

Nom et prénom	Etablissement	Grade	Qualité
EL BEQQALI Omar	Faculté des Sciences Dhar EL Mahraz, Fès	PES	Président
BOUAYAD Anas	Faculté des Sciences Dhar EL Mahraz, Fès	MCH	Rapporteur & Examineur
BERRADA Ismail	Université Mohammed VI Polytechnic, Ben Guerir	MCH	Rapporteur & Examineur
AGHOUTANE Badraddine	Faculté des Sciences, Meknès	MCH	Rapporteur & Examineur
NFAOUI El Habib	Faculté des Sciences Dhar EL Mahraz, Fès	PES	Examineur
RIFFI Jamal	Faculté des Sciences Dhar EL Mahraz, Fès	MCH	Examineur
AZOUGH Ahmed	Ecole Supérieure d'ingénieurs Léonard deVinci, Paris	MCH	Invité
ALAOUI ZIDANI Khalid	Faculté des Sciences Dhar EL Mahraz, Fès	PES	Directeur de thèse



Résumé :

Les sciences fondamentales dans l'enseignement médical, en particulier l'anatomie humaine, sont confrontées à des défis persistants pour enseigner efficacement des relations spatiales complexes en trois dimensions, souvent limitées par les contraintes des ressources en 2D et des laboratoires de dissection. Cette thèse aborde ces lacunes en matière de « visualisation », « mise en œuvre » et « personnalisation » à travers une méthodologie complète de recherche en sciences de la conception (DSR). Elle documente la conception, la mise en œuvre et l'évaluation rigoureuse, à l'aide de méthodes mixtes, de trois cadres d'apprentissage immersif de plus en plus sophistiqués : (1) le laboratoire d'anatomie virtuelle immersive (IVAL), un jeu sérieux en réalité virtuelle (RV) pour un seul utilisateur ; (2) le Collaborative IVAL (C-IVAL), un système multi-utilisateurs pour l'apprentissage synchrone entre pairs ; et (3) GenAiVR-Lab, un cadre conceptuel intégrant l'intelligence artificielle générative (IA) dans un environnement d'apprentissage par le jeu (GBL) afin de fournir un enseignement personnalisé et adaptatif.

En utilisant l'anatomie comme banc d'essai rigoureux pour ces cadres, la recherche fournit des preuves empiriques significatives démontrant la supériorité des approches immersives pour l'apprentissage médical complexe. Des études comparatives montrent que les utilisateurs de l'IVAL ont acquis des connaissances nettement supérieures (93,33 % de scores parfaits contre 38,33 % pour les méthodes traditionnelles). En outre, une comparaison directe des modalités a révélé que la RV était non seulement plus immersive et perçue comme plus utilisable que la RA, mais que son gain d'apprentissage de 53,97 % en matière de compréhension spatiale surpassait également de manière significative la RA (31,34 %) et les méthodes traditionnelles (16,39 %). L'évaluation longitudinale de C-IVAL a confirmé la rétention durable des connaissances à long terme, sans déclin significatif après deux mois ($p = 0,407$), et a révélé que la collaboration améliorait considérablement la facilité d'utilisation perçue ($d = 0,82$ selon Cohen). L'étude fondamentale menée par GenAiVR-Lab a validé le potentiel de la personnalisation basée sur l'IA, les étudiants appréciant particulièrement le tuteur IA comme « soutien cognitif » qui guide la réflexion plutôt que de fournir des réponses.

Collectivement, ces travaux apportent un ensemble de principes de conception fondés sur des preuves, des résultats empiriques solides et des avancées théoriques applicables à l'ensemble de l'enseignement médical immersif, en particulier dans les domaines de la cognition incarnée, de l'apprentissage collaboratif assisté par ordinateur et de l'acceptation des technologies. La thèse se termine par la présentation d'une feuille de route cohérente et évolutive pour concevoir l'avenir de l'enseignement médical, traçant une voie claire entre les expériences immersives fondamentales et les écosystèmes d'apprentissage intelligents, collaboratifs et profondément personnalisés.

Mots clés :

Réalité Virtuelle, IA Générative, Enseignement médical, Apprentissage de l'anatomie, Recherche en Sciences du Design, Apprentissage Collaboratif, Jeux Sérieux, Modèle d'Acceptation de la Technologie (TAM), Cognition Spatiale, Apprentissage Personnalisé.



VIRTUAL REALITY AND GENERATIVE AI FOR DESIGNING AND EVALUATING PERSONALIZED AND COLLABORATIVE MEDICAL EDUCATION FRAMEWORKS

Abstract :

Foundational sciences within medical education, particularly human anatomy, face persistent challenges in effectively teaching complex, three-dimensional spatial relationships, often constrained by the limitations of 2D resources and cadaveric labs. This thesis addresses these "visualization," "implementation," and "personalization" gaps through a comprehensive Design Science Research (DSR) methodology. It documents the design, implementation, and rigorous mixed-methods evaluation of three progressively sophisticated immersive learning frameworks: (1) the Immersive Virtual Anatomy Laboratory (IVAL), a foundational single-user virtual reality (VR) serious game; (2) the Collaborative IVAL (C-IVAL), a multi-user system for synchronous peer learning; and (3) GenAiVR-Lab, a conceptual framework integrating generative artificial intelligence (AI) within a game-based learning (GBL) environment to provide personalized, adaptive instruction.

Using anatomy as a rigorous testbed for these frameworks, the research yields significant empirical evidence demonstrating the superiority of immersive approaches for complex medical learning. Comparative studies show that IVAL users achieved significantly higher knowledge acquisition (93.33% perfect scores vs. 38.33% for traditional methods). Furthermore, a direct comparison of modalities revealed that VR was not only more immersive and perceived as more usable than AR, but its 53.97% learning gain in spatial understanding also significantly surpassed both AR (31.34%) and traditional methods (16.39%). The longitudinal evaluation of C-IVAL confirmed durable long-term knowledge retention with no significant decline after two months ($p=0.407$) and revealed that collaboration significantly improved perceived ease of use (Cohen's $d=0.82$). The foundational study for GenAiVR-Lab validated the promise of AI-driven personalization, with students highly valuing the AI tutor as "cognitive support" that guides thinking rather than providing answers.

Collectively, this work contributes a set of evidence-based design principles, robust empirical findings, and theoretical advancements applicable across immersive medical education, particularly in the areas of embodied cognition, computer-supported collaborative learning, and technology acceptance. The thesis concludes by presenting a coherent, evolutionary roadmap for designing the future of medical education, charting a clear path from foundational immersive experiences to intelligent, collaborative, and deeply personalized learning ecosystems.

Key Words :

Virtual Reality, Generative AI, Medical Education, Anatomy Learning, Design Science Research, Collaborative Learning, Serious Games, Technology Acceptance Model, Spatial Cognition, Personalized Learning