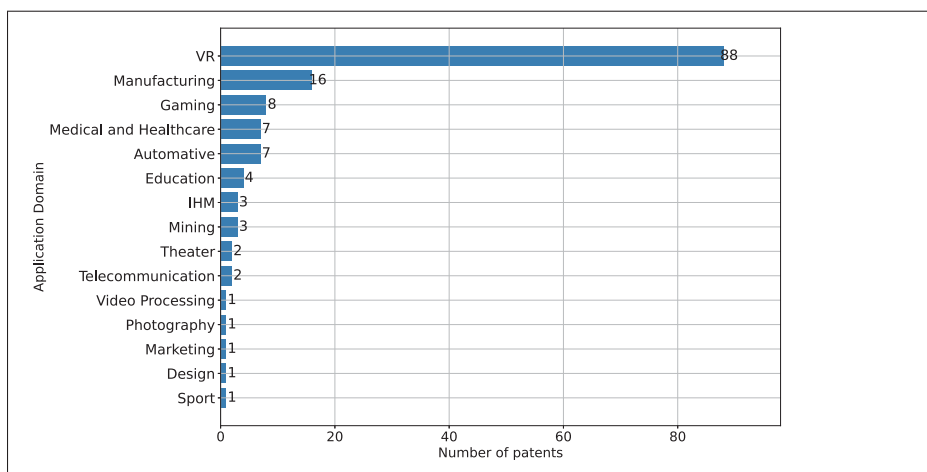


Figure 2.5 Domaines d'application des brevets

Deux systèmes sont utilisés pour classer les brevets en fonction de leur domaine technique : la classification coopérative des brevets (CPC) et la classification internationale des brevets (CIB). La CPC est un système relativement récent développé conjointement par l'Office européen des brevets (OEB) et l'Office américain des brevets et des marques (USPTO). Elle est conçue pour

être plus détaillée et plus évolutive que la version réformée de la CIB. La CPC est mise à jour plus fréquemment afin de refléter l'évolution rapide de la technologie et de l'innovation. La figure 2.6 montre le nombre de brevets classés dans différentes sous-catégories de la CPC afin d'identifier les principales innovations dans les systèmes CAVE. Par exemple, les sous-classes liées à la physique, telles que les systèmes de traitement d'images ou les dispositifs de suivi de la tête, sont prédominantes. Cela correspond aux aspects clés de la technologie CAVE, qui repose sur l'interaction de l'utilisateur et le traitement complexe des images pour créer des environnements immersifs.

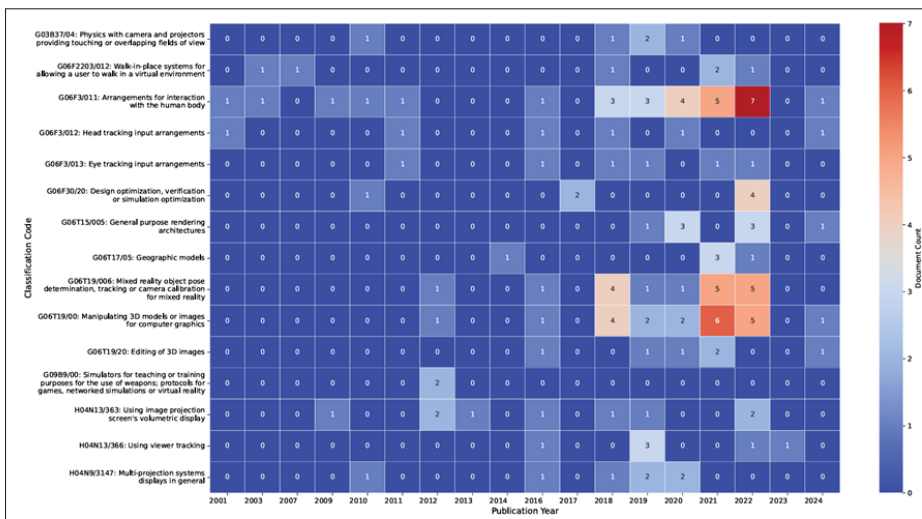


Figure 2.6 Évolution des brevets sur CAVE basée sur CPC

La figure 2.7 présente une analyse par grappes basée sur la classification de Manjrekar et al. [4], qui décrit un système CAVE en fonction de ses différents composants. Le groupe des systèmes audio et vidéo (36 brevets) comprend les technologies liées aux composants audio et visuels essentiels à la création d'une expérience CAVE immersive, avec des avancées dans les systèmes audio, les haut-parleurs, les écrans d'affichage, les projecteurs et les méthodes d'intégration. Le cluster « Calibrage CAVE » (22 brevets) se concentre sur les aspects techniques nécessaires pour garantir la précision et la fiabilité des environnements immersifs, englobant le matériel et les logiciels essentiels au calibrage de précision. Le groupe de rendu stéréographique (21 brevets) est dédié aux technologies qui permettent la création d'images en trois dimensions,

offrant une perception de la profondeur et améliorant le réalisme de l'environnement virtuel grâce à des méthodes d'affichage stéréoscopiques. Le groupe des systèmes de suivi (34 brevets) comprend des technologies de suivi des mouvements des yeux, des mains et du corps, essentielles pour des interactions naturelles et intuitives dans les environnements virtuels, afin d'améliorer l'expérience utilisateur grâce à des capacités de suivi précises. Enfin, le groupe des moteurs graphiques (35 brevets) comprend les composants logiciels et matériels chargés du rendu et de la gestion des graphiques dans un système CAVE, couvrant les innovations en matière de GPU, d'algorithmes de rendu et de plateformes logicielles qui prennent en charge le rendu graphique haute performance. En outre, nous avons identifié les groupes CAVE (quatre brevets) afin de déterminer l'ensemble des variantes CAVE, y compris les systèmes portables ou à faible coût. Il est important de noter que certains brevets peuvent appartenir à plusieurs groupes.

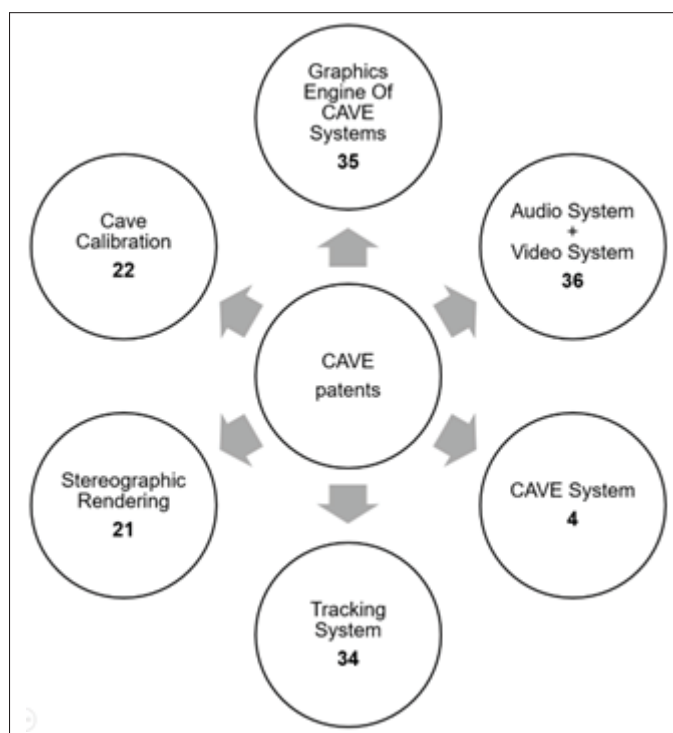


Figure 2.7 Analyses des clusters

2.6 Discussion

2.6.1 Développement technologique de CAVE

Les résultats de l'analyse par grappes montrent trois grands domaines de développement technologique : les systèmes audio/vidéo, les moteurs graphiques et les systèmes de suivi de mouvement. Les systèmes audio et vidéo sont essentiels pour créer une expérience immersive dans un environnement CAVE. Cela inclut les technologies de projection (Zhou & Li, 2014), les écrans haute résolution (Mayer, Odaker, Kolb, Müller & Kranzlmüller, 2024), les systèmes audio spatiaux (Zhou & Li, 2014) et les technologies de synchronisation audio/vidéo (Zhang *et al.*, 2020). Ces systèmes permettent la simulation d'environnements virtuels réalistes et immersifs, essentiels pour un large éventail d'applications telles que la formation immersive. Les moteurs graphiques sont au cœur des systèmes CAVE, permettant la génération en temps réel d'images 3D. Ils comprennent des algorithmes de rendu avancés, des techniques d'éclairage et des optimisations pour le traitement de volumes de données massifs. Ces moteurs garantissent une expérience fluide et réaliste, essentielle pour les simulations complexes et les environnements interactifs. Les systèmes de suivi des mouvements capturent les mouvements des utilisateurs dans l'environnement CAVE. Ils comprennent la capture de mouvements par caméra, des capteurs inertiels et des systèmes de localisation optique (Tseng, 2018). Un suivi précis des mouvements est essentiel pour une interaction naturelle et intuitive avec les environnements virtuels, améliorant ainsi l'engagement et l'efficacité des utilisateurs.

Le CPC met également en avant les aspects liés au développement technologique du système CAVE, suggérant deux domaines de développement majeurs : les dispositifs d'interaction avec le corps humain et la détermination de la position des objets en réalité mixte, le suivi ou les caméras. Ces dispositifs comprennent des interfaces homme-machine telles que des gants haptiques, des gilets à retour de force et des systèmes de reconnaissance gestuelle. Ces technologies permettent une interaction plus naturelle et immersive avec les environnements CAVE, augmentant ainsi leur utilité dans diverses applications telles que la formation médicale et la fabrication. Les technologies de détermination de la position des objets en réalité mixte permettent de suivre la

position spatiale et l'orientation des objets. Elles comprennent des caméras de réalité augmentée et de suivi des mouvements, fusionnant les mondes virtuel et réel, et améliorant les capacités du système CAVE pour les applications de réalité mixte et augmentée.

En résumé, les principales avancées technologiques dans le domaine des CAVE visent à améliorer l'immersion et l'interactivité dans les environnements virtuels. Les systèmes audio/vidéo et les moteurs graphiques avancés jouent un rôle crucial dans la création d'expériences immersives. Les systèmes de suivi des mouvements et les dispositifs d'interaction avec le corps humain permettent une interaction naturelle et intuitive, essentielle pour l'engagement des utilisateurs. De plus, les technologies de réalité mixte et les manipulations 3D sont essentielles pour les applications avancées dans divers domaines, allant de l'éducation aux simulations industrielles. Enfin, différentes configurations de systèmes CAVE sont en cours de développement afin de les rendre plus abordables et plus portables (Neira & Reiners, 2019). Ces progrès témoignent d'un intérêt croissant pour la création de systèmes CAVE fonctionnels dotés de capacités de rendu immersif.

2.6.2 Domaines d'application de CAVE

Six secteurs majeurs ont été analysés, notamment la réalité virtuelle, l'industrie manufacturière, le secteur médical et des soins de santé, l'automobile et l'éducation. La réalité virtuelle (fabrication d'équipements audio et vidéo) et l'industrie manufacturière sont les deux principaux domaines d'application, soulignant leur rôle important dans l'amélioration des expériences immersives. L'industrie du jeu vidéo, en particulier la fabrication de jeux vidéo électroniques, exploite également la technologie CAVE, soulignant son rôle dans la création d'expériences de jeu immersives et interactives. D'autres domaines incluent l'IHM, l'exploitation minière, le théâtre, le traitement vidéo, la photographie, le marketing, la resynchronisation, le design et le sport. La technologie CAVE est largement utilisée dans la recherche, le développement et la formation dans les secteurs médical et des soins de santé. Ces applications variées soulignent la polyvalence de la technologie CAVE et son potentiel d'innovation dans de nombreux secteurs.

2.6.3 Développement de la technologie CAVE

Les entreprises qui développent la technologie CAVE sont situées aux États-Unis et en Chine. En Chine, la société leader est Geely Holding Group, un groupe automobile qui développe depuis 2018 des outils de simulation VR pour les modèles de véhicules, et qui a finalement proposé un nouveau système CAVE en 2020 pour répondre à ses besoins technologiques. Cette approche de développement de produits basée sur les besoins spécifiques des utilisateurs, connue sous le nom de « centrage sur l'utilisateur », est un élément clé du concept de plus en plus populaire du design thinking. L'approche de cette société a contribué au développement d'un système CAVE répondant à ses défis en matière de conception automobile.

Aux États-Unis, la société leader est Lockheed Corporation, un fabricant du secteur aérospatial et de la défense. Elle s'est concentrée sur le développement d'environnements immersifs pour la technologie CAVE avec suivi des utilisateurs et capture de mouvement. Bien que la société ait depuis abandonné le développement de la technologie CAVE, ses brevets ont été fréquemment cités, avec 15 à 187 citations. Les entreprises dont les brevets sont très cités contribuent de manière significative au progrès technologique dans leurs domaines spécifiques (Breitzman & Moguee, 2002). Ces brevets très cités sont le signe d'innovations clés ou d'avancées technologiques majeures, soulignant leur importance pour les entreprises elles-mêmes et pour l'évolution globale de la technologie.

Cependant, même si les entreprises privées déposent un grand nombre de brevets, 23 brevets sont détenus par des universitaires pour diverses applications, notamment le développement d'un CAVE portable. La plupart de ces universitaires se trouvent également aux États-Unis et en Chine.

2.6.4 Tendances et dynamiques

La classification CPC et la taxonomie des composants/systèmes CAVE peuvent être utilisées pour mieux comprendre la technologie CAVE (figure 2.7). En conséquence, 22 variantes du système initial développé par Cruz et al. en 1992 et 1993 (Cruz-Neira, Sandin, DeFanti, Kenyon & Hart,

1992; Cruz-Neira *et al.*, 1993) et de nombreux domaines d'application de la technologie CAVE ont été identifiés. De plus, de nombreux brevets ciblent les composants technologiques CAVE, tels que les systèmes audio/vidéo combinés, les moteurs graphiques, les systèmes de suivi de mouvement, le rendu visuel et les systèmes d'étalonnage.

En matière d'innovation technologique, nous nous sommes concentrés sur des domaines peu explorés, tels que les systèmes comprenant des systèmes CAVE portables ou à faible coût. La technologie CAVE est coûteuse en termes de coûts initiaux et de frais de maintenance (Pivotto *et al.*, 2024). Il est utile d'examiner les brevets dans les domaines techniques moins courants sur la base des classifications CPC. Cette approche fournit aux fabricants et aux entreprises des informations précieuses sur les composants moins développés de la technologie CAVE. Les entreprises doivent élaborer des stratégies plus efficaces en matière de recherche et développement en identifiant les lacunes et les domaines émergents dans les portefeuilles de brevets. Par exemple, les brevets liés aux systèmes CAVE portables et abordables pourraient répondre aux limites actuelles et aux besoins du marché (Pivotto *et al.*, 2024).

L'analyse des brevets aide à identifier les lacunes technologiques et à comprendre la dynamique concurrentielle. Les brevets très cités, tels que ceux de Lockheed Corp., indiquent souvent des avancées technologiques significatives et une influence importante (Breitzman & Mogee, 2002). Les entreprises peuvent utiliser ces informations pour évaluer leurs innovations et identifier les acteurs clés et les collaborateurs ou concurrents potentiels.

2.7 Conclusion

Nous avons analysé l'évolution et l'état actuel de la technologie CAVE à travers une analyse des brevets. Les résultats indiquent une augmentation notable du nombre de brevets CAVE délivrés depuis sa création en 1992, reflétant l'intérêt croissant et les progrès réalisés dans ce domaine. De plus, une analyse par grappes basée sur le CPC fournit des informations sur les tendances technologiques et la dynamique concurrentielle de la technologie CAVE. En se concentrant sur des domaines peu explorés, les entreprises peuvent stimuler l'innovation,

réduire les coûts et améliorer l'efficacité et l'accessibilité des systèmes CAVE. Le large éventail d'applications, allant des soins de santé et de l'éducation à la fabrication industrielle et au divertissement, démontre la polyvalence et l'impact de la technologie CAVE. La répartition géographique des brevets et des demandeurs de brevets révèle que les États-Unis et la Chine sont en tête des dépôts de brevets sur la technologie CAVE. Si les innovations actuelles se concentrent sur l'amélioration des expériences immersives et de l'interaction avec l'utilisateur, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour explorer le développement de systèmes CAVE plus abordables et plus portables. À mesure que la technologie CAVE continue d'évoluer, elle peut révolutionner de nombreux secteurs en offrant des environnements virtuels immersifs qui redéfinissent l'expérience utilisateur.

CHAPITRE 3

LOW-COST AND TRANSPORTABLE CAVE SYSTEMS

Fatma Beji¹ , Isabelle Pivotto Dabat¹ , Vitor Matias² , William de Paula Ferreira¹

¹ Département de Génie des systèmes, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

² Département d'éducation et formation spécialisée, Université du Québec à Montréal ,
405 Rue Sainte-Catherine Est, Montréal, QC H2L 2C4

Article soumis dans « 34th IAMOT Conference : International Association for the Management of Technology 2025 », juin 2026

Le manuscrit présenté dans ce chapitre a été rédigé en collaboration avec mon directeur de recherche, William de Paula Ferreira, ainsi que Isabelle Pivotto Dabat et Vitor Matias. En tant que première auteure, ma contribution à cet article est estimée à 90 %. L'article a été soumis le 08 décembre 2024, il a été accepté le 5 juin 2025 et présenté lors de la conférence du 16 au 19 juin 2025 à Montréal. Cet article sera publié en juin 2025 et est référencé comme suit :Beji, F., Ferreira, W. D. P., Pivotto Dabat, I., & Matias, V. (2025). Low-Cost and Transportable CAVE Systems.

3.1 Résumé

Les systèmes CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) sont devenus une technologie majeure pour la création d'environnements virtuels immersifs et interactifs. Leurs applications couvrent de nombreux domaines, notamment l'éducation, la formation et la thérapie. Ces dernières années, on observe un intérêt croissant pour les systèmes CAVE peu coûteux et transportables afin d'améliorer leur accessibilité et leur facilité d'utilisation pour un public plus large. Malgré les progrès réalisés, la plupart des systèmes CAVE existants sont coûteux, complexes à installer et principalement conçus pour les instituts de recherche et les applications industrielles. Il existe des alternatives peu coûteuses, mais elles restent souvent inaccessibles financièrement ou ne disposent pas de la flexibilité nécessaire pour des interventions communautaires. De plus, les systèmes CAVE portables sont généralement limités aux environnements intérieurs, ce qui

restreint leur applicabilité à divers cas d'utilisation. Cette étude vise à analyser les systèmes CAVE existants afin d'identifier leurs forces et leurs limites en termes d'accessibilité financière, de portabilité, d'adaptabilité et de facilité d'utilisation. Pour ce faire, nous avons mené une analyse comparative à partir de données issues de la littérature scientifique, des brevets et de la littérature grise, en évaluant des paramètres clés tels que les composants du système, la rentabilité et les capacités d'interactivité. Sur la base de nos conclusions, nous proposons une architecture de système CAVE rentable et transportable, adaptée aux besoins des organisations communautaires, conçue pour faciliter diverses activités et soutenir les interventions auprès des enfants atteints de troubles du spectre autistique (ASD).

Mots clés : système CAVE ; Cube de simulation ; Chambre immersive ; réalité virtuelle ; Autisme.

3.2 Introduction

Les systèmes CAVE sont des environnements de réalité virtuelle (RV) avancés qui plongent les utilisateurs dans des espaces 3D interactifs. Ces systèmes peuvent être classés en deux catégories principales : les CAVE, qui utilisent des projections sur plusieurs murs environnants pour créer une expérience à presque 360 degrés, et les semi-CAVE, où la surface de projection offre une expérience à moins de 270 degrés (Pivotto *et al.*, 2024). Le niveau d'immersion dans un système CAVE dépend du nombre de surfaces de projection. Les systèmes comportant quatre à six murs créent une expérience plus immersive, tandis que ceux comportant moins de murs offrent une immersion moindre en raison d'un champ de vision plus limité. Leur mise en œuvre repose sur des techniques de projection directe ou indirecte, permettant d'afficher l'environnement virtuel sur les murs et les sols d'un espace dédié (Muhanna, 2015).

Comme décrit dans Comme décrit dans Comme décrit dans Manjrekar *et al.* (2014) et Beji *et al.* (2025), un système CAVE typique comprend six composants principaux : (1) un système audio qui améliore l'expérience grâce à un son spatial ; (2) un système vidéo qui utilise des projecteurs de haute qualité pour créer des images stéréoscopiques ; (3) des outils d'étalonnage pour garantir un alignement et un suivi précis de la projection ; (4) un rendu stéréographique pour

une perception réaliste de la profondeur en fournissant des vues différentes pour chaque œil ; (5) des systèmes de suivi qui détectent les mouvements de l'utilisateur et ajustent la perspective virtuelle de manière dynamique ; et (6) un moteur graphique qui gère le rendu d'environnements virtuels complexes.

Les systèmes CAVE représentent une innovation significative dans le domaine de la réalité virtuelle, offrant des environnements immersifs dans lesquels les utilisateurs peuvent interagir naturellement avec du contenu numérique. Contrairement aux casques de réalité virtuelle (HMD), les systèmes CAVE permettent aux utilisateurs de maintenir des interactions réelles entre eux, favorisant ainsi une expérience partagée et collaborative au sein de l'environnement virtuel. En projetant des scènes virtuelles sur plusieurs surfaces telles que les murs et les sols, les systèmes créent une expérience 3D qui reproduit la réalité physique, ce qui en fait des outils adaptés à diverses applications, notamment l'éducation, la formation, les soins de santé et le divertissement. L'intégration transparente de l'interactivité et de l'immersion a transformé ces systèmes en une référence pour les environnements virtuels avancés.

Malgré leurs avantages, les systèmes CAVE traditionnels sont souvent confrontés à des défis majeurs qui entravent leur adoption à grande échelle. Leurs coûts de développement et d'exploitation élevés, la nécessité d'une infrastructure physique dédiée et leur portabilité limitée les rendent inaccessibles aux petites organisations, en particulier dans les contextes où les ressources sont limitées. De plus, leur complexité et leur dépendance à des technologies propriétaires entraînent souvent une courbe d'apprentissage abrupte pour les utilisateurs, ce qui limite encore davantage leur utilisation dans des contextes plus larges (Muhanna, 2015). Ces dernières années, bien que des solutions CAVE portables et peu coûteuses aient commencé à voir le jour, la plupart des systèmes CAVE restent principalement conçus pour des environnements à budget élevé. Il s'agit notamment des universités et des laboratoires de recherche, des centres de formation industrielle et des activités de loisirs coûteuses. Les exigences importantes en matière d'infrastructure et les coûts élevés associés à ces systèmes limitent souvent leur accessibilité aux petites organisations ou aux applications communautaires.

Cela met en évidence une lacune importante : le besoin de systèmes CAVE abordables et portables adaptés aux environnements aux ressources limitées. De tels systèmes pourraient permettre aux organisations communautaires d'utiliser des environnements immersifs pour toute une série d'activités, notamment la sensibilisation éducative, les interventions thérapeutiques pour les personnes ayant des besoins spéciaux et les activités récréatives. Pour combler cette lacune, il est nécessaire de bien comprendre les systèmes CAVE existants, ainsi que leurs atouts et leurs limites en termes d'accessibilité financière, de portabilité, d'adaptabilité et de facilité d'utilisation. L'accessibilité financière ou physique fait référence au rapport coût-efficacité, en tenant compte à la fois des coûts initiaux et des dépenses à long terme. La portabilité concerne la facilité de déplacement et d'installation, notamment le poids du système, le temps d'assemblage et la transportabilité. L'adaptabilité fait référence à la capacité du système à fonctionner dans différents environnements, en tenant compte de ses composants et de ses différentes configurations pour une utilisation en intérieur et en extérieur. La facilité d'utilisation se concentre sur la facilité d'interactivité et l'expérience utilisateur, englobant la conception de l'interface, les mécanismes d'interactivité et l'accessibilité pour divers utilisateurs.

Pour relever ces défis, cet article vise à fournir une analyse comparative détaillée des solutions CAVE existantes, en mettant l'accent sur leurs composants système, leurs mécanismes d'interactivité et leur rentabilité. En soulignant les forces et les limites de chaque système, nous cherchons à identifier les facteurs clés qui influencent les quatre caractéristiques des CAVE.

Dans le cadre de cette analyse, nous proposons une architecture de système CAVE spécialement conçue pour surmonter les défis liés au coût et à la portabilité. Adaptée aux environnements aux ressources limitées, notre solution est destinée à soutenir les interventions éducatives et thérapeutiques, en mettant particulièrement l'accent sur les enfants autistes. En utilisant des composants abordables et des cadres open source, le système proposé vise à favoriser le développement des compétences sociales et communicatives grâce à des environnements virtuels immersifs et interactifs. Cette approche ouvre de nouvelles perspectives pour autonomiser les communautés défavorisées grâce à des expériences de réalité virtuelle riches, mettant la science au service de l'innovation sociale.

Le reste de cette étude est structuré comme suit. La section 3.3 décrit la méthodologie de recherche. La section 3.4 présente les résultats, la section 3.4.1 se concentrant sur l'analyse comparative des solutions CAVE existantes et la section 3.4.3 décrivant l'architecture proposée. La section 3.5 contient une discussion des résultats, tandis que la section 3.6 conclut l'étude et suggère des pistes pour de futures recherches.

3.3 Méthodologie

3.3.1 Conception de la recherche

Afin de développer une compréhension globale des systèmes CAVE existants et de proposer une architecture CAVE portable et peu coûteuse, nous avons adopté un plan de recherche en plusieurs phases comprenant cinq étapes clés.

1. **Analyse de brevets** : Nous avons analysé les systèmes CAVE brevetés existants, en nous concentrant spécifiquement sur les implémentations portables et peu coûteuses. L'objectif était d'identifier les stratégies de conception, les innovations techniques et les configurations modulaires qui améliorent l'accessibilité et l'adaptabilité dans des contextes où les ressources sont limitées.
2. **Revue systématique de la littérature** : Une recherche systématique a été menée à l'aide du protocole Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis (Page *et al.*, 2021) afin de garantir un processus de revue structuré et reproductible (Lorenzo, Newbutt & Lorenzo-Lledó, 2023). La recherche a été effectuée à l'aide de la base de données Scopus, selon une stratégie prédéfinie pour identifier, filtrer et sélectionner des études sur les systèmes CAVE portables et peu coûteux. Afin d'affiner davantage l'ensemble de données, une technique d'effet boule de neige a été utilisée, consistant à examiner les citations d'articles pertinents afin d'identifier des sources supplémentaires correspondant à notre champ de recherche.
3. **Analyse de la littérature grise** : étant donné que les implémentations commerciales et expérimentales de CAVE sont souvent documentées dans des rapports industriels et des

études de cas en ligne, nous avons effectué une recherche dans la littérature grise à l'aide de Google Search et Google Images. Cela nous a permis d'identifier des applications concrètes et des solutions pratiques au-delà des sources universitaires.

4. **Analyse comparative** : après avoir réalisé les trois analyses précédentes, nous avons procédé à une évaluation comparative des systèmes CAVE transportables identifiés afin d'évaluer leur accessibilité financière, leur portabilité, leur adaptabilité et leur facilité d'utilisation.
5. **Conception architecturale du CAVE** : Les exigences fondamentales pour un système CAVE peu coûteux et transportable ont été établies à la suite de consultations avec deux organismes communautaires qui offrent des services aux enfants ayant des besoins spéciaux, un psychologue spécialisé dans l'autisme et une analyse d'études de cas tirées de la documentation sur les systèmes CAVE à des fins éducatives. Une fois ces exigences définies, l'architecture a été développée sur la base des conclusions tirées de l'analyse comparative des systèmes CAVE existants. Ce processus a consisté à évaluer la faisabilité matérielle, les technologies de suivi, les configurations audiovisuelles, les mécanismes d'étalonnage et les dispositifs d'interaction afin de garantir une conception accessible et rentable, adaptée aux interventions communautaires.

3.3.2 Analyse de brevets

Tout d'abord, nous effectuons une analyse comparative des systèmes CAVE brevetés identifiés dans nos travaux précédents (Beji *et al.*, 2025). Cette recherche proposait un cadre de classification qui répartissait les systèmes CAVE en six composants distincts. Dans cet article, nous nous concentrons spécifiquement sur les systèmes CAVE portables et peu coûteux. Ces brevets sont particulièrement pertinents pour relever les défis liés à l'accessibilité financière, à la portabilité, à l'adaptabilité et à la facilité d'utilisation. En analysant les brevets, nous cherchons à identifier les composants du système, l'interactivité et la rentabilité. En nous appuyant sur notre analyse précédente des systèmes CAVE brevetés, nous identifions deux brevets qui illustrent les progrès réalisés dans le domaine des environnements immersifs portables. Ces brevets présentent des solutions innovantes visant à améliorer la modularité et l'adaptabilité. Le

premier brevet (Neira & Reiners, 2019) décrit un système d'environnement virtuel immersif conçu principalement pour des applications aérospatiales. Ce système intègre une architecture modulaire, un suivi de mouvement en temps réel et une visualisation basée sur la projection afin de créer un environnement de formation hautement interactif et immersif. Bien que son application principale soit la simulation de vol et la formation aéronautique, sa modularité offre des informations précieuses sur la conception de systèmes CAVE portables et adaptables. Le deuxième brevet (Xi & Zhicong, 2022) présente un système CAVE mobile et interactif qui met l'accent sur la portabilité et la modularité. Ce système utilise des écrans de projection amovibles, des projecteurs à focale ultra-courte et une interaction basée sur les gestes, ce qui en fait une alternative polyvalente et transportable aux configurations CAVE traditionnelles. Conçu à des fins éducatives, médicales et d'exposition, il réduit la complexité de l'installation et les exigences en matière d'infrastructure, rendant les environnements immersifs plus accessibles à diverses applications.

3.3.3 Revue systématique de la littérature

Deuxièmement, nous avons mené une analyse comparative de la littérature scientifique afin d'examiner les avancées de la recherche liées aux systèmes CAVE portables et peu coûteux, en nous basant sur les six composants du système CAVE décrits dans (Beji *et al.*, 2025). Notre recherche a été effectuée à l'aide de la base de données Scopus, en utilisant la chaîne de recherche systématique suivante : ((« CAVE » ET « immersif ») OU (« CAVE » ET « virtuel »)) ET (« portabl* » OU « transport* ») OU « mobil* » OU « lightweight » OU « compact » OU « scalable ») ET (« low-cost » OU « afford* » OU « cost-effective » OU « inexpensive » OU « economic* »). Au départ, cette recherche a donné 32 articles. Afin de garantir un processus de sélection rigoureux, nous avons appliqué des critères d'inclusion et d'exclusion prédéfinis. Le principal critère d'inclusion était la pertinence par rapport aux systèmes CAVE transportables, en mettant l'accent sur les études qui traitaient explicitement de la portabilité. Nous avons ensuite examiné manuellement les articles trouvés, en appliquant des critères d'exclusion afin d'affiner notre sélection. Nous avons exclu les études qui se concentraient exclusivement sur les systèmes HMD

plutôt que sur les systèmes CAVE. De plus, nous avons éliminé les articles qui comparaient principalement les HMD aux systèmes CAVE sans fournir d'informations substantielles sur les avancées technologiques spécifiques aux CAVE. À l'issue de cette phase de filtrage, six articles ont été retenus, car ils traitaient spécifiquement des technologies CAVE. Au cours d'une deuxième phase de sélection, nous avons procédé à une analyse plus détaillée des articles retenus. Cette analyse approfondie a révélé que certaines de ces études portaient sur des systèmes CAVE non transportables, qui ne relevaient pas du champ d'application de notre recherche. Étant donné que notre étude porte principalement sur des solutions CAVE portables et peu coûteuses, nous avons encore restreint notre sélection à trois articles qui fournissent des descriptions détaillées de mises en œuvre CAVE transportables. Afin d'enrichir notre ensemble de données, nous avons utilisé la technique de l'effet boule de neige (de Paula Ferreira *et al.*, 2020; Wohlin, 2014), une méthode largement utilisée dans les revues systématiques de la littérature. L'effet boule de neige consiste à identifier d'autres articles pertinents en examinant les listes de références des articles sélectionnés. Ce processus itératif permet de découvrir des recherches pertinentes qui n'auraient peut-être pas été trouvées lors de la recherche initiale dans la base de données. Grâce à cette approche, nous avons identifié cinq articles supplémentaires, qui traitent tous spécifiquement des systèmes CAVE transportables et rentables.

3.3.4 Littérature grise

Troisièmement, nous avons procédé à une analyse de la littérature grise, qui désigne les sources non évaluées par des pairs, telles que les rapports techniques, les livres blancs, la documentation industrielle et les référentiels en ligne (Garousi, Felderer & Mäntylä, 2019). La littérature grise est particulièrement précieuse dans les domaines technologiques émergents, où les développements industriels dépassent souvent les publications universitaires. Étant donné que les mises en œuvre commerciales et expérimentales de CAVE sont souvent documentées dans des rapports industriels, des brevets et des études de cas en ligne plutôt que dans des revues universitaires traditionnelles, l'analyse de la littérature grise fournit des informations essentielles sur l'état de l'art au-delà de la recherche universitaire. Notre recherche de littérature grise a été effectuée

à l'aide de Google Search et Google Images, en utilisant les mots-clés suivants : « CAVE immersive », « réalité virtuelle + transportable », « portable », « flexible », « démontable », « peu coûteux » et « abordable ». L'objectif de cette recherche était d'identifier les systèmes CAVE portables existants disponibles sur le marché et dans les applications industrielles. Grâce à cette recherche, nous avons identifié cinq solutions CAVE transportables. Cependant, après une enquête plus approfondie, nous avons constaté que certaines de ces solutions avaient été abandonnées.

3.4 Résultats

3.4.1 Analyse comparative

Cette section présente une analyse comparative des systèmes CAVE portables et peu coûteux basée sur la littérature scientifique, les brevets et les sources de littérature grise. L'analyse évalue chaque système selon plusieurs critères, notamment la configuration des CAVE, leur taille, le nombre d'utilisateurs, les composants du système (système audio/vidéo, rendu stéréographique, système de suivi, calibrage et moteur graphique) et leur coût. Notre objectif est d'identifier les modèles de conception, les limites techniques et les possibilités d'amélioration dans le développement d'un système CAVE accessible et transportable. Parmi les systèmes analysés, on trouve à la fois des CAVE entièrement immersifs et des semi-CAVE (Pivotto *et al.*, 2024). Les CAVE entièrement immersives comportent généralement quatre murs de projection ou plus, créant ainsi un environnement 3D complet, tandis que les semi-CAVE offrent moins de surfaces de projection (un à trois murs) afin de réduire les coûts matériels et d'améliorer la portabilité. Les dimensions physiques des systèmes CAVE varient considérablement, allant de configurations compactes à des environnements immersifs à grande échelle. Le plus petit système identifié est un système de réalité virtuelle de bureau (Chandramouli, Takahashi & Bertoline, 2014), qui utilise une configuration de télévision 3D. En revanche, les systèmes CAVE plus grands, tels que LIRKIS CAVE (Korečko, Hudák & Sobota, 2019) et ARCANE CAVE (Arcane Technologies), ont des dimensions supérieures à 2,5 m x 2,5 m x 3 m, offrant des surfaces de projection étendues

pour une immersion accrue. Certaines configurations, comme celles avec une structure de 3 m x 3 m x 2,5 m, visent à optimiser à la fois l'immersion et la portabilité (Miller, Misch & Dalton, 2005). Les systèmes plus compacts, tels que ROVE (Mechdyne), sont dotés d'une structure pliable qui permet un déploiement en moins de cinq minutes, mais avec un nombre réduit d'écrans. Les systèmes CAVE diffèrent également par leur capacité à accueillir des utilisateurs. Alors que certains sont conçus pour des expériences mono-utilisateur, d'autres prennent en charge plusieurs participants pour des interactions collaboratives. Le nombre d'utilisateurs pris en charge par un système varie également considérablement. La plupart des CAVE peuvent accueillir plusieurs utilisateurs, allant de 2 à 5 participants simultanément (Korečko *et al.*, 2019; Arcane Technologies). Cependant, d'autres implémentations restent axées sur un seul utilisateur et sont conçues spécifiquement pour des expériences éducatives individuelles (Chandramouli *et al.*, 2014). La facilité d'utilisation d'un système CAVE est largement définie par ses mécanismes d'interactivité et ses capacités multi-utilisateurs. Certaines implémentations (Miller *et al.*, 2005) prennent en charge les manettes de jeu sans fil, qui offrent des fonctionnalités de navigation de base mais ne permettent pas une interactivité immersive. Les systèmes plus avancés intègrent une interactivité basée sur les gestes, notamment le suivi des mains (Xi & Zhicong, 2022) et les contrôleurs sensibles au mouvement (Korečko *et al.*, 2019). De plus, certains systèmes CAVE intègrent des objets intelligents, tels que des casques EEG et des brassards Myo, élargissant ainsi les possibilités d'interaction neurophysiologique et d'engagement cognitif. Nous comparons également les différents composants du système. Le choix des composants audio et visuels a un impact significatif sur la qualité immersive des systèmes CAVE. En termes de capacités audio, certaines implémentations, comme LIRKIS CAVE (Korečko *et al.*, 2019), intègrent des systèmes de haut-parleurs multicanaux certifiés THX pour le rendu spatial du son, tandis que d'autres ne fournissent qu'un son stéréo de base ou ne disposent pas de spécifications sonores détaillées. La configuration de la projection vidéo varie considérablement entre les systèmes analysés. Certains utilisent des écrans de rétroprojection, comme on le voit dans (Pastorelli & Herrmann, 2013) et (Miller *et al.*, 2005), tandis que d'autres utilisent des panneaux LCD 3D passifs (Hayden, Ames, Turner, Keene & Andrus, 2015). La résolution d'écran varie également considérablement, allant de 1024 x 768 pixels par panneau dans les anciens systèmes à bas prix à la Full HD (1920

x 1080 pixels) dans les configurations plus récentes. Si les projecteurs restent la technologie d'affichage dominante, certains systèmes haut de gamme éliminent complètement les projecteurs au profit de panneaux LCD grand format, améliorant ainsi le contraste et la clarté de l'image (Korečko *et al.*, 2019). En termes de technologie de suivi, il existe des divergences importantes entre les systèmes. Les implémentations à moindre coût utilisent généralement des capteurs grand public tels que les manettes Wiimote (Pastorelli & Herrmann, 2013) ou les capteurs Kinect (Chandramouli *et al.*, 2014). Ceux-ci offrent des fonctionnalités de suivi de base, mais ne disposent pas de la précision requise pour des interactions virtuelles haute fidélité. En revanche, les systèmes plus avancés intègrent des caméras de capture de mouvement telles que OptiTrack et ART SMARTTRACK ou un suivi basé sur la technologie LiDAR (Xi & Zhicong, 2022). L'un des principaux défis des systèmes CAVE portables réside dans la complexité de leur calibrage. De nombreuses implémentations à faible coût reposent sur un alignement manuel des projecteurs, ce qui nécessite plusieurs heures de configuration. Par exemple, le système de Pastorelli & Herrmann (2013) nécessite environ 5 heures pour l'assemblage complet et le calibrage. Les solutions plus avancées intègrent des mécanismes d'étalonnage automatisés, mais ceux-ci restent limités aux modèles commerciaux haut de gamme. Les exigences informatiques des systèmes CAVE dépendent des performances de rendu en temps réel et de l'évolutivité du matériel. De nombreuses implémentations à faible coût s'appuient sur des GPU grand public, tels que les GPU Nvidia GeForce ou Quadro série 4000 (Miller *et al.*, 2005; Pastorelli & Herrmann, 2013). Les configurations plus sophistiquées utilisent des clusters de rendu multi-nœuds avec des GPU Nvidia Quadro K5000, permettant un rendu multithread en temps réel pour des environnements virtuels complexes (Korečko *et al.*, 2019). En termes de compatibilité logicielle, la plupart des CAVE à faible coût utilisent des frameworks ou des bibliothèques VR open source et largement disponibles. Les plateformes courantes comprennent Unity 3D, OpenGL et VRPN. Cependant, les systèmes propriétaires sont souvent équipés de moteurs de rendu personnalisés, intégrant un calcul multithread spécialisé pour le traitement en temps réel. Enfin, une variation significative des coûts a été observée entre les systèmes CAVE analysés. Certains sont explicitement étiquetés comme étant à faible coût, mais ne précisent pas leur prix, ce qui rend difficile toute comparaison en termes de rapport coût-efficacité. Certains systèmes

fournissent des estimations claires, avec des prix avoisinant les 30 000 € (Pastorelli & Herrmann, 2013) et 30 000 \$ (Miller *et al.*, 2005). Cependant, les solutions haut de gamme telles que LIRKIS CAVE (Korečko *et al.*, 2019) et ARCANE CAVE (Arcane Technologies) dépassent cette fourchette de prix, ce qui les rend inaccessibles pour les applications communautaires. Certaines solutions CAVE commerciales brevetées (Neira & Reiners, 2019; Xi & Zhicong, 2022) introduisent des stratégies de modularité et de réduction des coûts grâce à des écrans amovibles et un suivi basé sur les gestes.

3.4.2 Besoins

Dans le cadre des activités communautaires, du soutien aux interventions auprès d'enfants autistes et des activités de loisirs, l'un des principaux objectifs est de favoriser les interactions collaboratives tout en maintenant un environnement sensoriel contrôlé. Afin de favoriser l'engagement social, le système est conçu pour accueillir jusqu'à quatre utilisateurs, ce qui permet des interactions entre deux couples enfant-parent ou offre à un enfant la possibilité de collaborer avec un parent. Cette configuration encourage un engagement structuré tout en minimisant les risques de surstimulation. En ce qui concerne les dimensions spatiales, notre analyse des systèmes CAVE existants révèle que beaucoup d'entre eux ont une empreinte au sol de 3 m x 3 m. Par exemple, les modèles VisCube M4 et M5 ont des dimensions de 3,81 m de largeur, 2,55 m de profondeur et 2,97 m de hauteur (Visbox), tandis que le système VR portable à parois multiples de Miller mesure 3 m x 3 m x 2,5 m (Miller *et al.*, 2005). Ces configurations offrent suffisamment d'espace pour permettre des interactions en petits groupes sans nécessiter d'infrastructure physique importante. La portabilité est un autre facteur essentiel, car les organisations communautaires ne disposent souvent pas d'espaces dédiés pour des installations permanentes. C'est pourquoi notre système CAVE est conçu pour être transportable, ce qui permet de l'installer aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur. Cette flexibilité permet de mener diverses activités, notamment des programmes estivaux en plein air, ce qui renforce l'utilité du système dans différents contextes. Il est primordial de garantir la durabilité et la sécurité du système CAVE, en particulier dans les contextes où les transports fréquents et les

conditions environnementales variées sont des facteurs importants. Le système doit être conçu de manière à minimiser les risques de dommages matériels tout en maintenant un niveau élevé de sécurité opérationnelle. Cela nécessite l'intégration de composants structurels robustes, de boîtiers de protection et de mécanismes de sécurité pour protéger à la fois l'équipement et les utilisateurs. En privilégiant la résilience et la fiabilité, le système peut maintenir une utilisation à long terme et réduire les coûts de maintenance, améliorant ainsi son efficacité globale dans les milieux communautaires et éducatifs. Enfin, compte tenu des capacités financières des petites organisations communautaires, nous proposons de limiter le coût de notre système à un prix abordable, afin qu'il puisse bénéficier d'un financement public ou gouvernemental.

3.4.3 Architecture

Dans le cadre des activités communautaires, du soutien aux interventions auprès d'enfants autistes et des activités de loisirs, l'un des principaux objectifs est de favoriser les interactions collaboratives tout en maintenant un environnement sensoriel contrôlé. Afin de favoriser l'engagement social, le système est conçu pour accueillir jusqu'à quatre utilisateurs, ce qui permet des interactions entre deux couples enfant-parent ou offre à un enfant la possibilité de collaborer avec un parent. Cette configuration encourage un engagement structuré tout en minimisant les risques de surstimulation. En ce qui concerne les dimensions spatiales, notre analyse des systèmes CAVE existants révèle que beaucoup d'entre eux ont une empreinte au sol de 3 m x 3 m. Par exemple, les modèles VisCube M4 et M5 ont des dimensions de 3,81 m de largeur, 2,55 m de profondeur et 2,97 m de hauteur (Visbox), tandis que le système VR portable à parois multiples de Miller mesure 3 m x 3 m x 2,5 m (Miller *et al.*, 2005). Ces configurations offrent suffisamment d'espace pour permettre des interactions en petits groupes sans nécessiter d'infrastructure physique importante. La portabilité est un autre facteur essentiel, car les organisations communautaires ne disposent souvent pas d'espaces dédiés pour des installations permanentes. C'est pourquoi notre système CAVE est conçu pour être transportable, ce qui permet de l'installer aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur. Cette flexibilité permet de mener diverses activités, notamment des programmes estivaux en plein air, ce qui renforce

l'utilité du système dans différents contextes. Il est primordial de garantir la durabilité et la sécurité du système CAVE, en particulier dans les contextes où les transports fréquents et les conditions environnementales variées sont des facteurs importants. Le système doit être conçu de manière à minimiser les risques de dommages matériels tout en maintenant un niveau élevé de sécurité opérationnelle. Cela nécessite l'intégration de composants structurels robustes, de boîtiers de protection et de mécanismes de sécurité pour protéger à la fois l'équipement et les utilisateurs. En privilégiant la résilience et la fiabilité, le système peut maintenir une utilisation à long terme et réduire les coûts de maintenance, améliorant ainsi son efficacité globale dans les milieux communautaires et éducatifs. Enfin, compte tenu des capacités financières des petites organisations communautaires, nous proposons de limiter le coût de notre système à un prix abordable, afin qu'il puisse bénéficier d'un financement public ou gouvernemental.

3.5 Discussion

L'un des principaux défis liés au développement de systèmes CAVE portables et peu coûteux consiste à garantir leur accessibilité financière et leur disponibilité tout en conservant une expérience immersive riche. De nombreux systèmes CAVE intègrent des configurations matérielles complexes, nécessitant des technologies avancées de projection, de suivi et d'interaction pour offrir des expériences immersives. Des systèmes tels que l'environnement semi-immersif de Pastorelli & Herrmann (2013) et le système VR portable multi-parois de Miller *et al.* (2005) utilisent plusieurs projecteurs, outils d'étalonnage et dispositifs de suivi, ce qui contribue à une grande complexité d'installation et à des exigences de maintenance élevées. De plus, certains systèmes reposent sur des technologies propriétaires, ce qui limite encore davantage leur adaptabilité à divers cas d'utilisation. La portabilité reste un défi important, car de nombreux systèmes CAVE existants sont conçus exclusivement pour les environnements intérieurs et nécessitent des temps d'installation importants. Le système de Miller, par exemple, nécessite un temps d'installation de moins de deux heures avec l'aide de six personnes, tandis que la configuration de Pastorelli nécessite environ cinq heures pour l'assemblage complet et l'étalonnage (Pastorelli & Herrmann, 2013). Ces processus chronophages ne sont pas pratiques

pour les environnements dynamiques, en particulier lorsqu'il s'agit de travailler avec des enfants autistes qui peuvent bénéficier d'interactions spontanées et flexibles. Bien que plusieurs systèmes CAVE soient commercialisés comme des solutions à faible coût, leur prix reste un obstacle pour les organisations communautaires disposant de budgets limités. Par exemple, l'environnement semi-immersif de Pastorelli est estimé à environ 30 000 euros, et le système VR portable à murs multiples de Miller coûte moins de 30 000 dollars (Miller *et al.*, 2005). Bien que ces chiffres représentent une réduction des coûts par rapport aux installations CAVE traditionnelles, ils posent toujours des défis financiers aux petites organisations qui recherchent des solutions immersives accessibles. Pour développer un système CAVE à la fois transportable et abordable, tout en répondant aux besoins des enfants autistes dans le cadre d'interventions communautaires, plusieurs considérations de conception doivent être prises en compte. Pour relever ces défis, nous proposons le développement d'un système CAVE à la fois abordable et facilement transportable, spécialement conçu pour soutenir les interventions communautaires auprès des enfants autistes. En utilisant des matériaux peu coûteux et des logiciels libres, nous visons à réduire considérablement le coût global, afin de rendre cette technologie accessible aux organisations disposant de ressources financières limitées. Notre conception met l'accent sur la facilité d'assemblage et la portabilité, permettant des transitions rapides entre les environnements intérieurs et extérieurs. Cette flexibilité permet non seulement de s'adapter aux contraintes spatiales variables des organisations communautaires, mais aussi d'offrir un éventail d'activités plus large, y compris des programmes en plein air qui peuvent être particulièrement attrayants pendant les mois d'été. Conscients des sensibilités sensorielles associées aux TSA, notre système intègre un environnement audio adaptable. En intégrant des solutions de masquage sonore et en offrant un contrôle précis des niveaux audio, nous créons une expérience auditive personnalisable qui peut être adaptée aux besoins individuels, améliorant ainsi le confort et l'engagement.

3.6 Conclusion et travaux futurs

Notre étude a porté sur la conception et la mise en œuvre de systèmes CAVE peu coûteux et transportables, en mettant particulièrement l'accent sur leur accessibilité pour les organisations

communautaires qui viennent en aide aux enfants autistes. Grâce à une analyse comparative des solutions CAVE existantes, nous avons cerné les principaux défis liés à l'abordabilité, à la portabilité, à l'adaptabilité et à la facilité d'utilisation. Nos conclusions soulignent que, même si plusieurs systèmes sont abordables et transportables, ils restent souvent inaccessibles financièrement pour les petites organisations et nécessitent un temps d'installation considérable, ce qui limite leur application pratique. Pour surmonter ces défis, nous avons proposé des exigences et l'architecture d'un système CAVE modulaire et transportable qui concilie immersion, accessibilité financière et facilité de déploiement. Grâce à des configurations de projection flexibles, des technologies de suivi adaptables et un système audio soigneusement contrôlé, la conception proposée garantit un environnement virtuel sûr et attrayant, adapté aux enfants autistes. La capacité du système à prendre en charge des applications intérieures et extérieures renforce encore sa polyvalence, permettant un éventail plus large d'interventions éducatives et thérapeutiques. Notre étude révèle plusieurs défis pour les recherches futures. Tout d'abord, ces systèmes nécessitent des connaissances techniques pour leur installation et leur initialisation. Il est donc essentiel d'élaborer des lignes directrices complètes et clés en main à l'intention des organisations qui utilisent ces systèmes. En outre, des jeux ou des applications interactives doivent être développés afin d'assurer la compatibilité avec le système et de répondre à des objectifs éducatifs, thérapeutiques ou récréatifs spécifiques. Enfin, compte tenu des coûts importants associés à ces systèmes, il serait utile d'intégrer l'évolutivité dans la conception afin de minimiser la discontinuité de ces produits. Les travaux futurs se concentreront sur le prototypage et l'évaluation du système proposé. Une étude centrée sur l'utilisateur impliquant des enfants autistes sera menée afin d'évaluer la facilité d'utilisation, l'engagement et les avantages tant récréatifs qu'éducatifs. De plus, nous explorerons les optimisations possibles dans le choix du matériel et les mécanismes d'assemblage afin de réduire davantage les coûts tout en garantissant les performances, la durabilité et la facilité de déploiement.

CHAPITRE 4

DEVELOPING A PORTABLE CAVE SYSTEM FOR COMMUNITY-BASED ORGANIZATIONS

Fatma Beji¹, Isabelle Pivotto Dabat¹, Vitor Matias², William de Paula Ferreira¹

¹ Département de Génie des systèmes, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

² Département d'éducation et formation spécialisée, Université du Québec à Montréal,
405 Rue Sainte-Catherine Est, Montréal, QC H2L 2C4

Article soumis dans « XR SALENTO 2026 : International Conference on eXtended Reality »,
février 2026

Le manuscrit présenté dans ce chapitre a été rédigé en collaboration avec mon directeur de recherche, William de Paula Ferreira, ainsi que Isabelle Pivotto Dabat et Vitor Matias. En tant que première auteure, ma contribution à cet article est estimée à 90 %. L'article a été soumis le 27 février 2026.

4.1 Résumé

Les systèmes CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) offrent des espaces immersifs à projections multiples qui permettent une interaction naturelle, collaborative et incarnée sans avoir recours à des casques de réalité virtuelle. Malgré leurs avantages, la plupart des systèmes CAVE existants restent coûteux, non transportables et inadaptés au contexte des organisations communautaires, où la flexibilité, la rapidité d'installation et la sécurité sensorielle sont essentielles, en particulier pour les enfants autistes¹. Cet article vise à développer un prototype de système CAVE destiné aux organisations communautaires qui accompagnent les personnes autistes, afin de favoriser le développement des compétences sociales chez les enfants autistes. À l'aide d'une recherche en science de la conception, nous avons mené un cycle de développement complet comprenant la définition des besoins, le développement de l'architecture

¹ Dans cet article, les termes « personne autiste » ou « enfant autiste » sont utilisés plutôt que « personne ou enfant avec un TSA », afin de respecter la préférence d'une majorité de personnes autistes (Kenny *et al.*, 2016b; Fecteau *et al.*, 2024) et de s'éloigner d'un langage capacitiste qui définirait l'autisme comme une maladie (Bottema-Beutel, Kapp, Lester, Sasson & Hand, 2021).

structurelle et matérielle, l'intégration du suivi en temps réel, l'étalonnage de la projection, la conception d'interactions multisensorielles et la mise en œuvre de scénarios. Le système ainsi obtenu combine une structure modulaire repliable, une projection à ultra-courte focale, un suivi optique des mouvements et des scénarios de RV coopératifs conçus pour favoriser la communication, la collaboration et l'engagement conjoint. Cet article synthétise les résultats techniques, méthodologiques et expérientiels du développement du prototype et présente une base complète pour le déploiement de systèmes CAVE accessibles dans des environnements communautaires.

Mots clés : système CAVE; Réalité virtuelle; Environnements immersifs transportables; Prototypage; Autisme.

4.2 Introduction

Les systèmes CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) offrent des environnements de réalité virtuelle hautement immersifs, à l'échelle d'une pièce, grâce à la projection sur plusieurs surfaces et au suivi de mouvement en temps réel (Cruz-Neira *et al.*, 1992). Contrairement aux casques de réalité virtuelle (HMD), les CAVE permettent à plusieurs utilisateurs d'occuper le même espace physique, de maintenir un contact visuel naturel et de participer à des interactions collaboratives au sein d'un environnement virtuel partagé. Ces caractéristiques rendent les CAVE particulièrement utiles pour les applications sociales, éducatives et thérapeutiques, où la coprésence, la communication incarnée et l'interaction accessible sont essentielles (Pivotto *et al.*, 2024). Malgré leur potentiel, la plupart des systèmes CAVE existants souffrent de limitations majeures qui restreignent leur adoption en dehors des installations de recherche spécialisées ou industrielles (Muhanna, 2015). De plus, les technologies immersives basées sur des casques de réalité virtuelle peuvent poser problème pour certaines populations d'utilisateurs, en particulier les enfants autistes, pour qui les casques portables peuvent induire une surcharge sensorielle, une gêne ou de l'anxiété (Newbutt *et al.*, 2016). Les systèmes CAVE existants sont généralement des installations fixes coûteuses et de grande envergure qui nécessitent des salles dédiées, des

structures de montage sur mesure et des procédures d'étalonnage complexes (Beji *et al.*, 2026). Leur sophistication technique exige souvent une assistance continue de la part d'ingénieurs ou de techniciens qualifiés. En conséquence, les solutions CAVE actuelles ne sont ni transportables ni facilement déployables et restent trop complexes à utiliser pour la plupart des organisations communautaires qui proposent des activités participatives aux enfants autistes (Beji *et al.*, 2025). Ces institutions manquent souvent des ressources financières, de l'espace physique et de l'expertise technique nécessaires pour installer, entretenir ou déplacer de tels systèmes. Ces contraintes révèlent un problème plus large d'accessibilité technologique qui touche certains groupes de population, en particulier les organisations communautaires. Ce fossé souligne le besoin de solutions immersives qui soient abordables, transportables, faciles à assembler et intuitives à utiliser tout en offrant des expériences collaboratives de haute qualité (Beji *et al.*, 2026, 2025). Les enfants autistes rencontrent souvent des difficultés liées à la communication, aux interactions sociales, à la coordination motrice et à la régulation émotionnelle (American Psychiatric Association, 2013). La réalité virtuelle (RV) s'est imposée comme une approche technologique prometteuse pour relever ces défis grâce à des applications ciblées conçues pour l'intervention, la rééducation et le développement des compétences. En offrant des environnements contrôlés, prévisibles et motivants, les systèmes de VR permettent la mise en œuvre de scénarios thérapeutiques structurés, tels que la formation aux compétences sociales, les programmes d'intervention comportementale et les exercices de rééducation sensorimotrice, tout en permettant un contrôle précis des stimuli et de la complexité des tâches (Pivotto *et al.*, 2024; Lorenzo *et al.*, 2023). Cependant, les solutions de VR commerciales, en particulier les systèmes basés sur des casques de réalité virtuelle (HMD), présentent des obstacles importants pour cette population, notamment une surcharge sensorielle, une gêne physique, une visibilité réduite des partenaires sociaux et la dépendance à des manettes complexes (Pivotto, Matias, Beji, Cottet & Ferreira, 2026). De plus, il existe un manque de contenus de VR explicitement conçus pour favoriser l'engagement social et les comportements coopératifs chez les enfants autistes. Un système immersif transportable, non intrusif et basé sur la projection constitue une alternative intéressante, car il favorise les mouvements naturels, encourage le jeu partagé et réduit les contraintes sensorielles (Pivotto *et al.*, 2024). Cette étude de recherche répond à ces

défis par le développement d'un prototype de CAVE transportable et peu coûteux, spécialement conçu pour favoriser le développement des compétences sociales chez les enfants autistes. Deux articles précédents ont établi les fondements conceptuels de ce travail. Le premier a analysé 142 brevets liés à la technologie CAVE, identifiant six domaines technologiques clés et mettant en évidence un ensemble d'initiatives axées sur les systèmes portables et modulaires (Beji *et al.*, 2025). Le deuxième article a approfondi cette analyse par une étude comparative des solutions CAVE portables issues de la littérature scientifique, industrielle et grise, aboutissant à un ensemble d'exigences fonctionnelles, sensorielles et techniques pour une architecture CAVE abordable et adaptable adaptée aux environnements communautaires (Beji *et al.*, 2026). La principale contribution de cette étude est de présenter l'ensemble du processus d'ingénierie qui a présidé au développement d'un prototype de CAVE transportable, spécialement conçu pour les associations locales qui travaillent avec des enfants autistes. S'appuyant sur les besoins identifiés dans nos études précédentes, ce travail détaille la conception d'une architecture structurelle modulaire et portable, l'intégration de technologies de projection et de suivi adaptées, ainsi que le développement d'un scénario de réalité virtuelle simple pour tester le prototype. Cet article est structuré comme suit : la section 4.3 présente une revue de la littérature de référence. La section 4.4 détaille la méthodologie de recherche. La section 4.5 présente les résultats. La section 4.6 propose des discussions approfondies. Enfin, la section 4.7 conclut cette étude.

4.3 Revue de littérature

Les systèmes CAVE ont connu une évolution significative depuis leur apparition au début des années 1990 (Cruz-Neira *et al.*, 1992; Neira & Reiners, 2019). Conçus à l'origine comme des environnements de réalité virtuelle hautement immersifs à l'échelle d'une pièce, composés de multiples surfaces de projection et d'un suivi de mouvement en temps réel, ces systèmes se sont rapidement imposés comme de puissantes plateformes pour la visualisation scientifique, les simulations de formation et les expériences collaboratives (Cruz-Neira *et al.*, 1992). Leur principal avantage réside dans leur capacité à offrir une interaction immersive sans que les utilisateurs aient à porter de casques de réalité virtuelle, ce qui permet à plusieurs participants

de se voir les uns les autres, de se déplacer librement et de partager un espace physique et virtuel commun (Pivotto *et al.*, 2024). Au fil des ans, les avancées technologiques ont amélioré la résolution visuelle, la précision de l'étalonnage, la précision du suivi et les performances de rendu des systèmes CAVE. Les analyses de brevets révèlent que les innovations se concentrent autour de six grands domaines technologiques : les systèmes de projection, les techniques d'étalonnage, les sous-systèmes audio, le rendu stéréoscopique, les technologies de suivi et les moteurs graphiques (Beji *et al.*, 2025). Malgré ces développements, le paradigme dominant dans la conception des CAVE est resté largement inchangé : la plupart des systèmes commerciaux sont des installations fixes, structurellement rigides, coûteuses et dépendantes d'une infrastructure spécialisée. En conséquence, leur déploiement est généralement limité aux laboratoires de recherche, aux centres de simulation avancés et aux installations industrielles (Cruz-Neira *et al.*, 1992). Des travaux récents ont exploré différentes variantes de systèmes immersifs portables ou modulaires, mais notre précédente analyse comparative a montré que les solutions véritablement transportables restent rares (Pivotto *et al.*, 2024; Beji *et al.*, 2025). De nombreux systèmes dits « mobiles » reposent sur des panneaux lourds, des structures métalliques ou des mécanismes pliables fragiles qui limitent leur déploiement répété (Miller *et al.*, 2005; Pastorelli & Herrmann, 2013). D'autres compromettent la qualité de l'image en raison de projecteurs à faible flux lumineux ou nécessitent de longues procédures d'étalonnage incompatibles avec les environnements communautaires où les espaces sont partagés, limités dans le temps ou soumis à de fréquentes reconfigurations (Muhanna, 2015). De plus, les systèmes portables décrits dans la littérature grise ou industrielle sont souvent conçus pour des événements marketing ou des expositions temporaires, et non pour une utilisation thérapeutique répétée, une manipulation en toute sécurité par du personnel non technique, ou un déploiement dans les écoles et les centres communautaires (Beji *et al.*, 2025). Ces contraintes mettent en évidence un important fossé technologique : les systèmes existants répondent rarement à l'ensemble des exigences de portabilité, de faible coût, de montage rapide, de robustesse et de projection multisurface de haute qualité. Or, ces exigences sont particulièrement cruciales dans les contextes d'intervention impliquant des enfants autistes, où les technologies immersives doivent pouvoir être déployées dans des environnements non spécialisés tels que les écoles et les centres communautaires, tout en restant sûres, fiables et

adaptables à des besoins de développement variés. Parallèlement, les recherches sur la réalité virtuelle chez les enfants autistes ont démontré le potentiel des environnements immersifs pour favoriser la communication (Wolstencroft *et al.*, 2018), la coopération (Elor *et al.*, 2020), la régulation émotionnelle (Garzotto & Gelsomini, 2018) et l'engagement conjoint (Wallace *et al.*, 2010). Les activités en réalité virtuelle peuvent offrir des scénarios prévisibles, motivants et structurés qui réduisent l'anxiété sociale et permettent de s'entraîner aux interactions sociales dans un contexte contrôlé (Pivotto *et al.*, 2024, 2026). Cependant, la plupart des outils disponibles reposent sur des casques de réalité virtuelle, ce qui peut créer des obstacles pour les utilisateurs autistes, tels que la surcharge sensorielle, l'inconfort, une visibilité réduite des soignants et des difficultés avec les manettes à plusieurs boutons (Pivotto *et al.*, 2026). De nombreux enfants autistes présentent une sensibilité accrue aux sons, à la luminosité, aux mouvements et aux stimuli tactiles, ce qui rend l'utilisation d'appareils portables particulièrement difficile (Bozgeyikli, Rajj, Katkooi & Alqasemi, 2018). De plus, les jeux de VR existants intègrent rarement des mécanismes collaboratifs ou coopératifs, alors que les interventions visant à développer les compétences sociales chez les personnes autistes nécessitent souvent une attention partagée, la prise de parole à tour de rôle et la coprésence physique. Ces limites suggèrent que les systèmes immersifs basés sur la projection, tels que les CAVE, pourraient être intrinsèquement mieux adaptés aux interventions impliquant des enfants autistes et des personnes présentant des troubles du développement, car ils permettent aux enfants de se déplacer librement, de rester visibles pour les animateurs et d'interagir naturellement avec leurs pairs (Pivotto *et al.*, 2026). Le développement d'un prototype de CAVE transportable adapté aux enfants autistes nécessite donc de s'appuyer à la fois sur des considérations technologiques et expérientielles (Bonelli *et al.*, 2025). D'un point de vue technologique, le système doit concilier stabilité structurelle et modularité, garantir l'uniformité de la projection sur toutes les surfaces, offrir un suivi précis et à faible latence, et maintenir une cohérence visuelle malgré les variations de l'éclairage ambiant ou des dimensions de la pièce. D'un point de vue expérientiel, le système doit créer un environnement sensoriel prévisible, non intrusif et propice à l'interaction collaborative, tout en favorisant l'immersion et le sentiment de présence (Salame *et al.*, 2022). Ces caractéristiques sont particulièrement importantes dans les contextes axés sur l'autisme, où la

prévisibilité sensorielle et la stabilité de l'environnement influencent directement l'engagement de l'utilisateur (Bozgeyikli *et al.*, 2018). De plus, le système doit pouvoir être déployé dans des environnements communautaires où l'expertise technique est limitée et le temps d'installation restreint, afin de favoriser la participation sociale et d'élargir l'accès aux technologies immersives au-delà des cadres spécialisés.

4.4 Méthodologie

La méthodologie adoptée pour ce projet s'appuie sur la recherche en science de la conception (DSR), telle que décrite dans (de Paula Ferreira, Armellini, de Santa-Eulalia & Thomasset-Laperrière, 2022b), qui fournit un cadre itératif pour le développement et l'évaluation systématiques d'artefacts technologiques. Dans ce contexte, l'artefact correspond à un système CAVE transportable, et le processus de recherche alterne entre étude théorique, conception technique, prototypage et essais en conditions réelles. Le cadre méthodologique de la DSR a été complété par une approche de conception participative intégrée au processus de développement. À la suite de la conception d'un premier prototype, des retours d'expérience exploratoires ont été recueillis grâce à une utilisation en interne au sein de l'équipe de projet, comprenant des membres ayant une expérience et une sensibilisation aux considérations de conception liées à la neurodiversité. Ces retours d'expérience, utilisés à des fins de validation formative et d'amélioration de la conception, ont servi de base à une deuxième itération de prototypage, permettant ainsi d'affiner progressivement l'architecture du système et les mécanismes d'interaction. En parallèle, des activités exploratoires ont été menées au sein d'une organisation communautaire à l'aide de casques de réalité virtuelle disponibles dans le commerce. Ces activités n'étaient pas conçues comme des études formelles auprès des utilisateurs, mais ont servi à recueillir des retours informels de la part des enfants et des parents concernant l'accessibilité des casques, des manettes et des mécanismes d'interaction dans les jeux de VR existants. Bien que d'une portée limitée, ces observations ont fourni des informations précieuses sur les contraintes pratiques d'accessibilité et les défis liés à l'interaction, qui ont été consolidées en un ensemble d'exigences de conception ayant guidé le développement du deuxième prototype. L'étude s'est articulée autour de trois

cycles de conception itératifs, chacun correspondant à une phase spécifique de recherche, de développement technique et d'évaluation 4.2.

Image design research cycle

4.5 Résultats

4.5.1 Cycle 1 : Recherche exploratoires et résultats préliminaires

Le premier cycle de conception était de nature exploratoire et a permis de jeter les bases conceptuelles de cette recherche. Il s'articulait autour de deux axes de recherche complémentaires et parallèles. Le premier axe était axé sur une exploration technologique des systèmes CAVE existants, tandis que le second portait sur les aspects liés à l'utilisation et à l'expérience associés à l'application d'environnements immersifs pour favoriser le développement des compétences sociales chez les personnes autistes. Ce volet technologique a débuté par une analyse approfondie des brevets, présentée dans notre premier article, dans lequel des techniques d'exploration de données ont été appliquées à des ensembles de données extraits de la base de données Lens afin de cartographier les tendances technologiques, les innovations et les évolutions historiques liées aux systèmes CAVE. Cette analyse a mis en évidence six principaux domaines technologiques : l'étalonnage, le suivi, le rendu stéréoscopique, les systèmes audio et vidéo, ainsi que les moteurs graphiques, et a identifié un cluster spécifique axé sur les systèmes CAVE portables et à faible coût. Ce cluster est devenu central pour définir la portée de la recherche (Beji *et al.*, 2025). Partant de ces bases, nous avons mené une revue systématique de la littérature (RSL), complétée par des techniques de recherche en boule de neige et un examen approfondi de la littérature grise, y compris des études de cas industriels et des solutions issues du marché. Cette deuxième étape nous a permis d'évaluer les systèmes immersifs existants en fonction de critères tels que l'accessibilité financière, la modularité, la portabilité, la facilité d'utilisation et l'adaptabilité aux environnements communautaires. L'analyse comparative a confirmé l'existence d'un écart technologique et pratique majeur : bien qu'il existe plusieurs systèmes portables ou semi-portables, aucun ne répond de manière adéquate aux exigences combinées d'un montage rapide,

d'une cohérence de projection sur plusieurs surfaces, d'une transportabilité, d'une sécurité sensorielle et d'une adéquation aux besoins des enfants autistes (Beji *et al.*, 2026). Afin de garantir que le futur système soit adapté aux contraintes du monde réel, nous avons travaillé en collaboration avec des organisations communautaires et des spécialistes de l'autisme pour définir un ensemble d'exigences fonctionnelles, sensorielles et structurelles. Celles-ci comprenaient des considérations liées à la sensibilité au bruit, à la surstimulation visuelle, aux contraintes ergonomiques, à la sécurité, à la simplicité d'interaction et au besoin de tâches prévisibles et collaboratives. Ce processus de co-conception a abouti à la proposition d'une architecture conceptuelle pour un système CAVE modulaire, transportable et peu coûteux, ce qui a conclu le premier cycle de recherche et établi une feuille de route technique et conceptuelle pour le développement d'un prototype.

4.5.2 Cycle 2 : Développement et évaluation du prototype non transportable

Le deuxième cycle de conception s'articulait autour de deux volets complémentaires : une phase d'expérimentation visant à observer les comportements collaboratifs et les modèles d'interaction chez les enfants autistes à travers des expériences immersives en réalité virtuelle, et une phase de prototypage et d'exploration technique axée sur le développement et l'évaluation d'un premier système immersif basé sur la projection (Pivotto *et al.*, 2026). La composante expérimentale de ce cycle a débuté par des sessions de VR exploratoires menées au sein d'organisations communautaires, où des enfants autistes et leurs parents ont interagi avec une sélection de jeux de VR collaboratifs issus du catalogue Meta (Pivotto *et al.*, 2026). Ces activités ont servi de première forme de prototypage expérimental, une méthode qui évalue les concepts de conception en observant comment les utilisateurs interagissent avec des systèmes partiellement définis, voire sans rapport, dans des contextes réels. En plongeant les enfants dans des environnements de réalité virtuelle, nous avons pu identifier des comportements naturels, des réactions sensorielles et des sources de malaise ou d'intérêt qui n'auraient pas émergé lors d'entretiens ou de tâches contrôlées en laboratoire. Les parents ont simultanément joué le rôle d'observateurs, témoignant de la manière dont leurs enfants communiquaient, se coordonnaient et se partageaient les tâches

pendant les sessions. Après chaque activité, parents et enfants ont rempli des questionnaires structurés, ce qui nous a permis de quantifier les niveaux d'engagement, la difficulté perçue, le plaisir et le confort sensoriel. Les observations et les données issues des questionnaires ont permis de mieux comprendre quels schémas d'interaction favorisaient ou entravaient la collaboration. Ces séances ont également mis en évidence une limite majeure des jeux de réalité virtuelle commerciaux : bien que présentés comme collaboratifs, ils n'étaient pas conçus pour les utilisateurs autistes et reposaient souvent sur des manettes complexes, des stimuli imprévisibles ou des mécanismes d'interaction difficiles à suivre, ce qui entraînait parfois de la frustration ou un repli sur soi (Pivotto *et al.*, 2026). Au cours de ce cycle, nous avons également eu accès à Valyz, un système de projection immersif compact développé par REALYZ (produit discontinué). L'appareil comprend un projecteur 3D et des marqueurs optiques, mais la version dont nous disposions ne comportait pas l'ordinateur ni les logiciels d'origine. Afin de restaurer ses fonctionnalités, une phase de rétro-ingénierie a été menée dans le cadre du projet. Nous avons réinstallé le logiciel de suivi DTrack2 sur un ordinateur portable ASUS Alienware et configuré le système pour qu'il reconnaisse le matériel de suivi optique SmartTrack3 intégré à Valyz (ART, b). Dans cette configuration, le système SmartTrack3 s'appuyait sur deux caméras infrarouges capables de détecter des marqueurs réfléchissants fixés à des objets ou portés par les utilisateurs. Le moteur de jeu Unity s'interface avec le plugin DTrack2 (GitHub) pour acquérir les positions spatiales des marqueurs sphériques rétro-réfléchissants, ce qui nous a permis d'intégrer le suivi dans des environnements interactifs simples. Pour tester les modalités d'interaction, nous avons configuré une manette PlayStation 3 en y fixant des marqueurs réfléchissants et en l'enregistrant dans l'environnement DTrack2 en tant qu'objet suivi. Cela a permis au système de reconnaître la manette comme un dispositif d'interaction et de transmettre en temps réel sa position et son orientation à Unity, permettant ainsi aux utilisateurs de pointer et de manipuler des objets virtuels avec une précision spatiale. Une deuxième manette Xbox a été connectée sans fil à l'ordinateur portable via un récepteur standard compatible Windows, permettant une navigation à l'aide du joystick. Cette manette a été choisie en raison de sa conception axée sur l'accessibilité (Game Accessibility Guidelines). Ensemble, ces deux dispositifs ont permis une interaction simultanée entre deux utilisateurs : l'un interagissant via un suivi par marqueurs et

l'autre via une entrée classique par manette. Sur la base de ces résultats, nous avons assemblé un premier prototype de CAVE à trois murs en utilisant le projecteur 3D Valyz combiné à deux projecteurs 2D supplémentaires. Les projecteurs étaient connectés à l'ordinateur portable via un concentrateur à sorties multiples, permettant un rendu synchronisé sur les trois surfaces. Une fois la configuration de projection opérationnelle, nous avons développé un scénario interactif simple dans Unity : un labyrinthe tridimensionnel dans lequel les utilisateurs pouvaient se déplacer, explorer et manipuler des objets. Ce scénario a servi de banc d'essai pour évaluer l'immersion, la réactivité du suivi et l'interaction multi-utilisateurs au sein d'un environnement projeté. Outre ces tests exploratoires, le projet a intégré des éléments de conception participative lors de l'évaluation du premier prototype. Le système a été installé dans les locaux de notre partenaire industriel, où des ingénieurs et du personnel technique ont pu interagir directement avec le prototype. La conception participative met l'accent sur l'implication active des parties prenantes tout au long du processus de développement, garantissant ainsi que les choix de conception tiennent compte des contraintes pratiques et de l'expertise de terrain (Schuler & Namioka, 1993). Dans notre cas, l'équipe partenaire a contribué à plusieurs améliorations importantes. Par exemple, elle a aidé à résoudre les premiers problèmes liés au suivi des objets : les objets initialement suivis apparaissaient à des échelles irréalistes dans Unity, ce qui empêchait leur visualisation ou leur manipulation. Grâce à une démarche collective de recherche de correctifs aux systèmes, nous avons normalisé les dimensions des objets et obtenu un suivi en temps réel cohérent. L'équipe a également aidé à relever les défis liés à la gestion de la projection ; l'ordinateur portable ne pouvait initialement pas prendre en charge trois sorties simultanées, et leurs suggestions ont conduit à l'intégration d'un concentrateur multi-sorties qui a permis un rendu stable sur trois surfaces. Ces ajustements collaboratifs ont considérablement amélioré la facilité d'utilisation et la fiabilité du premier prototype et ont directement influencé les priorités du cycle de développement suivant. Bien que le prototype ait donné des résultats encourageants, il a révélé plusieurs limites importantes. Les trois projecteurs présentaient des différences de résolution, de luminosité et de rendu des couleurs, ce qui entraînait des incohérences visibles sur les surfaces de projection. Le système SmartTrack3, bien que fonctionnel, n'offrait qu'un volume de suivi limité en raison de sa configuration à deux caméras, ce qui restreignait l'espace

d'interaction utilisable à une zone frontale. Le système avait par ailleurs été retiré du marché par le fabricant, ce qui soulevait des inquiétudes quant à sa viabilité à long terme. De plus, l'installation structurelle n'était pas transportable et nécessitait une configuration fixe de la pièce, ce qui allait à l'encontre de l'objectif principal consistant à concevoir un système déployable dans des environnements communautaires. Les procédures d'étalonnage et de configuration étaient longues et exigeaient une expertise technique dont ne disposeraient pas les praticiens dans des contextes réels. Malgré ses limites, ce premier prototype a validé les principes essentiels pour les cycles de développement ultérieurs. Il a démontré que la projection multi-surfaces pouvait stimuler l'engagement et favoriser les comportements collaboratifs chez les enfants autistes. Il a également clarifié les exigences techniques nécessaires à un système pleinement fonctionnel et transportable, notamment la nécessité de projecteurs compatibles, d'une couverture de suivi améliorée, de procédures d'étalonnage robustes et d'une structure modulaire adaptée à une installation rapide. Ces enseignements ont directement influencé les décisions d'ingénierie qui ont façonné le troisième cycle de conception.

4.5.3 Conception et développement du prototype transportable

Le troisième cycle de conception visait à surmonter les contraintes techniques, ergonomiques et de sécurité identifiées dans le premier prototype et à mettre au point un système CAVE entièrement transportable adapté à un déploiement dans des environnements communautaires. Une attention particulière a été accordée à la stabilité de la projection, à la robustesse du suivi, à la sécurité structurelle et aux besoins sensoriels des enfants autistes. Ce cycle a nécessité une refonte complète de la configuration matérielle, de l'infrastructure de suivi et de la structure physique. Un premier problème concernait l'emplacement et l'hétérogénéité des projecteurs utilisés lors du cycle 2. Dans la configuration initiale, le projecteur Valyz 3D restait à l'intérieur de son compartiment, posé directement sur le sol, tandis que les deux projecteurs 2D supplémentaires étaient placés sur des supports de fortune : une table et un trépied de caméra. Cette configuration n'était ni stable ni sûre, d'autant plus que les enfants se déplacent librement dans l'environnement CAVE. De plus, les projecteurs présentaient des différences de luminosité,

de résolution et de format d'image, ce qui entraînait des incohérences visibles sur les surfaces de projection et réduisait l'immersion. Pour les enfants autistes, de telles incohérences peuvent être particulièrement problématiques, car une luminance irrégulière, un scintillement ou une distorsion spatiale peuvent entraîner un inconfort sensoriel, une charge cognitive accrue ou un désengagement. En conséquence, le système de projection a été repensé autour de trois projecteurs 3D à courte focale identiques offrant un contraste, une stabilité de la luminance et une résolution harmonisés. Cela a permis d'assurer une uniformité géométrique et photométrique sur toutes les surfaces de projection et d'améliorer considérablement la prévisibilité visuelle, un facteur essentiel pour favoriser le confort sensoriel des enfants autistes. Un deuxième axe majeur d'amélioration concernait le système de suivi. Compte tenu des limites du système SmartTrack3 – volume de suivi restreint en raison de sa configuration à deux caméras, robustesse limitée et arrêt de la commercialisation –, nous avons procédé à une comparaison structurée de plusieurs systèmes alternatifs : OptiTrack, WorldViz VZTrack et le système moderne ART SmartTrack6/M (ART, a). Les critères comprenaient la précision de suivi, la latence, la couverture, la stabilité, la prise en charge multi-utilisateurs, la facilité d'étalonnage, la maintenabilité à long terme, le coût et l'adéquation à une configuration transportable. Opti-Track est une solution de suivi optique bien établie qui offre une excellente précision de positionnement. Cependant, notre analyse a révélé une limitation majeure : bien qu'il prenne en charge le suivi des utilisateurs, ses workflows d'intégration standard ne prennent pas facilement en charge l'interaction basée sur les objets au sein d'une configuration CAVE. OptiTrack excelle dans la capture des mouvements du corps entier ou des positions de la tête, mais nécessite du matériel supplémentaire, des intergiciels et des étapes d'étalonnage pour permettre une interaction précise avec des éléments virtuels. WorldViz VZTrack, utilisé dans le CAVE LaRTIC de l'ETS, offre des performances robustes et un suivi à fréquence d'images élevée (Beji *et al.*, 2026). Cependant, nos tests exploratoires en environnement de laboratoire ont mis en évidence deux défis majeurs. Premièrement, le système fonctionne comme une solution propriétaire fermée de type « boîte noire », ce qui rend difficile l'accès aux données de suivi de bas niveau ou l'intégration de scénarios interactifs personnalisés via Unity. Deuxièmement, les coûts d'acquisition et de maintenance sont nettement plus élevés que ceux d'autres systèmes, ce qui va à l'encontre des contraintes de coût établies lors du cycle

1. SmartTrack6/M s'est imposé comme la solution la plus appropriée. Sa configuration à quatre caméras offre une large couverture et une grande stabilité tout en conservant un processus de calibrage simplifié compatible avec les installations portables. Le système s'intègre parfaitement à ODTrack3 et Unity, garantissant un suivi multi-utilisateurs robuste et fournit une estimation de la pose à haute fréquence, essentielle pour une interaction fluide. Ces caractéristiques correspondaient étroitement à la fois aux exigences techniques établies lors du cycle 1 et aux considérations sensorielles observées lors des activités de VR avec des enfants. L'infrastructure informatique a été mise à niveau en conséquence. Une station de travail Lenovo haute performance, équipée d'un GPU de la série RTX, d'un processeur multicœur et de plusieurs sorties vidéo, a été choisie pour prendre en charge le rendu simultané en temps réel sur trois murs de projection. Cela a permis d'assurer des fréquences d'images stables et une faible latence, réduisant ainsi les saccades et l'instabilité visuelle, deux facteurs susceptibles d'avoir un impact négatif sur le confort sensoriel des utilisateurs autistes. La station de travail a également facilité l'intégration du système SmartTrack6/M, en gérant les flux de suivi et le pipeline de rendu Unity sans dégradation des performances. (3) une enceinte gonflable. Chaque conception a fait l'objet d'une analyse mécanique et ergonomique préliminaire. Si le premier concept garantissait une rigidité structurelle, son poids élevé (170 lbs par paroi) entraînait une logistique complexe, des coûts de transport plus élevés et une difficulté accrue de montage et de déplacement, ce qui le rendait inadapté à une CAVE portable et fréquemment reconfigurable. Le deuxième concept était léger mais pas assez robuste pour être utilisé avec des enfants et incapable de supporter des projecteurs fixés. L'option gonflable optimisait la transportabilité mais manquait de stabilité structurelle et ne pouvait pas supporter d'équipement suspendu.

Sur la base de ces analyses, l'équipe a proposé et affiné un quatrième concept : un cadre en aluminium à la fois rigide et modulaire, construit à l'aide de la plateforme Vention. Ce système offrait un équilibre entre stabilité structurelle, portabilité et modularité. Le cadre permet un montage rapide, intègre des dispositifs de stabilité axés sur la sécurité et fournit des points de fixation standardisés pour les projecteurs, les caméras et le passage des câbles. Des écrans de projection en tissu ont été choisis comme surfaces murales car ils sont légers, plats, faciles à

tendre et transportables tout en conservant une uniformité optique suffisante. Nous avons réalisé un modèle 3D complet de cette structure à l'aide des outils de CAO de Vention, incluant le positionnement détaillé de tous les équipements (figure 4.1). Les caméras Smart-Track6/M ont été montées aux quatre coins supérieurs de la structure afin de maximiser la couverture de suivi, tandis que les trois projecteurs ont été installés sur la poutre centrale en hauteur pour garantir un alignement précis et minimiser les occlusions. Des goulottes de gestion des câbles et un point de fixation dédié au poste de travail ont été intégrés le long du côté droit de la structure, garantissant un déploiement sûr et organisé dans des environnements où les enfants interagissent librement avec le système.

Cette structure repensée a permis de remédier aux principales limites identifiées lors du cycle 2. Elle a éliminé l'instabilité du projecteur, réduit les risques pour la sécurité, amélioré l'uniformité de la projection et permis un suivi fiable sur l'ensemble de l'espace d'interaction. De plus, sa conception modulaire a considérablement réduit le temps de montage et a permis de transporter, d'installer et de calibrer le système dans divers milieux communautaires.

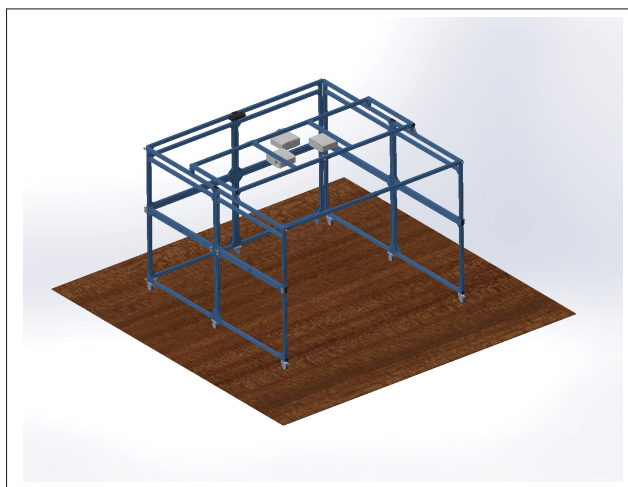


Figure 4.1 Prototype CAVE 3D

4.6 Discussion

Les résultats de cette recherche découlent de l'affinement progressif du système au cours des trois cycles de conception, chacun apportant des enseignements spécifiques qui ont façonné le développement du prototype final de CAVE transportable. Tout au long de ces cycles, les observations techniques, les retours d'expérience et les évaluations centrées sur l'utilisateur ont guidé l'évolution de l'architecture, le choix des composants et la conception des interactions. Cette section synthétise les principaux résultats de chaque cycle et met en évidence la manière dont ils ont collectivement contribué à la conception du système final. Le premier cycle de conception a permis de poser les bases conceptuelles et analytiques nécessaires pour justifier le développement d'une nouvelle architecture CAVE. L'analyse des brevets a révélé un vaste panorama d'innovations réparties sur six domaines technologiques, mais a également mis en évidence la rareté des solutions portables entièrement intégrées. L'ensemble des brevets relatifs aux systèmes CAVE transportables montrait des tentatives fragmentées d'introduire des structures pliables, des matériaux légers ou des mécanismes d'étalonnage simplifiés, mais aucun ne proposait une architecture cohérente capable de prendre en charge la projection sur plusieurs murs, l'interaction multi-utilisateurs et un montage rapide. L'analyse documentaire systématique a confirmé ces observations : les systèmes portables existants manquaient souvent de rigidité structurelle, offraient une qualité de projection limitée ou reposaient sur des solutions propriétaires qui les rendaient financièrement inaccessibles. L'analyse comparative a démontré que les organisations communautaires, en particulier celles travaillant avec des enfants autistes, ont besoin de systèmes immersifs qui soient sûrs, prévisibles et faciles à transporter et à déployer dans des pièces de forme irrégulière. En combinant ces résultats, le premier cycle a abouti à un ensemble d'exigences fonctionnelles et sensorielles détaillées, incluant des contraintes liées au bruit, à la luminosité, à l'espace au sol, au temps d'installation et à la simplicité d'interaction. Ces exigences ont fourni une feuille de route claire pour le développement du premier prototype. Le deuxième cycle de conception a abouti à la première version pleinement fonctionnelle du système et nous a permis de valider plusieurs hypothèses techniques et expérientielles. Le prototype développé chez Productique Québec intégrait une projection multi-murs, un suivi

optique utilisant le système DTrack2, ainsi qu'un ensemble de scénarios interactifs simples conçus dans Unity. Le déploiement de ce prototype dans des environnements communautaires a fourni des informations essentielles sur ses atouts et ses limites. Sur le plan technique, nous avons confirmé que la projection multi-murs améliore considérablement l'engagement et facilite le partage de l'attention entre les enfants, et que le suivi optique permet des interactions fluides et intuitives avec les éléments virtuels. Cependant, les essais sur le terrain ont également révélé de multiples lacunes. Les trois projecteurs utilisés dans cette version produisaient une luminosité et une résolution hétérogènes d'un mur à l'autre, ce qui entraînait des incohérences visuelles. La structure, bien que fonctionnelle, n'était pas transportable et nécessitait un environnement de laboratoire dédié pour son installation. L'ancien système DTrack2, bien qu'opérationnel, manquait de stabilité et de support à long terme, et la procédure d'étalonnage était trop complexe pour un personnel non spécialisé. Plus important encore, le processus d'installation était incompatible avec un déploiement rapide : l'assemblage du système exigeait beaucoup de temps et d'expertise technique, ce qui le rendait inadapté à une utilisation régulière dans les écoles et les organisations communautaires. Malgré ces limites, le premier prototype a validé la faisabilité d'offrir des expériences collaboratives immersives aux enfants autistes et a fourni des retours précieux sur les préférences sensorielles, le rythme des interactions et les schémas de mouvement. Ces informations sont devenues des contributions essentielles pour le troisième cycle. Le troisième cycle de conception a donné naissance au prototype CAVE de deuxième génération, qui constitue la principale contribution technique de cette recherche. Ce cycle a abouti à un système entièrement transportable, structurellement robuste, visuellement cohérent et adapté aux profils sensoriels et cognitifs des enfants autistes. Le prototype final repose sur une structure modulaire en profilés d'aluminium développée, formant une configuration à trois parois d'une superficie d'environ 3 m × 3 m, d'une hauteur d'environ 2,2 m et d'un poids total d'environ 150 kg (figure 4.2) . Plusieurs avancées majeures caractérisent les résultats de ce dernier cycle. Tout d'abord, la refonte structurelle a abouti à un châssis modulaire pliable pouvant être assemblé en moins d'une heure sans outils spécialisés. Des analyses mécaniques ont guidé le choix de matériaux légers, garantissant à la fois stabilité et portabilité, tandis que l'utilisation de surfaces de projection en textile a permis une mise en tension rapide et réduit la

déformation de la surface. Deuxièmement, le système de projection a été entièrement repensé à l'aide de projecteurs laser à ultra-courte focale, qui ont permis d'obtenir une luminosité uniforme, de réduire les ombres et de faciliter le déploiement dans des pièces plus petites. Troisièmement, l'intégration du système de suivi ARTTRACK 6/M a considérablement amélioré la précision, la latence et les capacités de suivi multi-utilisateurs, tout en garantissant un support technique à long terme et la compatibilité avec les environnements logiciels modernes. Quatrièmement, la pile logicielle a été améliorée pour prendre en charge le rendu multi-murs, la correction de la distorsion, l'interaction en temps réel et des scénarios collaboratifs spécialement conçus pour favoriser la communication et la coopération entre les enfants autistes. Les tests menés au cours de ce cycle, tant dans des environnements contrôlés que lors de séances de prototypage expérimental en milieu communautaire, ont mis en évidence des améliorations substantielles en matière de convivialité, de transportabilité et d'engagement des utilisateurs. Les enfants ont systématiquement manifesté des réactions positives face à l'environnement repensé, en faisant preuve d'une participation accrue, d'une anxiété réduite et d'une plus grande volonté de collaborer avec leurs pairs par rapport aux tests précédents. Les animateurs et les éducateurs ont indiqué que la nature immersive mais non intrusive du système facilitait la structuration des activités et favorisait le développement des compétences sociales. Les performances techniques du système se sont révélées stables sur plusieurs installations, confirmant la faisabilité de l'introduction de la réalité virtuelle immersive dans des environnements aux ressources limitées et aux configurations physiques variables. Dans l'ensemble, les résultats des trois cycles illustrent une progression allant de l'exploration conceptuelle à l'innovation technique et à la validation pratique. Le prototype final intègre avec succès les exigences technologiques, sensorielles et contextuelles identifiées tout au long du projet et représente une avancée significative vers des environnements immersifs accessibles, portables et adaptés à l'autisme. La section suivante fournit une description technique détaillée de l'architecture du système et des composants qui caractérisent ce prototype final. L'objectif principal de ce travail était de concevoir, développer et évaluer un système CAVE transportable capable d'offrir des expériences immersives et collaboratives dans des environnements communautaires, en accordant une attention particulière aux besoins sensoriels et pratiques des enfants autistes.

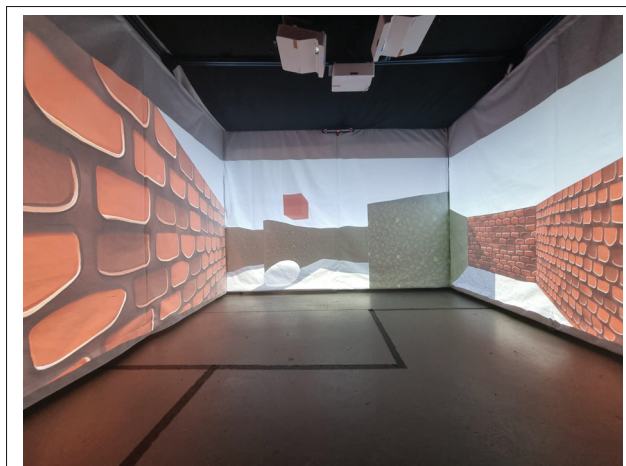


Figure 4.2 Prototype CAVE

Les résultats démontrent que cet objectif a été largement atteint grâce à l'amélioration progressive du système au cours de trois cycles de conception itératifs. D'un point de vue technologique, le prototype final réussit à concilier plusieurs contraintes rarement prises en compte simultanément dans les systèmes CAVE existants : modularité, portabilité, cohérence de la projection sur plusieurs surfaces et interaction multi-utilisateurs en temps réel. La structure modulaire en aluminium permet un montage et un démontage rapides. D'un point de vue expérientiel, l'approche basée sur la projection s'est avérée particulièrement bien adaptée aux contextes axés sur l'autisme. Contrairement aux systèmes basés sur des casques de réalité virtuelle, le CAVE permet aux utilisateurs de rester visibles pour les animateurs et leurs pairs, de se déplacer librement dans l'environnement et de participer à des activités partagées sans porter d'équipement intrusif. Les observations recueillies au cours des sessions d'évaluation suggèrent que ces caractéristiques facilitent l'attention conjointe, la coopération et l'engagement, qui sont des objectifs centraux des interventions visant à développer les compétences sociales. L'un des choix conceptuels majeurs de ce projet a été l'adoption d'une configuration à trois parois plutôt que d'une CAVE entièrement fermée à quatre ou cinq parois. Cette architecture de semi-CAVE présente à la fois des avantages et des limites. Du côté positif, la configuration à trois parois réduit considérablement la complexité structurelle, le poids et le coût, ce qui va directement dans le sens des objectifs de transportabilité et de déploiement rapide. Elle

améliore également la sécurité et l'accessibilité dans les environnements communautaires en conservant un côté ouvert par lequel les animateurs peuvent facilement entrer dans l'espace, surveiller les participants et intervenir si nécessaire. Pour les enfants autistes, cette ouverture peut réduire le sentiment d'enfermement ou d'anxiété tout en préservant une forte sensation d'immersion. Cependant, cette configuration limite également le niveau d'enfermement visuel par rapport aux CAVE entièrement immersives, ce qui peut réduire l'immersion dans des scénarios qui reposent fortement sur la vision périphérique ou l'encapsulation spatiale totale. Bien que les résultats indiquent que la projection sur trois murs est suffisante pour favoriser l'engagement et l'interaction collaborative, de futures études pourraient explorer des configurations adaptatives permettant au système de passer d'un mode semi-fermé à un mode entièrement fermé en fonction du contexte et des besoins des utilisateurs. À ce stade, les scénarios interactifs mis en œuvre dans le CAVE étaient volontairement simples et servaient avant tout de bancs d'essai techniques et expérientiels. Ce travail était axé sur la conception et la validation de la plateforme immersive, tandis que le développement de scénarios d'interaction plus riches se poursuit. Ces environnements préliminaires nous ont permis d'évaluer la qualité de la projection, la fiabilité du suivi, l'interaction multi-utilisateurs et le confort sensoriel sans introduire de complexité supplémentaire. Malgré ses atouts, le système proposé reste limité par plusieurs facteurs techniques et économiques. Bien que le système ARTTRACK 6/M ait été initialement envisagé pour ses performances améliorées, le prototype final s'appuie sur le système DTrack3 déjà disponible dans notre laboratoire, principalement en raison de contraintes budgétaires. En effet, dans un contexte communautaire, le coût final du prototype est très élevé, alors que DTrack3 offre des performances de suivi acceptables ; les systèmes de suivi optique représentent en général une part importante du coût global du système, ce qui peut limiter l'accessibilité pour les petites organisations. Cette observation souligne l'importance d'explorer d'autres approches de suivi. Une piste prometteuse consiste à développer un système de suivi sur mesure basé sur des caméras RVB ou de profondeur, combiné à des techniques de vision par ordinateur et d'apprentissage automatique. Une telle approche pourrait réduire considérablement les coûts matériels tout en permettant une interaction sans marqueurs (Pivotto *et al.*, 2024). Cependant, elle soulève de nouveaux défis liés à la robustesse, à la latence, aux conditions d'éclairage et à la

discrimination multi-utilisateurs, qui doivent être soigneusement pris en compte avant qu'elle ne puisse remplacer les solutions de suivi optique haut de gamme dans les environnements immersifs.

De même, si le cadre en aluminium offre un bon équilibre entre stabilité et modularité, il n'en reste pas moins une solution relativement coûteuse. Les prochaines versions pourraient explorer d'autres matériaux ou des conceptions structurelles hybrides permettant de réduire davantage les coûts tout en garantissant la sécurité et la facilité de montage.

4.7 Conclusion et perspectives

L'objectif principal de ce travail était de concevoir, développer et évaluer un système CAVE portable capable d'offrir des expériences immersives et collaboratives dans des environnements communautaires, en accordant une attention particulière aux besoins sensoriels et pratiques des enfants autistes. Les résultats démontrent que cet objectif a été largement atteint grâce à l'amélioration progressive du système au cours de trois cycles de conception itératifs. D'un point de vue technologique, le prototype final réussit à concilier des contraintes rarement prises en compte simultanément dans les systèmes CAVE existants, notamment la modularité, la portabilité, la cohérence de la projection sur plusieurs surfaces et l'interaction multi-utilisateurs en temps réel. La structure modulaire en aluminium permet un montage et un démontage rapides, tandis que l'approche basée sur la projection s'est avérée particulièrement bien adaptée aux contextes axés sur l'autisme. Contrairement aux systèmes basés sur des casques de réalité virtuelle, le CAVE permet aux utilisateurs de rester visibles pour les animateurs et leurs pairs, de se déplacer librement dans l'environnement et de participer à des activités communes sans porter d'équipement encombrant. Les observations recueillies au cours des sessions d'évaluation suggèrent que ces caractéristiques favorisent l'attention conjointe, la coopération et l'engagement, qui sont des objectifs centraux des interventions visant à développer les compétences sociales. L'un des choix conceptuels majeurs de ce travail a été l'adoption d'une configuration à trois parois plutôt que d'un CAVE entièrement clos à quatre ou cinq parois. Cette architecture de semi-CAVE offre des avantages évidents en termes de transportabilité, de sécurité et d'accessibilité,

en particulier dans les contextes communautaires où un déploiement rapide et la supervision d'un animateur sont essentiels. Le côté ouvert facilite la surveillance et l'intervention, et peut réduire l'anxiété ou le sentiment d'enfermement chez les enfants autistes. Cependant, cette configuration limite également le niveau d'enfermement visuel par rapport aux systèmes totalement immersifs. Si les résultats indiquent que la projection sur trois parois est suffisante pour favoriser l'engagement et l'interaction collaborative, elle ne permet peut-être pas de reproduire pleinement la continuité perceptuelle offerte par les CAVE fermés dans tous les scénarios. À ce stade, les scénarios interactifs mis en œuvre dans le CAVE étaient volontairement simples et servaient avant tout de bancs d'essai techniques et expérimentiels. Ce travail était axé sur la conception et la validation de la plateforme immersive, tandis que le développement de scénarios d'interaction plus riches se poursuit. Ces environnements préliminaires ont permis d'évaluer la qualité de la projection, la fiabilité du suivi, l'interaction multi-utilisateurs et le confort sensoriel sans introduire de complexité inutile. Enfin, plusieurs limites mettent en évidence des pistes pour les développements futurs. Le recours à des systèmes de suivi optique, bien qu'il garantisse une grande précision et une robustesse, contribue de manière significative au coût global du système. Parallèlement, le châssis structurel en aluminium, bien qu'efficace en termes de stabilité et de modularité, reste un facteur de coût non négligeable. Ces contraintes suggèrent des possibilités d'optimisation supplémentaire, tant au niveau des technologies d'interaction que de la conception structurelle. L'une des principales orientations des travaux futurs sera le développement d'un système de suivi sur mesure et à faible coût, adapté aux besoins des environnements immersifs transportables. Un tel système viserait à réduire la dépendance vis-à-vis des solutions commerciales coûteuses de suivi optique, tout en conservant une précision et une robustesse suffisantes pour des scénarios d'interaction collaborative impliquant des enfants autistes.

CHAPITRE 5

DISCUSSION GÉNÉRALE

Ce chapitre vise à proposer une analyse transversale des résultats présentés dans les trois articles constituant ce mémoire, en mettant en évidence leur complémentarité et en discutant de manière intégrée les apports scientifiques, technologiques et applicatifs du projet de recherche. Ainsi, après un bref rappel de la démarche de recherche, la discussion sera structurée autour des objectifs de recherche.

En adoptant une démarche DSR, ce mémoire s'inscrit dans une logique progressive et itérative, structurée autour de trois cycles de recherche. Chacun de ces cycles a permis de répondre à une dimension spécifique de la problématique initiale et de contribuer à l'atteinte des objectifs de recherche, tout en contribuant à la construction d'une solution globale cohérente. La figure 5.1, illustre cette progression et identifie les liens entre les différents articles et les objectifs de recherche.

5.1 Analyse de l'évolution technologique des systèmes CAVE

Les résultats issus de l'analyse des brevets présentée dans l'article 1 permettent de dresser un portrait structuré des tendances d'innovation dans le domaine des systèmes CAVE. Cette analyse met en évidence une grande diversité d'approches techniques liées aux différentes composantes des systèmes CAVE, notamment les systèmes audio et vidéo, les moteurs graphiques, les technologies de rendu stéréoscopique, les systèmes de suivi des mouvements ainsi que les mécanismes de calibration Beji *et al.* (2025). Ces résultats confirment le caractère multidimensionnel des systèmes CAVE, comme également souligné dans la littérature (Manjrekar *et al.*, 2014; Muhanna, 2015). L'analyse révèle également que les principales innovations se concentrent principalement sur l'amélioration de l'immersion, de l'interactivité et des capacités de rendu des environnements virtuels. Cependant, malgré cette richesse technologique, les résultats mettent en évidence une lacune importante en matière de solutions réellement transportables, modulaires et accessibles. Cette observation est cohérente avec les travaux existants, qui

soulignent que les systèmes CAVE demeurent majoritairement confinés à des environnements spécialisés en raison de leur complexité technique, de leurs besoins en infrastructure et de leurs coûts élevés (Febretti *et al.*, 2013).

5.2 Analyse comparative et accessibilité des systèmes CAVE

Les résultats de l'analyse comparative présentée dans l'article 2 montrent que, malgré les avancées technologiques, les systèmes CAVE demeurent largement inaccessibles en raison de contraintes liées aux coûts, à la complexité d'installation et à la faible portabilité. Cette analyse a permis de quantifier ces limitations et de mettre en perspective les défis associés à la conception de systèmes plus accessibles. Ces résultats rejoignent les constats de plusieurs travaux, qui identifient le coût et la complexité technique comme des obstacles majeurs à l'adoption des technologies immersives (Yang *et al.*, 2015; Ishii *et al.*, 2019). Ainsi, bien que des efforts soient réalisés pour améliorer les technologies audiovisuelles et les systèmes de projection, ces avancées demeurent insuffisantes pour garantir une accessibilité réelle. Une approche plus globale est nécessaire, impliquant non seulement des innovations technologiques, mais aussi une adaptation aux contextes d'usage, notamment dans les milieux éducatifs, communautaires et culturels.

5.3 Définition des exigences de conception adaptées aux contextes réels

Le troisième objectif de recherche consistait à définir un ensemble d'exigences fonctionnelles, techniques et sensorielles adaptées aux contextes communautaires. En complément des analyses issues de l'article 2, cette réflexion s'est appuyée sur des observations terrain réalisées à différentes étapes du projet, notamment à l'été 2024 et à l'hiver 2025. Ces travaux de terrain, menés dans le cadre de collaborations avec des chercheurs et des intervenants spécialisés, ont permis d'interagir avec des enfants autistes ainsi qu'avec leurs parents. Cette implication a contribué à une meilleure compréhension des réalités d'usage, des contraintes environnementales et des besoins spécifiques liés à l'utilisation de technologies immersives dans des contextes non spécialisés. Ces observations, combinées aux résultats de l'analyse comparative des systèmes CAVE, ont permis de mettre en évidence plusieurs exigences clés. Sur le plan technique, la

transportabilité et la modularité apparaissent comme des conditions essentielles afin de permettre un déploiement flexible dans des environnements variés (Korečko *et al.*, 2019; Miller *et al.*, 2005). Sur le plan opérationnel, la simplicité d'installation et d'utilisation constitue un facteur déterminant pour favoriser l'appropriation du système par des utilisateurs non experts. Par ailleurs, les considérations sensorielles occupent une place centrale dans la conception du système, particulièrement dans le contexte d'interventions auprès d'enfants autistes, ces derniers présentant fréquemment des particularités liées au traitement de l'information sensorielle. Le contrôle des stimuli visuels et sonores, la prévisibilité des interactions ainsi que la réduction des sources de surcharge sensorielle constituent donc des éléments essentiels à considérer. Ces constats rejoignent ceux des travaux existants en réalité virtuelle appliquée, qui soulignent l'importance d'adapter les environnements immersifs aux besoins spécifiques des utilisateurs (Mesa-Gresa *et al.*, 2018; Bailey & Bailenson, 2017). Ainsi, cette étape a permis de formaliser un ensemble cohérent d'exigences de conception servant de fondement au développement du prototype présenté dans la suite du mémoire. Ces exigences ne se limitent pas à des considérations techniques, mais s'inscrivent également dans une perspective d'usage visant à soutenir le développement des habiletés sociales chez les enfants autistes à travers leur participation à des activités de réalité virtuelle. Le système proposé vise également à favoriser les interactions sociales, la collaboration et l'engagement entre les participants au sein d'activités immersives collaboratives (Mesa-Gresa *et al.*, 2018; Bailey & Bailenson, 2017). Le système CAVE développé offre ainsi un potentiel intéressant pour la mise en place d'environnements immersifs contrôlés et adaptés aux sensibilités sensorielles des personnes autistes.

5.4 Conception et validation du prototype

Le quatrième objectif de recherche visait à concevoir, développer et évaluer un prototype de système CAVE transportable. Le troisième article constitue l'aboutissement de cette démarche, en proposant une solution concrète répondant aux exigences identifiées. Le prototype développé démontre la faisabilité d'une approche visant à concilier transportabilité, modularité et accessibilité, tout en maintenant un niveau d'immersion satisfaisant. Toutefois, cette conception

implique certains compromis, notamment entre performance immersive, coût, robustesse et facilité de déploiement, mettant en évidence la complexité inhérente à la conception de systèmes immersifs adaptés à des contextes réels. Dans cette perspective, les résultats obtenus illustrent la manière dont une démarche de recherche en sciences de la conception permet de structurer le processus de transformation des besoins identifiés en une solution technologique concrète, à travers des itérations successives de conception, de développement et de validation (Hevner *et al.*, 2004; Peffers *et al.*, 2007).

Dans son ensemble, cette recherche met en évidence la possibilité de répondre, au moins en partie, aux limitations identifiées dans les systèmes CAVE traditionnels, en proposant une approche centrée sur l'accessibilité et les usages. Elle souligne l'importance d'une démarche intégrée combinant analyse technologique, compréhension des besoins du terrain et développement itératif d'un artefact, permettant d'aligner les choix de conception avec des contraintes réelles. Les résultats obtenus montrent que les objectifs de recherche ont été atteints dans une mesure significative et permettent d'apporter des éléments de réponse à la question de recherche. Plus précisément, ils démontrent la faisabilité d'une solution de type CAVE transportable et plus accessible, adaptée à des contextes non spécialisés, tout en mettant en évidence les compromis nécessaires entre immersion, coût et facilité d'utilisation. Cette contribution s'inscrit ainsi dans une perspective de démocratisation progressive des technologies immersives, en particulier pour des milieux jusqu'ici peu desservis, bien que certains défis techniques et opérationnels demeurent et nécessitent des travaux complémentaires. Au-delà de ses apports technologiques, cette recherche s'inscrit également dans une perspective d'innovation sociale, en explorant le potentiel des environnements immersifs pour soutenir la participation sociale des personnes autistes et le développement de leurs habiletés sociales. Cette dimension renforce la pertinence du système proposé, en le positionnant non seulement comme une solution technique, mais également comme un outil d'intervention adapté à des besoins spécifiques.

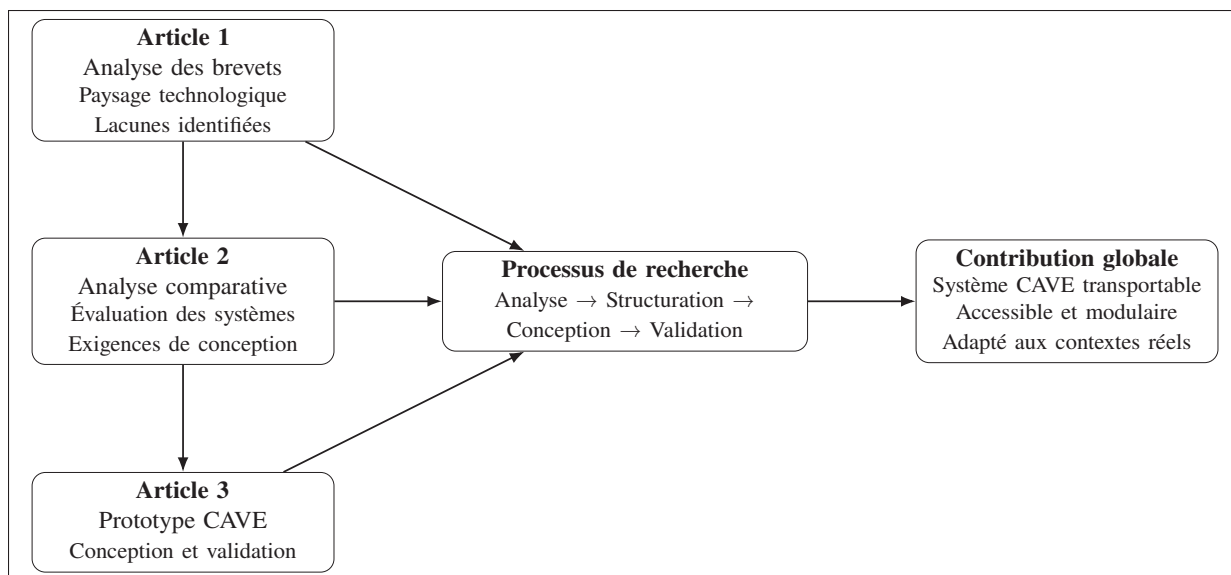


Figure 5.1 Synthèse des objectifs de recherche à travers les différentes productions scientifiques et réalisations

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce mémoire avait pour objectif principal de concevoir, développer et évaluer un système CAVE transportable, modulaire et à faible coût, adapté à des environnements non spécialisés, notamment dans le cadre d'interventions auprès d'enfants autistes. Afin de répondre à cet objectif, une approche basée sur la recherche en sciences de la conception a été adoptée, permettant d'articuler de manière cohérente l'analyse du domaine, la définition des exigences et le développement d'un prototype fonctionnel. Les travaux réalisés ont permis d'apporter plusieurs contributions significatives. Dans un premier temps, l'analyse des brevets a offert une compréhension approfondie du paysage technologique des systèmes CAVE, mettant en évidence la diversité des solutions existantes ainsi que les lacunes importantes en matière de portabilité et d'accessibilité. Cette étape a permis de démontrer la pertinence de la recherche et son caractère significatif. Dans un second temps, l'analyse comparative des systèmes CAVE existants a permis d'évaluer les solutions disponibles selon des critères techniques et pratiques, notamment le coût, la complexité d'installation, la robustesse et l'adaptabilité aux contextes réels. Cette analyse a conduit à la définition d'un ensemble structuré d'exigences de conception, constituant une base essentielle pour le développement du système proposé. Enfin, le développement du prototype a permis de concrétiser ces exigences sous la forme d'un système CAVE transportable intégrant une architecture modulaire, des technologies de projection adaptées et un environnement immersif interactif. Les résultats obtenus démontrent la faisabilité de l'approche proposée et confirment qu'il est possible de concevoir un système immersif accessible sans compromettre de manière significative la qualité de l'expérience. Au-delà des contributions techniques, ce mémoire met en évidence l'importance d'une approche centrée sur les usages et les contraintes du terrain et souligne le caractère multidisciplinaire d'un tel projet. En intégrant dès la phase de conception des considérations liées à la transportabilité, à la simplicité d'installation et à l'accessibilité, le système proposé répond à des besoins concrets, souvent négligés dans les solutions existantes. Cette orientation ouvre la voie à une démocratisation des technologies immersives, en particulier

dans des contextes communautaires et éducatifs. Elle met également en évidence l'importance des apports des ingénieur.e.s au-delà des champs de pratique qui leur sont habituellement reconnus et souligne la pertinence de leurs contributions dans différentes sphères de la société.

Malgré les résultats obtenus, certaines limites doivent être soulignées. Tout d'abord, le prototype développé reste une première version, dont les performances pourraient être améliorées, notamment en ce qui concerne la précision du suivi, la qualité de la projection et l'optimisation de l'alignement des surfaces. De plus, les évaluations réalisées demeurent exploratoires et gagneraient à être complétées par des études à plus grande échelle, impliquant un plus grand nombre d'utilisateurs et des contextes d'utilisation variés. Enfin, certaines contraintes techniques et logistiques, liées notamment au transport, à l'installation et à la maintenance du système, nécessitent encore des optimisations pour faciliter une adoption à plus large échelle.

Dans la continuité de ces travaux, plusieurs perspectives de recherche peuvent être envisagées. Sur le plan technologique, il serait pertinent d'explorer des solutions permettant d'améliorer la portabilité et la robustesse du système, notamment à travers l'utilisation de nouveaux matériaux ou de structures pliables. L'intégration de technologies de suivi plus avancées et de solutions de calibration automatisée constitue également une piste prometteuse pour améliorer l'expérience utilisateur et réduire la complexité d'installation. Sur le plan applicatif, des études expérimentales impliquant des utilisateurs finaux, en particulier des enfants autistes, permettraient d'évaluer plus précisément l'impact du système sur le développement des compétences sociales et cognitives. Le développement de scénarios immersifs adaptés et personnalisables représente également un axe de recherche important pour maximiser l'engagement et l'efficacité des interventions. Enfin, ce travail ouvre des perspectives en matière de transfert technologique et de déploiement à grande échelle. La collaboration avec des partenaires industriels et communautaires pourrait permettre d'optimiser le système en fonction des besoins du terrain et de faciliter son adoption dans des contextes réels.

En conclusion, ce mémoire démontre qu'il est possible de concevoir un système CAVE transportable et accessible, en s'appuyant sur une démarche méthodologique rigoureuse et itérative. Les résultats obtenus constituent une contribution significative à la fois sur le plan scientifique et technologique, et ouvrent la voie à de nouvelles recherches visant à rendre les technologies immersives plus accessibles et adaptées aux besoins de la société.

ANNEXE I

PREUVES DES PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

La présente annexe regroupe les preuves des publications scientifiques réalisées dans le cadre de ce projet de maîtrise. Elle inclut à la fois les articles publiés ainsi que les preuves d'acceptation des articles en cours de publication.

Proceeding Paper

CAVE Automatic Virtual Environment Technology: A Patent Analysis [†]

Fatma Beji ¹, William de Paula Ferreira ^{1,*}, Isabelle Pivotto Dabat ¹ and Vitor Matias ²

¹ Department of Systems Engineering, École de Technologie Supérieure, Montreal, QC H3C 1K3, Canada; fatma.beji.1@ens.etsmtl.ca (F.B.); isabelle.pivotto-dabat@etsmtl.ca (I.P.D.)

² Department of Specialized Education and Training, University of Quebec in Montreal (UQAM), Montreal, QC H2X 3R9, Canada; matias.vitor@uqam.ca

* Correspondence: william.ferreira@etsmtl.ca

[†] Presented at the 2024 IEEE 7th International Conference on Knowledge Innovation and Invention, Nagoya, Japan, 16–18 August 2024.

Abstract: Cave automatic virtual environment (CAVE) technology provides a highly immersive experience in virtual reality (VR) environments, transcending traditional boundaries of VR head-mounted devices. CAVE is applied to many fields, including education, construction, healthcare, and manufacturing. Despite its relevance, studies examining CAVE technology evolution and research directions are still lacking. To address this research gap, we analyzed patents using CAVE to understand the technology's development and identify opportunities for future research, development, and innovation. Patent data were collected from the Lens database and analyzed using data mining techniques. An increasing number of CAVE patents were granted, reflecting significant growth and investments in this field. The results highlight emerging trends in the development of CAVE systems, emphasizing various technical configurations and innovative applications across a wide range of fields.

Keywords: CAVE; patent analysis; data mining; virtual reality; immersive technologies

1. Introduction

A cave automatic virtual environment (CAVE) system consists of a cube-shaped virtual reality (VR) room with floor, ceiling, and walls as projection surfaces on which multiple projectors display images, creating an immersive 3D VR environment [1]. It represents an advance in VR, offering 3D immersion for users that transcends the traditional limits of the virtual experience provided by VR head-mounted devices [2,3]. The Electronic Visualization Laboratory first developed a VR CAVE system at the University of Illinois, in Chicago, in the early 1990s [4]. It has evolved significantly since then and has been used for different applications in various sectors such as education [5], medicine and healthcare [6–8], entertainment, leisure and culture [9], and manufacturing [10].

Despite CAVE's relevance, studies examining its technological evolution and research directions are still lacking. Accordingly, a patent analysis provides information on the competitive dynamics and innovations that characterize its evolution. It encompasses essential steps, such as technology exploration to identify new advances, technology landscape assessment to guide research and development, competitive analysis to position patents against competitors, and patent rankings to quantify their strength and identify new patent applications [11]. Even though patent analyses on augmented reality (AR) and VR have been conducted [12,13], there is a notable gap in the analyses of patents related to CAVE technology.




Academic Editors: Teen-Hang Meen, Chun-Yen Chang and Cheng-Fu Yang


Published: 24 February 2025

Citation: Beji, F.; Ferreira, W.d.P.; Pivotto Dabat, I.; Matias, V. CAVE Automatic Virtual Environment Technology: A Patent Analysis. *Eng. Proc.* **2025**, *89*, 9. <https://doi.org/10.3390/engproc2025089009>

Copyright: © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Acceptance of your submission in the IAMOT 2025 conference [Summarize](#)

12 IAMOT 2025 <iamot2025@easychair.org>  Tue 5/6/2025 10:31 AM

To:  Beji, Fatma

[ATTENTION : Ce courriel provient de l'extérieur de l'ÉTS]
Évitez de cliquer sur un lien ou d'ouvrir une pièce jointe si vous ne connaissez pas l'expéditeur du courriel. En cas de doute, veuillez SVP créer un billet Problème de courriel au GUS <<https://gus.etsmtl.ca/c2atom/LoginAzure?landingPage=/portal-request-form/714d9e14-bc17-47b8-a0e6-e154184ecbc2>> .

Dear authors,

Paper Id : 180
Authors : Fatma Beji, Isabelle Pivotto Dabat, Vitor Matias, William De Paula Ferreira
Title : Low-Cost and Transportable CAVE Systems

We are pleased to inform you that your submission has been accepted for inclusion in the IAMOT 2025 conference. You will find the reviewers' comments at the end of this email, along with the previous feedback you may have received following the abstract review (if applicable).

Nevertheless, we remind you that to be included in the conference program and proceedings, at least one author should be registered. If you have not done so yet, we encourage you to complete your registration as soon as possible.
To proceed with registration, please log into your EasyChair account and click on "Start Registration."

Registration Rates:
- Early-bird registration (until May 12, 2025):
Scholars: 990 CAD | Students: 650 CAD
- Regular registration (after May 12, 2025):
Scholars: 1200 CAD | Students: 800 CAD

We encourage you to register early to take advantage of the reduced rates.

Stay tuned for the next steps. As soon as the program is finalized, we will contact you with detailed instructions regarding your presentation at the conference.

Concerning the publication of your research in the conference proceedings, the organizing committee may eventually contact you at the appropriate time to require further adjustments in your submission to fully comply with the conference guidelines.

If you require a visitor's visa to enter Canada, we strongly recommend that you start the application process as soon as possible to avoid any delays.

Should you have any questions, please do not hesitate to contact us at iamot2025@usherbrooke.ca.

We look forward to welcoming you to IAMOT 2025!

Best regards,
IAMOT 2025 Organizing Committee

BIBLIOGRAPHIE

- Abbas, A., Zhang, L. & Khan, S. U. (2014). A Literature Review on the State-of-the-Art in Patent Analysis. *World Patent Information*, 37, 3–13.
- American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders : DSM-5*. American Psychiatric Association.
- Arcane Technologies. [Last accessed 27 Feb 2025]. VR CAVE. Repéré à <https://arcanetech.io/produit/vr-cave/>.
- ART. [Last accessed 27 Feb 2026]. ARTTRACK6/M. Repéré à <https://ar-tracking.com/en/product-program/arttrack6m>.
- ART. [Last accessed 27 Feb 2026]. SmartTrack3. Repéré à <https://ar-tracking.com/en/product-program/smarttrack3>.
- Bailey, J. O. & Bailenson, J. N. (2017). Immersive Virtual Reality and the Developing Child. Dans *Cognitive Development in Digital Contexts* (pp. 181–200). Academic Press. doi : 10.1016/B978-0-12-809481-5.00009-2.
- Beji, F., Ferreira, W. D. P., Pivotto Dabat, I. & Matias, V. (2025). CAVE Automatic Virtual Environment Technology : A Patent Analysis. *Engineering Proceedings*, 89(1), 9. doi : 10.3390/engproc2025089009.
- Beji, F., Pivotto, I. D., Matias, V. & Ferreira, W. (2026). Low-Cost and Transportable CAVE Systems. Dans Armellini, F., Njah, S., Mosconi, E. & Nunes, B. (Éds.), *Technology Management for Intelligent, Open and Responsible Organizations and Ecosystems* (vol. 2). Springer Cham.
- Bonelli, E., Secco, M., Gianotti, M., Di Marco, D., Garzotto, F. & Colombo, A. (2025). Bridging Climbing and Interactive Smart Spaces for Children. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 9. doi : 10.1145/3770646.
- Bottema-Beutel, K., Kapp, S. K., Lester, J. N., Sasson, N. J. & Hand, B. N. (2021). Avoiding Ableist Language : Suggestions for Autism Researchers. *Autism in Adulthood*, 3(1), 18–29. doi : 10.1089/aut.2020.0014.
- Bozgeyikli, L., Raij, A., Katkooori, S. & Alqasemi, R. (2018). A Survey on Virtual Reality for Individuals with Autism Spectrum Disorder : Design Considerations. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 11, 133–151. doi : 10.1109/TLT.2017.2739747.

- Breitzman, A. F. & Mogege, M. E. (2002). The Many Applications of Patent Analysis. *Journal of Information Science*, 28, 187–205.
- Chandramouli, M., Takahashi, G. & Bertoline, G. R. (2014). Desktop VR Centered Project-Based Learning in ET Courses Using a Low-Cost Portable VR System. *ASEE Annual Conference & Exposition*, pp. 24–381.
- Chong, H. T., Lim, C. K., Rafi, A., Tan, K. L. & Mokhtar, M. (2022). Comprehensive systematic review on virtual reality for cultural heritage practices : coherent taxonomy and motivations. *Multimedia Systems*, 28(3), 711–726. doi : 10.1007/s00530-021-00869-4.
- Coban, M., Bolat, Y. I. & Goksu, I. (2022). The Potential of Immersive Virtual Reality to Enhance Learning : A Meta-Analysis. *Educational Research Review*, 36, 100452. doi : 10.1016/j.edurev.2022.100452.
- Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., DeFanti, T. A., Kenyon, R. V. & Hart, J. C. (1992). The CAVE : Audio Visual Experience Automatic Virtual Environment. *Communications of the ACM*, 35, 64–72.
- Cruz-Neira, C., Leigh, J., Papka, M., Barnes, C., Cohen, S. M., Das, S., Engelmann, R., Hudson, R., Roy, T., Siegel, L. et al. (1993). Scientists in Wonderland : A Report on Visualization Applications in the CAVE Virtual Reality Environment. *Proceedings of the 1993 IEEE Research Properties in Virtual Reality Symposium*, pp. 59–66.
- Danesh, A. A., Howery, S., Aazh, H., Kaf, W. & Eshraghi, A. A. (2021). Hyperacusis in Autism Spectrum Disorders. *Audiology Research*, 11(4), 547–556. doi : 10.3390/audiolres11040049.
- de Paula Ferreira, W., Armellini, F. & De Santa-Eulalia, L. A. (2020). Simulation in Industry 4.0 : A State-of-the-Art Review. *Computers & Industrial Engineering*, 149, 106868. doi : 10.1016/j.cie.2020.106868.
- de Paula Ferreira, W., Armellini, F., de Santa-Eulalia, L. A. & Rebolledo, C. (2021). Modelling and Simulation in Industry 4.0. Dans *Artificial Intelligence in Industry 4.0* (pp. 57–72). Cham, Switzerland : Springer.
- de Paula Ferreira, W., Armellini, F., de Santa-Eulalia, L. A. & Thomasset-Laperrière, V. (2022a). A Framework for Identifying and Analysing Industry 4.0 Scenarios. *Journal of Manufacturing Systems*, 65, 192–207.

- de Paula Ferreira, W., Armellini, F., de Santa-Eulalia, L. A. & Thomasset-Laperrière, V. (2022b). Extending the Lean Value Stream Mapping to the Context of Industry 4.0 : An Agent-Based Technology Approach. *Journal of Manufacturing Systems*, 63, 1–14. doi : 10.1016/j.jmsy.2022.02.002.
- Elor, A., Powell, M., Mahmoodi, E., Hawthorne, N., Teodorescu, M. & Kurniawan, S. (2020). On Shooting Stars : Comparing CAVE and HMD Immersive Virtual Reality Exergaming for Adults with Mixed Ability. *ACM Transactions on Computing for Healthcare*, 1, 1–22. doi : 10.1145/3396249.
- Evangelista, A., Ardito, L., Boccaccio, A., Fiorentino, M., Petruzzelli, A. M. & Uva, A. E. (2020). Unveiling the Technological Trends of Augmented Reality : A Patent Analysis. *Computers in Industry*, 118, 103221.
- Febretti, A., Nishimoto, A., Thigpen, T., Talandis, J., Long, L., Pirtle, J. D., Peterka, T., Verlo, A., Brown, M., Plepys, D., Sandin, D., Renambot, L., Johnson, A. & Leigh, J. (2013). CAVE2 : A Hybrid Reality Environment for Immersive Simulation and Information Analysis. *Proceedings of SPIE*, 8649, 864903. doi : 10.1117/12.2005484.
- Fecteau, S., Normand, C., Normandeau, G., Cloutier, I., Guerrero, L., Turgeon, S. & Poulin, M. (2024). “Not a Trouble” : A Mixed-Method Study of Autism-Related Language Preferences by French-Canadian Adults from the Autism Community. *Neurodiversity*, 2, 27546330241253696.
- Feng, L., Li, Y., Liu, Z. & Wang, J. (2020). Idea Generation and New Direction for Exploitation Technologies of Coal-Seam Gas through Recombinative Innovation and Patent Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 2928.
- Flynn, C. (2014). *An Open-Source Framework for Cave Automatic Virtual Environments*. (Thèse de doctorat, Dublin City University, Dublin, Ireland).
- Freina, L. & Ott, M. (2015). A Literature Review on Immersive Virtual Reality in Education : State of the Art and Perspectives. *Proceedings of the International Scientific Conference eLearning and Software for Education*, 1, 10–1007.
- Game Accessibility Guidelines. [Last accessed 27 Feb 2026]. Game Accessibility Guidelines. Repéré à <https://gameaccessibilityguidelines.com>.
- Garousi, V., Felderer, M. & Mäntylä, M. V. (2019). Guidelines for Including Grey Literature and Conducting Multivocal Literature Reviews in Software Engineering. *Information and Software Technology*, 106, 101–121. doi : 10.1016/j.infsof.2018.09.006.

- Garzotto, F. & Gelsomini, M. (2018). Magic Room : A Smart Space for Children with Neurodevelopmental Disorder. *IEEE Pervasive Computing*, 17, 38–48. doi : 10.1109/MPRV.2018.011591060.
- GitHub. [Last accessed 27 Feb 2026]. UnityDTrackPlugin. Repéré à <https://github.com/ar-tracking/UnityDTrackPlugin>.
- Gromer, D., Madeira, O., Gast, P., Nehfischer, M., Jost, M., Müller, M., Mühlberger, A. & Pauli, P. (2018). Height Simulation in a Virtual Reality Cave System : Validity of Fear Responses and Effects of an Immersion Manipulation. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12, 372.
- Hayden, S., Ames, D. P., Turner, D., Keene, T. & Andrus, D. (2015). Mobile, Low-Cost, and Large-Scale Immersive Data Visualization Environment for Civil Engineering Applications. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 29(6), 05014011. doi : 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.000042.
- Hevner, A. R., March, S. T., Park, J. & Ram, S. (2004). Design Science in Information Systems Research. *MIS Quarterly*, 28(1), 75–105.
- Ishii, A., Tsuruta, M., Suzuki, I., Nakamae, S., Suzuki, J. & Ochiai, Y. (2019). Let Your World Open : Cave-Based Visualization Methods of Public Virtual Reality towards a Shareable VR Experience. *Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference (AH2019)*, pp. 1–8.
- Kageyama, A. & Tomiyama, A. (2016). Visualization Framework for Cave Virtual Reality Systems. *International Journal of Modeling and Simulation*, 7, 1643001.
- Kanakri, S. M., Shepley, M., Varni, J. W. & Tassinari, L. G. (2017). Noise and Autism Spectrum Disorder in Children : An Exploratory Survey. *Research in Developmental Disabilities*, 63, 85–94. doi : 10.1016/j.ridd.2017.02.004.
- Kemeny, A., Chardonnet, J.-R. & Colombet, F. (2020). *Getting Rid of Cybersickness in Virtual Reality, Augmented Reality, and Simulators*. Springer International Publishing. doi : 10.1007/978-3-030-59342-1.
- Kenny, L., Hattersley, C., Molins, B., Buckley, C., Povey, C. & Pellicano, E. (2016a). Which Terms Should Be Used to Describe Autism ? Perspectives from the UK Autism Community. *Autism*, 20, 442–462. doi : 10.1177/1362361315588200.
- Kenny, L., Hattersley, C., Molins, B., Buckley, C., Povey, C. & Pellicano, E. (2016b). Which Terms Should Be Used to Describe Autism ? Perspectives from the UK Autism Community. *Autism*, 20(4), 442–462. doi : 10.1177/1362361315588200.

- Korečko, Š., Hudák, M. & Sobota, B. (2019). LIRKIS CAVE : Architecture, Performance and Applications. *Acta Polytechnica Hungarica*, 16(2), 199–218.
- Lorenzo, G. G., Newbutt, N. N. & Lorenzo-Lledó, A. A. (2023). Designing Virtual Reality Tools for Students with Autism Spectrum Disorder : A Systematic Review. *Education and Information Technologies*, 28(8), 9557–9605. doi : 10.1007/s10639-022-11545-z.
- Manjrekar, S., Sandilya, S., Bhosale, D., Kanchi, S., Pitkar, A. & Gondhalekar, M. (2014). Cave : An Emerging Immersive Technology—A Review. *Proceedings of the 2014 UKSim-AMSS 16th International Conference on Computer Modelling and Simulation*, pp. 131–136. doi : 10.1109/UKSim.2014.20.
- Mayer, E., Odaker, T., Kolb, D., Müller, S. & Kranzlmüller, D. (2024). LED Cave—New Dimensions for Large-Scale Immersive Installations. *Proceedings of the 2024 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, pp. 515–519.
- Mechdyne. [Last accessed 27 Feb 2025]. Portable Displays - AV & VR Solutions. Repéré à <https://www.mechdyne.com/av-vr-solutions/portable-displays/>.
- Mesa-Gresa, P., Gil-Gómez, H., Lozano-Quilis, J.-A. & Gil-Gómez, J.-A. (2018). Effectiveness of Virtual Reality for Children and Adolescents with Autism Spectrum Disorder : An Evidence-Based Systematic Review. *Sensors*, 18(8), 2486. doi : 10.3390/s18082486.
- Míguez, J. L., Porteiro, J., Pérez-Orozco, R., Patiño, D. & Gómez, M. Á. (2020). Biological Systems for CCS : Patent Review as a Criterion for Technological Development. *Applied Energy*, 257, 114032.
- Miller, S. A., Misch, N. J. & Dalton, A. J. (2005). Low-Cost, Portable, Multi-Wall Virtual Reality. *Immersive Projection Technology and Eurographics Virtual Environment Workshop*. Repéré à <https://ntrs.nasa.gov/citations/20050240930>.
- Misersky, J., Peeters, D. & Flecken, M. (2022). The Potential of Immersive Virtual Reality for the Study of Event Perception. *Frontiers in Virtual Reality*, 3. doi : 10.3389/frvir.2022.697934.
- Muhanna, M. A. (2015). Virtual Reality and the CAVE : Taxonomy, Interaction Challenges and Research Directions. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 27, 344–361. doi : 10.1016/j.jksuci.2014.03.023.
- Neira, C. C. & Reiners, D. (2019). Washington, DC : U.S. Patent and Trademark Office.

- Newbutt, N., Sung, C., Kuo, H. J., Leahy, M. J., Lin, C. C. & Tong, B. (2016). Brief Report : A Pilot Study of the Use of a Virtual Reality Headset in Autism Populations. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 46(9), 3166–3176. doi : 10.1007/s10803-016-2830-5.
- Ohno, N. & Kageyama, A. (2005). Introduction to Virtual Reality Visualization by the CAVE System.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D. et al. (2021). The PRISMA 2020 Statement : An Updated Guideline for Reporting Systematic Reviews. *BMJ*, 372, n71. doi : 10.1136/bmj.n71.
- Pastorelli, E. & Herrmann, H. (2013). A Small-Scale, Low-Budget Semi-Immersive Virtual Environment for Scientific Visualization and Research. *Procedia Computer Science*, 25, 14–22. doi : 10.1016/j.procs.2013.11.003.
- Peppers, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A. & Chatterjee, S. (2007). A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. *Journal of Management Information Systems*, 24(3), 45–77. doi : 10.2753/MIS0742-1222240302.
- Pivotto, I. D., Matias, V. & de Paula Ferreira, W. (2024). CAVE Automatic Virtual Environment Technology to Enhance Social Participation of Autistic People : A Classification and Literature Review. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 117, 102453. doi : 10.1016/j.rasd.2024.102453.
- Pivotto, I. D., Matias, V., Beji, F., Cottet, A. & Ferreira, W. (2026). Virtual Reality Games as a Tool for Social Skill Support in Autistic Children : A Conceptual Framework. Dans Armellini, F., Njah, S., Mosconi, E. & Nunes, B. (Éds.), *Technology Management for Intelligent, Open and Responsible Organizations and Ecosystems* (vol. 2). Springer Cham.
- Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J. & Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education : Design elements, lessons learned, and research agenda. *Computers & Education*, 147, 103778. doi : 10.1016/j.compedu.2019.103778.
- Salame, Y., Léger, P.-M., Charland, P., Merveilleux Du Vignaux, M., Durand, E., Bouillot, N., Pardoën, M., Deslandes-Martineau, M. & Sénécal, S. (2022). The Effects of Interactivity on Learners' Experience in a Visually Immersive Display Context. *Computers in the Schools*, 39(1), 41–60. doi : 10.1080/07380569.2022.2037296.
- Savickaite, S., McDonnell, N. & Simmons, D. [PsyArXiv]. (2022). Defining Virtual Reality (VR) : Scoping Literature Review on VR Applications in Autism Research.

- Schuler, D. & Namioka, A. (1993). *Participatory Design : Principles and Practices*. CRC Press.
- Shalaby, W. & Zadrozny, W. (2019). Patent Retrieval : A Literature Review. *Knowledge and Information Systems*, 61, 631–660.
- Slater, M. & Sanchez-Vives, M. V. (2016). Enhancing Our Lives with Immersive Virtual Reality. *Frontiers in Robotics and AI*, 3. doi : 10.3389/frobt.2016.00074.
- Taotao, S. & Yun, L. (2012). Development of Virtual Reality Technology Research via Patents Data Mining. *Advanced Technology in Teaching. Proceedings of the 2009 3rd International Conference on Teaching and Computational Science (WTCS 2009), Volume 2 : Education, Psychology and Computer Science*, pp. 111–116.
- Tseng, C. H. [Available online ; accessed on 7 June 2024]. (2018). System and Method for Immersive Cave Application. Repéré à <https://lens.org/089-823-476-843-553>.
- Turhan, B. & Gümüş, Z. H. (2022). A Brave New World : Virtual Reality and Augmented Reality in Systems Biology. *Frontiers in Bioinformatics*, 2. doi : 10.3389/fbinf.2022.873478.
- Vention. [Last accessed 27 Feb 2026]. Vention Website. Repéré à <https://ventiontech.com/>.
- Visbox. [Last accessed 27 Feb 2025]. Viscube M4 - CAVE System. Repéré à <https://www.visbox.com/products/cave/viscube-m4/>.
- Visbox, Inc. [Accessed on 7 June 2024]. (2020). VisCube C4-4K (Legacy). Repéré à <https://www.visbox.com/products/cave/viscube-c4-4k/>.
- Wallace, S., Parsons, S., Westbury, A., White, K., White, K. & Bailey, A. (2010). Sense of Presence and Atypical Social Judgments in Immersive Virtual Environments : Responses of Adolescents with Autism Spectrum Disorders. *Autism*, 14, 199–213. doi : 10.1177/1362361310363283.
- Wiebe, A., Kannen, K., Selaskowski, B., Mehren, A., Thöne, A. K., Pramme, L., Blumenthal, N., Li, M., Asché, L., Jonas, S. et al. (2022). Virtual Reality in the Diagnostic and Therapy for Mental Disorders : A Systematic Review. *Clinical Psychology Review*, 98, 102213.
- Wohlin, C. (2014). Guidelines for Snowballing in Systematic Literature Studies and a Replication in Software Engineering. *Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering*, pp. 1–10. doi : 10.1145/2601248.2601268.

- Wolstencroft, J., Robinson, L., Srinivasan, R., Kerry, E., Mandy, W. & Skuse, D. (2018). A Systematic Review of Group Social Skills Interventions, and Meta-Analysis of Outcomes, for Children with High Functioning ASD. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 48, 2293–2307. doi : 10.1007/s10803-018-3485-1.
- Xi, Y. & Zhicong, D. (2022). CN Patent No. 216561384 U. Repéré à <https://www.lens.org/lens/patent/145-842-209-843-762/frontpage?l=en>.
- Yang, X., Malak, R. C., Lauer, C., Weidig, C., Hagen, H., Hamann, B., Aurich, J. C. & Kreylos, O. (2015). Manufacturing System Design with Virtual Factory Tools. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 28, 25–40.
- Zhang, C., Hu, Y., Lyu, Y., Chen, D., Liang, Y., He, L. & Liu, S. [Available online ; accessed on 7 June 2024]. (2020). Multi-Channel Cave Type Projection Method. Repéré à <https://lens.org/084-003-292-225-085>.
- Zhou, X. & Li, S. [Available online ; accessed on 7 June 2024]. (2014). Immersive Virtual Display System and Display Method of Cave (Cave Automatic Virtual Environment). Repéré à <https://lens.org/199-805-588-984-464>.