



APPLICATION DE LA RÉALITÉ MIXTE POUR AMÉLIORER L'EFFICACITÉ DE LA COMPRÉHENSION DE LA CONCEPTION ARCHITECTURALE

Mémoire présenté comme exigence partielle
de la maîtrise en technologie de l'information

Par Hana Hbaieb

Mars 2026

<https://r-libre.teluq.ca/4027>

TÉLUQ

APPLICATION DE LA RÉALITÉ MIXTE POUR AMÉLIORER
L'EFFICACITÉ DE LA COMPRÉHENSION DE LA CONCEPTION
ARCHITECTURALE

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN TECHNOLOGIE DE L'INFORMATION

PAR
HANA HBAIEB

MARS 2026

REMERCIEMENT

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers Monsieur Daniel Lemire, mon directeur de mémoire, pour avoir supervisé ce travail avec une vision et une rigueur remarquable. Sa patience et son dévouement ont été d'une grande aide tout au long de ce travail, et je suis reconnaissante pour le temps qu'il m'a consacré, toujours disponible pour répondre à mes questions.

Je souhaite également exprimer ma sincère gratitude envers les membres du jury pour leur contribution à l'évaluation de cette mémoire.

Un grand merci à toute l'équipe administrative de la TÉLUQ pour leur accueil chaleureux, leur soutien continu et leurs conseils précieux.

Enfin, je dédie cette mémoire à mes parents et à mon mari pour leur soutien indéfectible tout au long de cette période d'études.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	viii
RÉSUMÉ	ix
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I CADRE DE RÉFÉRENCE	8
1.1 Historique et définition des technologies de la RÉ	8
1.1.1 Impact de la RÉ sur la conception architecturale	13
1.2 Processus de revue architecturale et l'examen de conception	16
1.3 Choix entre les différentes technologies de la RÉ : la RV, la RA et la RM.	19
1.3.1 Choix de la RM : Avantages par rapport à la RV et la RA dans l'étude	21
1.4 Perception et reconnaissance de l'environnement	23
1.4.1 Positionnement de l'étude dans la perception spatiale	25
1.5 Comparaison de la perception spatiale dans les environnements immersifs et non immersifs	27
1.6 Justification du choix de HoloLens et des outils de visualisation adaptés à l'étude	31
1.6.1 Choix de HoloLens 2	31
1.6.2 Choix de SketchUp et Lumion	34
CHAPITRE II CONCEPTION ET PERCEPTION D'UN MODÈLE DE MAISON EN 2D ET RM VIA HOLOLENS 2	39
2.1 Aperçu architectural d'une maison à l'aide de HoloLens	39
2.2 Préparation du modèle SketchUp de la maison	40
2.2.1 Configuration de Microsoft HoloLens 2	50

2.2.2	Importation du modèle SketchUp maison dans SketchUp Viewer	51
2.3	Démonstration	52
2.3.1	Utilisation de la fonctionnalité de placement pour positionner la maison dans l'espace	53
2.3.2	Utilisation des outils pour explorer et visualiser la maison en RM	54
2.3.3	Interaction avec les objets dans la maison pour voir des informations complémentaires	60
2.3.4	Synthèse de la démonstration	62
CHAPITRE III MODÉLISATION STATISTIQUE DE L'ÉVALUATION SPATIALE D'UN PROJET DE RÉNOVATION DE BUREAU EN 2D, 3D ET RM		68
3.1	Espace d'expérimentation	69
3.2	Description et préparation du système	71
3.3	Définition des variables	72
3.4	Échantillonnage	72
3.5	Collecte de données	73
3.5.1	Sélection aléatoire des participants et le mode de recrutement	73
3.5.2	Information des participants et le processus de collecte des données	74
3.5.3	Conception architecturale	75
3.5.4	Questionnaire	80
3.5.5	Procédure opérationnelle standard	85
3.6	Présentation des résultats	88
3.6.1	Analyse détaillée des informations de conception 2D	91
3.6.2	Comparaison des modalités de visualisation (2D, 3D et RM) pour la revue de conception	92
CHAPITRE IV ANALYSE DES RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION DU PROJET DE RÉNOVATION DE BUREAU		95
4.1	Modèle de régression linéaire à plusieurs facteurs	96
4.1.1	Évaluation des multicolinéarités et ajustement du modèle	97

4.1.2	Validation des hypothèses	98
4.1.3	Choix du modèle réduit	99
4.1.4	Synthèse des résultats	102
4.2	Discussion	102
4.2.1	Impact de la RM et de la visualisation 3D sur la perception de l'environnement	103
4.2.2	Limitations de l'étude et suggestions pour de futures recherches	104
APPENDICE A CODES R POUR LA RÉGRESSION LINÉAIRE MUL- TIPLE		109
A.1	Chargement des données	109
A.2	Évaluation des multicolinéarités	110
A.3	Hypothèses de normalité et d'homoscédasticité des résidus.	113
A.4	Résultats du modèle complet	115
A.5	Sélection de variables (choix de modèle réduit)	117
A.6	Résultats du modèle réduit	122
RÉFÉRENCES		125

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1 (Milgram et Jr., 1999) Différence entre la RA, la RM et la RV. . .	11
2.1 Plan AutoCAD de la maison	42
2.2 Importation du plan AutoCAD de la maison au SketchUp	43
2.3 Ajustement de l'échelle du plan de la maison dans SketchUp . . .	44
2.4 Transformation d'un plan en modèle 3D en plusieurs étapes . . .	46
2.5 Mise en place du toit	47
2.6 Ajout de détails et d'accessoires à la maison SketchUp	48
2.8 Deux façades différentes de la maison à l'aide de Lumion	49
2.9 Chargement du modèle dans SketchUp Viewer sur HoloLens 2 . .	52
2.10 Placement et orientation de la façade principale : vers la droite, la gauche, le haut ou le bas	56
2.11 Positionnement à l'échelle 1 : 1 devant l'entrée principale	57
2.12 Déplacement dans les couloirs et les terrasses extérieurs de la mai- son dans l'échelle 1 : 1	58
2.13 Déplacement à l'intérieur de la maison dans l'échelle 1 : 1	59
2.14 Identification de deux entités : un plot de terre et un plateau en bois	60
2.15 Maquettes d'intérieur de maison sans toit	61
3.1 Photographies de l'intérieur du local : la vue 1 (le bureau du di- recteur), la vue 2 (le bureau du responsable) et la vue 3 (l'entrée principale avec la zone d'accueil).	70
3.2 Plan de niveau existant	70

3.3	Nouveaux plans de niveau et d'élévation	76
3.4	Rendus : l'accueil, la cuisine, la mezzanine, l'Open-Space et la salle de réunion	77
3.5	Perspectives isométriques	77
3.6	Coupe transversale	78
3.7	Images capturées pendant l'expérience.	87
3.8	Utilisation de HoloLens 2 pour observer la proposition de concep- tion intégrée à l'environnement réel.	88
3.9	Boîtes à moustaches représentant la distribution de trois groupes distincts, à savoir les groupes 2D, RM et 3D	90
4.1	Colinéarité entre les deux variables "Expérience" et " Âge"	97
4.2	Homogénéité de la variance	98
4.3	Normalité des résidus	99
4.4	Observations aberrantes	100

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
1.1 Étude de la perception spatiale et des processus cognitifs liés à l'expérience de l'environnement physique (Carrasco et Chen, 2021b).	23
1.2 Comparaison des technologies immersives et non immersives	28
1.3 Comparaison des casques de RM	32
1.4 Comparaison de SketchUp avec d'autres logiciels de modélisation 3D	35
1.5 Comparaison de Lumion avec d'autres moteurs de rendu	37
3.1 Résultats attendus pour les tests de l'expérience (Paes et Irizarry, 2018).	82
3.2 Questionnaire	83
3.3 Formulaire d'évaluation pour l'application de l'expérience	84
3.4 Procédure opérationnelle standard (Paes et Irizarry, 2018).	86
3.5 Données des participants et résultats des évaluations cognitives en fonction des groupes de traitement.	89
3.6 Utilisation de l'information par les participants du groupe 2D	92
3.7 Répartition des questions selon la technologie ayant permis une réponse correcte.	93
4.1 Tableau ANOVA (tests de type II) du modèle ajusté	100
4.2 Tableau d'analyse du modèle réduit	101

RÉSUMÉ

Notre étude évalue l'efficacité des technologies de réalité mixte, via Microsoft HoloLens 2, pour la revue de conception architecturale, en comparaison avec les méthodes traditionnelles en 2D et la visualisation 3D non immersive. Nous commençons par démontrer l'utilisation du SketchUp Viewer sur Microsoft HoloLens 2 pour visualiser une maison en 3D à l'échelle réelle (1 : 1). Cette démonstration permet une expérience immersive grâce aux capacités de suivi du regard du HoloLens 2, illustrant ainsi comment la réalité mixte peut améliorer la conception et la construction dans le domaine de la construction. Par ailleurs, nous développons un modèle de réalité mixte (RM) pour évaluer la conception de la rénovation d'un bureau d'architecte en un espace collaboratif. Cette évaluation est réalisée en interrogeant 63 personnes réparties en trois groupes : un groupe utilisant la représentation 2D traditionnelle, un second la visualisation 3D non immersive sur écran, et un troisième la réalité mixte à l'aide du HoloLens 2. L'objectif est de comparer l'efficacité de la revue de conception pendant la phase de développement du projet architectural. Les analyses statistiques indiquent que la réalité mixte améliore la compréhension de 17 % par rapport à la 2D, tandis que la 3D non immersive procure une amélioration de 13 %. Une légère différence de genre est observée, les femmes présentant une compréhension inférieure de 4 % par rapport aux hommes lors de l'évaluation initiale, indépendamment de l'âge, du niveau d'éducation et de l'expérience en 2D. L'expérience professionnelle tend à accroître marginalement la compréhension (0,12 % par année), bien que cet effet ne soit pas statistiquement significatif. Chaque modalité contribue différemment à la compréhension : la 2D est adaptée aux aspects techniques et structurels, la 3D non immersive favorise la perception tridimensionnelle mais limite l'appréhension complète de l'espace, et la réalité mixte, grâce à l'immersion, améliore la compréhension spatiale malgré certaines limites techniques.

Mots-clés : Réalité mixte (MR), 3D non immersive, conception architecturale, hologrammes, Microsoft HoloLens 2, analyse de régression linéaire

INTRODUCTION

Mon mémoire se concentre sur la recherche des technologies de réalité étendue (RÉ), en particulier la réalité augmentée (RA), la réalité virtuelle (RV) et la réalité mixte (RM), ainsi que sur leur impact significatif dans le domaine de l'architecture. Jusqu'à présent, les architectes se sont largement appuyés sur des dessins de projection 2D et des rendus numériques pour exprimer leurs idées de conception architecturale, notamment les élévations, les coupes et les plans. De plus, ils utilisent des rendus, c'est-à-dire des images réalistes 3D créées numériquement à l'aide de logiciels tels que SketchUp, Revit, AutoCAD ou ArchiCAD. Ces outils informatiques apportent de nombreux avantages, notamment une meilleure communication, une conception plus fluide et une détection précoce des problèmes (Autodesk, 2020). Cependant, ces outils sont limités par le fait qu'ils ne fournissent que des images bidimensionnelles. Par exemple, il est impossible d'explorer un bâtiment en construction, d'observer la disposition des murs et des portes, les dimensions des meubles et d'avoir une vision réaliste de l'aspect final sans s'en informer au préalable.

Au cours de la dernière décennie, l'architecture a été profondément influencée par les avancées technologiques de la RÉ, telles que la RA, la RV et la RM (Carrasco et Chen, 2021b). Ces technologies, qui englobent des dispositifs portables et des graphismes générés par ordinateur, ont révolutionné la façon dont les architectes conçoivent et communiquent leurs projets. Elles ont permis de repenser la manière dont les professionnels explorent différentes options de conception. Ils ne sont plus contraints de réaliser de nombreuses maquettes physiques, ce qui se traduit par des économies de temps et de ressources précieuses.

Comment la RÉ offre-t-elle des solutions novatrices dans le domaine de l'architecture, depuis le processus de conception jusqu'à la présentation aux clients ? Comment pouvons-nous évaluer l'efficacité de l'utilisation de la RM, en particulier pour comprendre les détails architecturaux et répondre aux attentes des clients ?

Cette évolution significative de la RÉ a été fortement impactée par la fabrication numérique, créant ainsi une convergence entre les mondes numérique et physique. Une telle convergence trouve des applications à chaque étape du processus architectural, de la phase initiale de conception à la réalisation de prototypes. Un exemple concret de l'impact de ces technologies dans le domaine de l'architecture est illustré par la rénovation d'un segment d'usine, comme démontré dans une étude de cas (Alford *et al.*, 2000) utilisant la RV. Cette étude met en évidence comment la RV peut être employée pour repenser la conception des secteurs industriels, en optimisant l'utilisation des ressources existantes malgré les contraintes structurelles (Pakkanen *et al.*, 2016).

En outre, plusieurs initiatives notables dans le domaine de la RA pour l'industrie de l'Architecture, de l'Ingénierie et de la Construction (AIC) sont mises en exergue. Parmi celles-ci, on peut citer la création de systèmes expérimentaux de RA pour des applications telles que la construction, l'inspection et la rénovation architecturale (Webster *et al.*, 1996). De plus, des travaux ont exploré l'utilisation de la RA pour la gestion des installations (Hovestadt et Hovestadt, 1999), ainsi que des applications potentielles dans la revitalisation des bâtiments et la planification urbaine (Shen *et al.*, 2001). D'autres initiatives ont abordé des domaines tels que la visualisation de pipelines industriels (Navab *et al.*, 2002), la localisation de services publics souterrains (Roberts *et al.*, 2002) et le soutien en temps réel des tâches liées à l'infrastructure civile (Hammad *et al.*, 2002). Ces exemples témoignent d'un intérêt croissant pour l'intégration de la RA dans le

domaine de l'AIC, incitant à la définition de paramètres pour le développement de systèmes de RM adaptés à des besoins industriels spécifiques. Les chercheurs suggèrent également de se référer au concept de continuum réalité-virtualité de Milgram pour orienter les futures recherches et développements dans ce domaine en pleine évolution.

Nous allons à présent examiner plus en profondeur la RM, un environnement où les mondes réel et numérique fusionnent pour permettre une interaction bidirectionnelle et en temps réel. Celle-ci s'inscrit dans le continuum réalité-virtualité de Milgram (Milgram et Jr., 1999), entre la réalité augmentée et la réalité virtuelle. Sa spécificité réside dans l'ancrage spatial : les objets virtuels ne sont pas seulement superposés, ils interagissent avec la géométrie réelle, peuvent être occultés par des structures physiques et conservent une position fixe en 3D, permettant ainsi une manipulation naturelle et intuitive. C'est dans cette optique de fusion naturelle que l'une des avancées les plus récentes et révolutionnaires dans ce domaine a été incarnée par les lunettes intelligentes HoloLens 2 de Microsoft (Research, 2015). Les HoloLens 2 constituent un dispositif holographique de RM qui fusionne notre perception avec une image projetée de ce que nous souhaitons partager avec d'autres utilisateurs connectés. Ces lunettes intelligentes offrent une compatibilité avec diverses applications dans le domaine de l'architecture, facilitant ainsi une collaboration optimale et une communication visuelle avancée, en particulier dans le contexte de la conception architecturale. Par exemple, elles ont été équipées d'une fonctionnalité nommée "Assistance à distance", qui a simplifié le partage de contenu entre l'utilisateur des HoloLens 2 et les personnes connectées via un ordinateur ou une tablette au cours d'une session Teams. De plus, elles ont permis aux architectes de collaborer sur un projet sans être restreints par la nécessité d'être physiquement présents au même endroit et au même moment, renforçant ainsi leur aptitude à prendre des décisions éclairées (Balakrishnan et Guo, 2024).

Par ailleurs, elles ont offert à l'utilisateur la possibilité de superposer un modèle holographique 3D sur le monde réel, favorisant ainsi une interaction bien plus naturelle et intuitive avec les conceptions architecturales.

Notre étude se concentre sur l'analyse et l'évaluation de l'expérience de l'utilisation des capacités holographiques de Microsoft HoloLens 2 dans la phase de développement de la conception architecturale, afin d'aider les constructeurs et les architectes à élaborer des projets plus détaillés et à résoudre diverses tâches à toutes les étapes du cycle de vie du projet. En effet, notre étude a pour but de décrire, d'analyser et d'évaluer une telle application de l'utilisation de la technologie holographique de Microsoft HoloLens 2 pour améliorer l'efficacité de la compréhension de la conception architecturale. Notre collaborateur sur ce projet est l'architecte talentueux et passionné Alaeddine Ammar, qui puise son inspiration dans chaque forme, chaque besoin et chaque mode de vie, et s'efforce de mettre sa créativité au service de ses clients afin de concevoir des plans parfaitement adaptés à leurs attentes.

Les travaux antérieurs (Carrasco et Chen, 2021b) ont comparé l'efficacité des HoloLens 1 aux méthodes traditionnelles en 2D dans la conception architecturale. Cette étude a mené une expérience impliquant 42 participants répartis en deux groupes, chacun explorant une conception architecturale originale. L'efficacité de la revue de conception a été mesurée en comparant l'usage du HoloLens 1 aux méthodes traditionnelles en 2D, à travers une analyse par régression linéaire. Les résultats ont montré que la réalité mixte permettait de transmettre 85 % des informations aux participants, contre seulement 70 % pour les méthodes 2D classiques. De plus, cette technologie immersive a amélioré la perception esthétique des matériaux, offrant ainsi une alternative aux échantillons physiques lors de la phase de finition.

Notre étude s'inscrit dans cette même démarche, mais en s'intéressant aux performances du HoloLens 2. Bien que nous anticipions un avantage certain de cette nouvelle génération de RM sur les approches traditionnelles, l'analyse reste incomplète, car le protocole expérimental n'est pas totalement exhaustif. Si une troisième condition expérimentale est intégrée, par exemple la visualisation du modèle 3D sur un écran classique (non immersif), il devient possible de vérifier si les résultats obtenus avec HoloLens 2 sont encore évalués aussi positivement.

Afin d'apporter plus de rigueur à l'approche expérimentale, l'ajout de cette condition supplémentaire est pertinent. Il permet de déterminer si l'amélioration des performances observée avec la RM provient réellement de l'immersion ou simplement du passage de la 2D à la 3D. Sans cette distinction, les conclusions concernant l'apport de la RM risquent d'être biaisées.

Dans le premier chapitre, nous présentons tout d'abord un aperçu historique et une définition des différentes technologies de RÉ, avant d'analyser leur impact sur le processus de conception architecturale. Nous explorons ensuite les méthodes de revue architecturale et d'examen de conception, en mettant en avant les outils et pratiques les plus couramment utilisés. Nous comparons également les trois principales technologies de RÉ (la RV, la RA et la RM) afin de justifier notre choix de la RM dans notre étude, en soulignant ses avantages pour l'exploration et la compréhension des modèles architecturaux. Par ailleurs, nous nous intéressons à la perception et à la reconnaissance de l'environnement, en étudiant comment les technologies immersives et non immersives influencent la perception spatiale des utilisateurs, en particulier pour répondre aux besoins spécifiques de notre modèle architectural. À la fin du chapitre, nous justifions notre choix du HoloLens 2 et des outils de visualisation utilisés dans notre étude, en expliquant pourquoi cette technologie nous semble la plus adaptée pour évaluer l'impact de la RM sur la perception architecturale.

Dans le deuxième chapitre, nous utilisons le SketchUp Viewer sur Microsoft HoloLens 2 pour présenter la visualisation d'une maison en 3D à l'échelle réelle. Cette démonstration nous permet d'observer le modèle de maison à l'échelle réelle grâce aux capacités de suivi du regard du HoloLens 2, offrant ainsi une expérience immersive dans un environnement virtuel. Cette illustration met en évidence comment la RM peut contribuer à améliorer les processus de conception, de construction et de communication dans le secteur de la construction.

Le troisième chapitre présente une modélisation statistique visant à comparer l'efficacité de la RM aux méthodes 2D et 3D, afin d'évaluer l'impact de ces technologies sur la compréhension spatiale dans le cadre du réaménagement d'un bureau d'architecte en espace de travail collectif. Nous commençons par fournir une description approfondie du système utilisé, suivi de la préparation des données géométriques. Cette préparation inclut des dessins de projection orthographique 2D classiques, ainsi qu'une démonstration de l'utilisation de SketchUp Viewer sur HoloLens 2. Nous expliquons ensuite comment nous avons défini les variables, procédé à l'échantillonnage et collecté les données en détaillant les méthodes d'évaluation, le choix du site d'expérimentation, la conception architecturale et le questionnaire utilisé pour recueillir les commentaires des utilisateurs. Nous avons interrogé 63 personnes, réparties en trois groupes pour comparer l'efficacité de la revue de conception pendant la phase de développement de la conception architecturale à travers les capacités holographiques de HoloLens, la visualisation 3D non immersive et les méthodes 2D traditionnelles. À la fin, nous présentons la procédure opérationnelle standard que nous avons mise en place afin d'assurer la validité des résultats obtenus.

Dans le dernier chapitre, nous analysons et interprétons les résultats obtenus à partir des données recueillies du chapitre 3. Nous procédons à une comparaison quantitative et qualitative des performances observées dans les trois condi-

tions expérimentales, en nous appuyant sur des analyses statistiques (régression linéaire, tests de significativité, etc.) ainsi que sur les retours des participants. Cette approche nous permet de distinguer plus précisément si les bénéfices observés proviennent de l'immersion propre à la RM ou simplement du passage de la 2D à la 3D. Nous discutons ensuite des implications de ces résultats pour la pratique architecturale contemporaine, en soulignant comment la RM, la 3D non immersive et la 2D peuvent chacune transformer la manière dont les architectes conçoivent, présentent et valident leurs projets. Enfin, nous évoquons les limites de notre étude ainsi que les pistes de recherche futures, notamment l'intégration d'environnements collaboratifs multi-utilisateurs et l'amélioration de la précision des interfaces holographiques pour une adoption plus large dans le domaine de l'architecture.

CHAPITRE I

CADRE DE RÉFÉRENCE

Le premier chapitre de ce travail se concentre sur les enjeux liés à l'intégration des technologies de la RÉ dans la conception architecturale contemporaine. La RÉ, qui englobe la RV, la RA et la RM, continue de révolutionner les méthodes traditionnelles de l'architecture en offrant de nouvelles approches pour la conception, la visualisation et la collaboration. Ce chapitre a pour objectif d'établir les fondements théoriques et contextuels nécessaires à la compréhension de ces technologies, en explorant leurs origines, leurs caractéristiques et leur impact sur les processus de conception architecturale. Nous nous intéresserons tout particulièrement à leur influence sur la perception spatiale des utilisateurs et aux choix technologiques les plus appropriés pour répondre aux besoins spécifiques de notre projet : la rénovation d'un bureau en espace collectif, en comparant l'usage de la RM avec une méthode non immersive basée sur la modélisation 3D traditionnelle.

1.1 Historique et définition des technologies de la RÉ

Les technologies immersives de la RÉ, qui incluent la RV, la RA et la RM, ont traversé plusieurs étapes de développement depuis leurs premières applications jusqu'à nos jours. Ces technologies ont été façonnées par des chercheurs pionniers et des innovations majeures au fil des décennies.

La RV est définie comme un environnement entièrement généré par ordinateur, dans lequel l'utilisateur peut interagir de manière immersive à l'aide de dispositifs tels que des casques et des gants. Elle permet à l'utilisateur d'évoluer dans un monde virtuel en 3D où ses actions sont restituées en temps réel. Les origines de la RV remontent aux années 1960, avec les travaux d'Ivan Sutherland, qui a créé le *Sword of Damocles*, l'un des premiers casques de RV à affichage stéréoscopique et suivi de mouvement. Ce dispositif a posé les bases de la RV moderne (Sutherland *et al.*, 1965). Dans les années 1980, Jaron Lanier a popularisé le terme "réalité virtuelle" et a fondé VPL Research, une entreprise pionnière dans le développement de systèmes de RV commerciaux, notamment avec des dispositifs comme le DataGlove et l'EyePhone (Blade et Padgett, 2002). Par ailleurs, Myron Krueger a exploré les concepts de la réalité artificielle dans les années 1970 avec son projet *Videoplace*, un environnement interactif permettant l'interaction en temps réel entre l'utilisateur et des images virtuelles (Krueger, 1983). Un autre pionnier, Morton Heilig, a déposé le brevet de son dispositif *Sensorama* en 1962, une forme primitive de multisensorialité qui a inspiré des développements ultérieurs en RV (Heilig, 1962).

La RA est une technologie immersive qui superpose, en temps réel et de manière interactive, des éléments numériques (images, sons, objets 3D) à l'environnement physique perçu par l'utilisateur. Ces éléments, alignés spatialement avec le monde réel grâce à des capteurs, caméras ou systèmes de suivi (*tracking*), peuvent interagir avec le contexte physique, par exemple en réagissant à la lumière ou aux mouvements. Contrairement à la RV, qui plonge l'utilisateur dans un environnement totalement simulé, la RA enrichit la perception du monde réel sans le remplacer. La RA a émergé dans les années 1990. Elle a été introduite par Tom Caudell et David Mizell en 1992, dans le cadre d'une application développée pour Boeing afin d'améliorer le processus de fabrication en superposant des informa-

tions visuelles sur l'environnement réel via un affichage tête haute (Thomas et David, 1992). En 1992, Louis Rosenberg a créé le système *Virtual Fixtures*, destiné à la téléopération robotique, qui a permis de démontrer l'utilité de la RA dans des contextes militaires, notamment pour l'US Air Force (Rosenberg, 1993). À la fin des années 1990, Hirokazu Kato a développé *ARToolKit*, une bibliothèque open source qui a permis l'émergence de la RA basée sur la reconnaissance de marqueurs visuels, un tournant technologique majeur pour les applications mobiles (Kato et Billinghurst, 1999). Une synthèse globale des développements et des défis de la RA a été proposée par Ronald Azuma en 1997 dans son article (Azuma, 1997), qui est devenu une référence incontournable sur les applications, les limites et l'évolution de la RA.

La RM est un concept hybride qui combine la RV et la RA. Elle permet la co-existence et l'interaction d'objets réels et virtuels dans un même espace et offre à l'utilisateur la possibilité d'interagir avec les objets physiques tout en les voyant augmentés par des éléments virtuels. La RM a été théorisée en 1994 par Paul Milgram et Fumio Kishino, qui ont proposé le concept du *continuum réalité-virtualité*, une échelle graduelle allant de l'environnement purement réel à l'environnement purement virtuel (Milgram et Kishino, 1994). Ce concept a permis de mieux comprendre les interactions entre le réel et le virtuel.

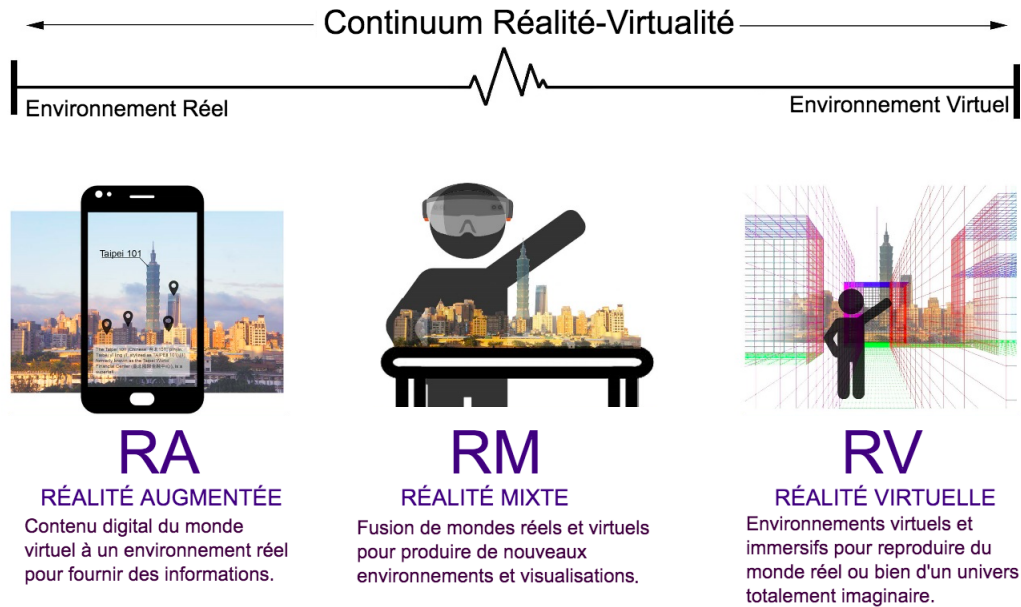


Figure 1.1 : (Milgram et Jr., 1999) Différence entre la RA, la RM et la RV.

Bien que l'approche de Milgram et Kishino ait constitué une base fondatrice pour la RM, elle se concentre principalement sur les aspects visuels, omettant les dimensions interactives et collaboratives qui caractérisent les applications modernes. Une étude récente souligne qu'il n'existe pas de définition universelle de la RM, car sa compréhension varie selon les contextes d'utilisation (Speicher *et al.*, 2019). Certains experts l'assimilent à la RA, tandis que Microsoft la considère comme une technologie distincte, notamment à travers des produits comme HoloLens. Dans cet article, les chercheurs insistent sur la nécessité d'une terminologie claire et cohérente afin d'éviter toute confusion et de favoriser des échanges constructifs. L'étude propose un cadre conceptuel structuré en sept dimensions, visant à mieux caractériser les différentes applications de la RM, notamment en ce qui concerne les types de collaboration et les interactions dans des contextes synchrones ou asynchrones (Speicher *et al.*, 2019).

Aujourd’hui, la RÉ s’étend à des secteurs variés comme le divertissement, la santé, l’immobilier, la construction, l’éducation et la collaboration à distance, avec des dispositifs modernes qui permettent une interaction plus fluide entre le réel et le virtuel. Cependant, ces avancées s’accompagnent de défis persistants : ambiguïtés terminologiques (frontières floues entre la RA et la RM), fragmentation technique (interopérabilité des logiciels), enjeux éthiques (transparence des simulations, manipulation de l’espace perçu) et impact environnemental (énergie des centres de données). Le Conseil national de la RÉ (CNXR) en France tente d’y répondre en structurant une filière collaborative, fédérant plus de 500 acteurs autour de normes communes et d’usages responsables (Conseil National de la XR, 2023). L’avenir de la RÉ réside dans son couplage avec l’intelligence artificielle (IA) et l’Internet des objets (IoT), promettant des écosystèmes intelligents et personnalisés. Toutefois, comme le souligne Speicher (Speicher *et al.*, 2019), son succès dépendra d’une intégration critique : aligner l’innovation avec les besoins humains, l’éthique et la durabilité, héritages des réflexions fondatrices sur l’immersion et l’interaction humain-machine. La RÉ n’est plus une utopie technologique, mais un outil de transformation sociétale, où la responsabilité collective doit guider son déploiement. En particulier, le domaine architecture répond à cet impératif en faisant de la RÉ un levier éthique et technique, intégrant des outils comme les jumeaux numériques ou les maquettes participatives en RV pour concevoir des espaces inclusifs et résilients. Elle promeut la démocratisation du design pour les citoyens, via des outils comme la RA/RV permettant aux non-experts de co-concevoir des espaces publics, pour les professionnels (ingénieurs, artisans), en facilitant la collaboration via des plateformes hybrides (ex. HoloLens), et pour les communautés marginalisées, en intégrant leurs besoins via des simulations inclusives. La RÉ, encadrée par des référentiels éthiques (Speicher *et al.*, 2019), devient ainsi un bien commun, où la technologie sert non une élite, mais une pluralité d’acteurs engagés dans la fabrique du réel.

1.1.1 Impact de la RÉ sur la conception architecturale

Ces dernières années, l'intérêt pour la RÉ a augmenté, notamment dans le secteur de la construction, grâce à des technologies telles que la RA, la RM et la RV (Chen et Duh, 2019). La RÉ est devenue une tendance majeure, en grande partie grâce à sa portabilité et à son ubiquité, des caractéristiques qui améliorent l'accessibilité et le maintien de la fonctionnalité sur le terrain (Kang, 2013).

Dans l'industrie de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction (AIC), des chercheurs ont mené des projets notables en utilisant la RA. Par exemple, en 2000, Webster et son équipe (Webster, 2000) ont développé des systèmes expérimentaux de RA pour la construction, l'inspection et la rénovation de structures architecturales. En 2001, Thomas et ses collaborateurs (Thomas, 2001) ont conçu la plateforme mobile de RA TINMITH pour visualiser les caractéristiques architecturales d'une conception extérieure dans son emplacement prévu. De plus, en 2002, Hammad et son équipe (Hammad *et al.*, 2002) ont mené des enquêtes sur l'utilisation de RA pour soutenir les opérations sur le terrain liées à l'infrastructure civile. Ces initiatives montrent l'intérêt croissant pour l'intégration de RA dans l'industrie de l'AIC, incitant à la définition de paramètres spécifiques pour le développement de systèmes de RM adaptés aux besoins particuliers de cette industrie en constante évolution. Les auteurs recommandent également de se référer au concept du continuum de Milgram (Milgram et Kishino, 1994) pour orienter les futures recherches et développements dans ce domaine en pleine transformation.

En 2007, une étude (Majumdar, 2007) a utilisé la RV pour améliorer la façon dont les plans architecturaux sont examinés dans les tribunaux américains, en accélérant le processus et en favorisant des discussions plus productives. En 2018, des chercheurs (Paes *et al.*, 2017a) se sont intéressés à l'ergonomie et aux aspects humains des plateformes de RV immersive pour les conceptions architecturales.

Ils ont également évoqué les opportunités offertes par la technologie RM dans le secteur immobilier, car elle permet aux consommateurs de mieux comprendre les informations liées aux biens immobiliers. En 2019, une étude innovante (Wolffartsberger, 2019) a examiné comment la RV peut être utilisée dans l'ingénierie et la conception. Les participants ont utilisé un casque HTC Vive et des logiciels Unity et Autodesk 3DS Max pour identifier des défauts dans des modèles 3D. L'objectif était de comparer l'efficacité de l'examen des conceptions en RV par rapport aux méthodes traditionnelles en 2D basées sur des logiciels de CAO. Les participants ont été répartis en équipes, avec certains utilisant le casque RV et d'autres regardant les modèles sur un écran de télévision. Un questionnaire a été utilisé pour évaluer le nombre de "défauts" identifiés dans le modèle RV. Les résultats ont montré que l'examen de la conception en RV permettait de détecter plus de défauts par rapport aux approches en 2D, grâce à son caractère intuitif pour visualiser un objet 3D.

Une autre étude (Liu et Leicht, 2020) menée en 2019, a porté sur 13 réunions d'examen de conception qui se sont étendues sur 28 mois, avec un accent sur les projets sur le campus d'une grande université. Les chercheurs ont enregistré chaque réunion de conception et analysé les données à l'aide de logiciels. Les modèles RV se sont avérés plus efficaces pour décrire les détails, facilitant la compréhension des spectateurs. De plus, la RV a permis de mieux transmettre la perception de la taille, de l'échelle, du volume et de la profondeur des espaces, en particulier pour les formes complexes et courbes.

Par conséquent, la RV pourrait considérablement améliorer la compréhension des conceptions architecturales. Cependant, il est important de noter que certaines recherches récentes estiment que la RV devrait être complémentaire aux supports traditionnels tels que les dessins en 2D et la modélisation des informations du bâtiment (BIM), plutôt que de les remplacer entièrement. Par exemple, une étude

de 2018 (Loures Brandão *et al.*, 2018) met en avant l'importance de la RV en tant qu'outil pédagogique dans l'enseignement de l'architecture, en l'associant à des méthodes traditionnelles pour améliorer la compréhension des projets. De même, une étude de 2017 (Milovanovic *et al.*, 2017) examine l'utilisation de la RV et de la RA dans la conception architecturale et l'éducation, soulignant leur rôle complémentaire avec les approches classiques pour enrichir l'expérience d'apprentissage et de conception. Ces recherches montrent que l'intégration de la RV avec les méthodes traditionnelles peut offrir des avantages significatifs, mais ne doit pas nécessairement remplacer les pratiques en place.

La RM, qui fusionne des éléments de la RV et de la RA, permet d'intégrer le contenu généré par ordinateur avec notre perception du monde réel. Cela offre de nouvelles opportunités pour collaborer sur des projets, notamment pour analyser des plans, planifier des tâches, suivre l'avancement ou réaliser des inspections. Grâce à des outils simples et intuitifs, la RM facilite l'accès aux informations et soutient la prise de décision. Par ailleurs, une étude menée en 2004 démontre que la RM peut être utilisée dans des environnements urbains pour mieux appréhender les interactions complexes entre les infrastructures et les utilisateurs, ce qui facilite la gestion et la planification urbaine (Bulman *et al.*, 2004). Des recherches récentes (2020) indiquent que la RM est largement adoptée dans les secteurs de l'architecture, de l'ingénierie, de la construction et des opérations (AECO), où elle permet de visualiser des projets complexes, d'améliorer la collaboration entre les parties prenantes et d'accélérer le processus décisionnel (Cheng *et al.*, 2020).

L'avènement des technologies mobiles et des casques immersifs de la RM a ouvert de nouvelles perspectives pour la visualisation et la simulation de projets architecturaux, notamment dans les phases de validation de conception et de gestion de chantier. Une étude récente (Carrasco et Chen, 2021a) a démontré que la RM améliore aussi beaucoup la compréhension des conceptions architecturales.

Les chercheurs ont réalisé une expérience avec 42 participants répartis en deux groupes, exposés à une conception architecturale originale. En comparant l'efficacité de la revue de conception utilisant HoloLens 2 à celle des méthodes traditionnelles en 2D, à l'aide d'une régression linéaire, les résultats ont montré que la revue de conception basée sur la RM permettait de transmettre efficacement 85% des informations au participant, contre seulement 70% pour les méthodes 2D classiques. De plus, la technologie de RM améliorait la compréhension esthétique des caractéristiques des matériaux par le client, offrant ainsi la possibilité de remplacer les échantillons physiques lors de la phase de finition de la construction.

Bien que la RÉ ait apporté des bénéfices considérables à la conception architecturale, elle présente également des défis. Bimber et Raskar (Bimber et Raskar, 2005) soulignent que la complexité des outils et des technologies peut représenter une barrière d'entrée pour les professionnels non familiers avec ces systèmes. De plus, l'intégration de la RÉ avec des processus comme le BIM reste un défi en raison de la nécessité de maintenir une cohérence entre les modèles numériques et les informations du monde réel.

1.2 Processus de revue architecturale et l'examen de conception

Le processus de revue architecturale et l'examen de conception jouent un rôle essentiel tout au long du cycle de vie d'un projet de construction, intervenant pratiquement à chaque étape, de la phase initiale de planification à la réalisation de la construction. L'importance de ces processus réside dans leur capacité à garantir que le projet évolue de manière cohérente, en répondant aux besoins du client tout en respectant les réglementations, les normes de sécurité et les contraintes budgétaires en constante évolution.

Les modifications sont presque inévitables dans l'industrie de la construction (East-

man, 2011), et elles peuvent découler de divers facteurs, tels que l'évolution des besoins du client, des contraintes techniques imprévues, des changements réglementaires, des ajustements budgétaires ou encore des imprévus sur le site de construction. Ces modifications sont à la fois courantes et cruciales pour s'assurer que le projet reste viable et qu'il réponde aux attentes du client tout au long de son développement. Cependant, la gestion de ces modifications est complexe, et c'est souvent ce qui conduit à la création d'ordres de modification, des documents formels qui notifient les changements apportés à la conception initiale (Keane *et al.*, 2010). Ces ordres de modification sont essentiels pour documenter et suivre les ajustements apportés au projet, afin que toutes les parties prenantes soient informées et que les travaux avancent conformément aux nouvelles spécifications.

Les projets de construction impliquent souvent une collaboration entre les architectes, les ingénieurs, les entrepreneurs, les sous-traitants, les fournisseurs et, bien sûr, les clients. Cette diversité d'acteurs peut parfois engendrer des désaccords et des divergences d'opinions, ce qui rend la gestion des modifications d'autant plus critique. Ces modifications, désignées comme des variations, peuvent être causées par des besoins contradictoires des parties prenantes, des contraintes budgétaires changeantes, des modifications dans les spécifications du projet ou des ajustements de dernière minute. Plus un projet comporte de variations, plus il a tendance à devenir chronophage et coûteux (Mohamed, 2001), ce qui met en évidence la nécessité de gérer ces changements de manière efficace pour éviter des impacts négatifs sur le calendrier et le budget du projet.

De nos jours, il est devenu rare qu'un projet de construction ne connaisse aucune variation, et la plupart des contrats intègrent des dispositions pour anticiper ces modifications (Finsen, 1999 ; Wainwright et Wood, 1983). Ces clauses de variation, bien que nécessaires, peuvent parfois encourager les clients à changer d'avis et à entreprendre des projets sans une réflexion approfondie sur leurs besoins (Finsen,

1999). Cela peut ajouter une couche de complexité supplémentaire au processus, car les décisions cruciales peuvent être reportées jusqu'à la dernière minute, ce qui nécessite une gestion agile pour maintenir le projet sur la bonne voie. La complexité inhérente à l'industrie de la construction, associée à la prévalence des variations, fait de ces clauses de variation un élément essentiel de tout contrat de construction (Arain et Phen, 2005).

Les conséquences de ces modifications peuvent être considérables, notamment des coûts supplémentaires, des retards dans les délais de réalisation, des révisions de travaux, des réclamations et même des litiges juridiques (Memon *et al.*, 2014). Les coûts supplémentaires peuvent découler de l'ajustement des matériaux, de l'embauche de main d'œuvre supplémentaire ou de l'extension des délais de construction. Les retards dans les délais de réalisation peuvent avoir un impact financier significatif sur un projet, affectant les calendriers de paiement et les attentes des parties prenantes. Les révisions de travaux nécessitent non seulement du temps et des ressources, mais peuvent également perturber le flux de travail sur le chantier.

Dans ce contexte, une communication efficace lors de l'examen de la conception est essentielle. Les échanges d'informations entre les parties prenantes, y compris les architectes, les ingénieurs, les entrepreneurs et les clients, sont cruciaux pour prévenir les problèmes potentiels, résoudre les questions de conception et s'assurer que les modifications sont correctement gérées. Une gestion de projet efficace et une collaboration transparente tout au long du processus peuvent contribuer à minimiser les impacts négatifs des changements sur le projet. L'examen de la conception repose sur la communication, où les participants doivent interagir avec de nombreux graphiques en même temps (Meta Platforms, Inc., 2023; Evans *et al.*, 2017), parfois avec l'aide de croquis simples (Davidson et Campbell, 1996). Cependant, les dessins en 2D présentent des conflits spatiaux entre les spécialités, nécessitant une interprétation humaine pour éviter les révisions. Le défi est lié au

caractère abstrait et fragmenté de ces représentations (Y. Liu et Leicht, 2020), ce qui oblige les examinateurs à parcourir de nombreuses feuilles de dessin dispersées pour obtenir une vue d'ensemble, parfois même pour les professionnels chevronnés de l'architecture. C'est pourquoi de nouvelles approches et technologies, telles que la modélisation en 3D et la réalité virtuelle, sont de plus en plus utilisées pour améliorer la compréhension et la communication au sein des équipes de projet.

1.3 Choix entre les différentes technologies de la RÉ : la RV, la RA et la RM.

Le choix entre les différentes technologies de la RÉ (la RV, la RA et la RM) dépend principalement des besoins, des objectifs et des ressources financières des clients. Chaque projet nécessite une analyse approfondie prenant en compte divers critères significatifs, et les objectifs spécifiques de chaque utilisation jouent un rôle déterminant dans le choix de la technologie. La RV est idéale pour créer des environnements virtuels complets, convenant à la simulation, à la formation, aux jeux immersifs et au divertissement. D'un autre côté, la RA, qui intègre des éléments virtuels dans le monde réel, offre des avantages considérables en visualisation, assistance à la maintenance, navigation et information contextuelle. En ce qui concerne la RM, elle fusionne les mondes virtuel et réel, permettant ainsi l'interaction avec des objets virtuels dans le monde réel, ce qui la rend particulièrement adaptée pour des applications liées à la formation, à la collaboration et à la visualisation de données (Milgram et Kishino, 1994).

Par ailleurs, l'interaction utilisateur et les coûts sont d'autres facteurs déterminants. La RV implique une interaction principalement dans un environnement virtuel à l'aide de contrôleurs, et elle requiert un matériel informatique puissant. À l'inverse, la RA peut être utilisée sur des appareils portables abordables tels que les smartphones, bien que des lunettes intelligentes haut de gamme puissent être

plus coûteuses. En ce qui concerne la RM, elle nécessite l'utilisation de casques spéciaux, ainsi que de dispositifs de suivi pour cartographier l'environnement. Dans ce contexte, la RA est alors mieux adaptée lorsque vous devez interagir avec le monde réel, tandis que la RV est idéale pour des expériences isolées immersives, adaptées à la simulation et à la formation intensive. Pour choisir, il est conseillé de définir clairement les besoins de votre projet, que ce soit pour la formation, la conception, la maintenance, le divertissement, la communication ou autres, puis de choisir la technologie qui correspond le mieux à ces attentes.

Il est essentiel aussi de prendre en considération l'évolutivité et les mises à jour pour les applications utilisées, car certaines technologies offrent une flexibilité permettant d'ajuster l'application au fil du temps. Ces mises à jour peuvent apporter de nouvelles fonctionnalités sans nécessiter de nouveaux équipements, et la capacité à prendre en charge de nouveaux dispositifs ou plates-formes peut être importante pour toucher un public plus large. En anticipant l'évolutivité dès le début du projet, on s'assure que l'application reste pertinente et compétitive dans un environnement technologique en constante évolution. L'évolutivité est donc un élément clé pour maximiser les opportunités offertes par la RÉ.

Au cours de la dernière décennie, les technologies de réalité étendue ont connu une évolution remarquable, offrant de nouvelles opportunités dans de nombreux domaines. Les casques de RV, tels que le HTC Vive, l'Oculus Rift et le Microsoft HoloLens, ont gagné en popularité dans les années 2015-2016. En 2016, le Microsoft HoloLens a introduit une innovation majeure en combinant les mondes virtuel et réel, offrant une expérience sans fil réaliste et unique sur le marché. En 2019, des casques autonomes portés sur la tête, tels que l'Oculus Quest, le HTC Vive Focus et le Lenovo Mirage Solo, ont été introduits, offrant la fonction "Passthrough" qui permettait d'observer le monde extérieur à travers des caméras intégrées. Toutefois, en 2020, malgré leur capacité à afficher le monde réel, ces

casques avaient des fonctionnalités d'interaction limitées, souvent basées sur des contrôleurs portables en plastique. En contraste, le HoloLens a continué à innover en utilisant des gestes manuels et un suivi oculaire pour une expérience plus immersive et intuitive. Il est devenu particulièrement attrayant pour des secteurs tels que l'architecture, la construction, la formation, la conception, etc., en raison de sa capacité unique à manipuler des données 3D et à permettre une interaction spatiale. L'évolution constante de ces technologies promet un avenir excitant pour la RÉ, ouvrant de nouvelles opportunités dans de multiples domaines.

1.3.1 Choix de la RM : Avantages par rapport à la RV et la RA dans l'étude

Dans le cadre de notre étude, la RM a été choisie comme technologie principale, en raison de ses nombreux avantages, qui la rendent particulièrement adaptée à un projet de rénovation architecturale, notamment pour la transformation d'un bureau en espace collaboratif. Cependant, il est essentiel de noter que la RM n'est pas nécessairement la solution idéale pour toutes les situations et que son choix doit être fait en fonction de critères spécifiques :

1. Interaction avec l'environnement réel : La RM permet une interaction en temps réel avec les éléments du monde réel, ce qui est essentiel pour l'intégration de modèles 3D dans des espaces physiques existants. Dans le contexte de la rénovation d'un bureau, il est crucial d'évaluer comment les modèles virtuels interagissent avec l'environnement réel. Tandis que la RV isole l'utilisateur dans un espace totalement simulé, ce qui empêche toute interaction avec le monde physique réel, la RM permet à l'utilisateur de voir et d'interagir avec le monde réel tout en manipulant des objets numériques superposés dans cet espace. Cela permet une meilleure appréciation de l'échelle, de l'intégration et de la spatialité des projets, critères essentiels lors de la

conception architecturale.

2. Précision dans la visualisation des données spatiales : Dans un projet de rénovation architecturale, l'évaluation précise de l'échelle et de la proportion des éléments est primordiale. La RM permet à l'utilisateur de manipuler et d'ajuster des modèles 3D dans un contexte réel, offrant une perception plus réaliste et fidèle de l'espace. En revanche, la RA permet de superposer des objets numériques au monde réel, mais avec des interactions moins fluides et plus limitées. La RV, quant à elle, ne permet pas d'évaluer les éléments dans le contexte de leur intégration physique, ce qui limite son efficacité pour la validation de projets architecturaux où la relation entre le modèle et l'espace réel est fondamentale.
3. Évaluation de l'ergonomie et de la spatialité : La RM permet une analyse ergonomique en simulant l'espace et en permettant à l'utilisateur de se déplacer et d'interagir avec les éléments du modèle dans un environnement réel. Cela permet de tester des configurations d'aménagement et d'évaluer la circulation dans l'espace en prenant en compte des facteurs comme l'échelle et les contraintes réelles du site. Ce niveau d'interaction spatiale est beaucoup plus limité en RV et en RA, où l'environnement est entièrement simulé et déconnecté de la réalité physique, qui n'offre pas la même interactivité fluide avec des objets numériques dans l'espace physique.

Pour un projet de rénovation d'un bureau en espace collaboratif, la RM apparaît comme un choix pertinent. Elle permet une visualisation précise et interactive des modèles 3D dans un environnement réel, facilite l'évaluation de l'intégration architecturale, et offre un confort d'utilisation optimal pour des sessions prolongées. En comparaison, la RV ne permet pas cette interaction avec le monde réel, et la RA ne fournit pas le même niveau de manipulation des objets numériques dans l'espace physique, ce qui rend la RM plus adaptée à ce type de projet.

1.4 Perception et reconnaissance de l'environnement

Le processus de perception et de compréhension de l'environnement, en particulier dans le domaine de l'architecture, revêt une importance complexe et fondamentale dans l'interaction des individus avec le monde qui les entoure, comme illustré dans ce tableau (Carrasco et Chen, 2021b).

	Processus	Dimension	Type d'information obtenue	Description
1	Exploration : L'utilisateur explore les zones physiques pour s'orienter et développer des moyens de locomotion et de communication dans l'espace donné.	Dimension cognitive : L'utilisateur réfléchit, organise et conserve les informations pour donner un sens à l'environnement.	Détermination de la disposition et des limites spatiales fixes ou données. Expérience et définition de l'environnement	Est-ce que l'utilisateur sait quelles activités et fonctions peuvent être effectuées dans l'environnement ?
2	Catégorisation : L'utilisateur développe des catégories d'informations ou une taxonomie de l'environnement pour classifier les caractéristiques de l'espace et le comprendre.	Dimension affective : Elle concerne nos émotions et leur influence sur la perception de l'environnement.	Information sensorielle environnementale	Est-ce que l'utilisateur peut distinguer les caractéristiques des espaces dans l'environnement ?
		Dimension interprétative : L'utilisateur compare les points de mémoire aux stimuli nouvellement expérimentés.	Informations générales et spécifiques de l'environnement	Est-ce que l'utilisateur peut identifier les matériaux, textures et tailles des objets présents dans l'environnement ?
3	Systématisation : L'utilisateur systématise l'environnement en analysant les contingences environnementales (événements se produisant dans l'environnement).	Dimension évaluative : Elle intègre les valeurs, les préférences et la détermination des éléments bons et mauvais dans l'environnement.	Cohérence environnementale et signification symbolique	Est-ce que l'utilisateur peut décrire l'environnement de manière cohérente en expliquant ses différentes parties et éléments ?

Tableau 1.1 : Étude de la perception spatiale et des processus cognitifs liés à l'expérience de l'environnement physique (Carrasco et Chen, 2021b).

Le Tableau 1.1 offre un aperçu détaillé du processus par lequel les individus perçoivent un espace réel, ainsi que des processus cognitifs qui y sont associés. Ce

processus est subdivisé en trois étapes, chacune liée à des dimensions cognitives, affectives et interprétatives, et à des types d'informations recueillies :

- Exploration : À cette première étape, les utilisateurs explorent un environnement physique pour s'orienter et élaborer des moyens de déplacement et de communication. Les dimensions principalement impliquées sont cognitives, car les utilisateurs réfléchissent, organisent et mémorisent des informations pour donner un sens à l'environnement. Les données obtenues servent à déterminer la disposition et les limites spatiales de l'environnement tout en permettant de vivre et de définir cet espace.
- Catégorisation : À la deuxième étape, les utilisateurs commencent à classer les informations environnementales. Ils développent des catégories d'informations ou une taxonomie pour classifier les caractéristiques de l'espace. Les dimensions affectives interviennent également, contribuant à la compréhension de l'influence des émotions sur la perception de l'environnement. Les informations sensorielles de l'environnement sont également collectées pour distinguer les caractéristiques physiques de l'espace. De plus, la dimension interprétative entre en jeu, car les utilisateurs comparent les stimuli expérimentés avec leurs souvenirs et identifient des informations générales et spécifiques concernant l'environnement.
- Systématisation : La troisième étape implique la systématisation de l'environnement par l'analyse des contingences environnementales, c'est-à-dire les événements qui se produisent dans l'environnement. La dimension évaluative est essentielle, car elle intègre les valeurs, les préférences et la détermination des éléments positifs et négatifs dans l'environnement. Cela permet de comprendre la cohérence de l'environnement et la signification symbolique en décrivant de manière cohérente l'environnement et en expliquant ses différentes parties et éléments.

Ces étapes reflètent un processus cognitif essentiel à la perception et à la compréhension d'un espace réel, intégrant des dimensions cognitives, affectives et interprétatives, chacune apportant des informations clés.

En ce qui concerne les Environnements Virtuels Immersifs (EVI), des recherches antérieures (Barriball et While, 1994 ; Longhurst, 2016 ; Trimble, 2023) ont montré qu'ils offrent une représentation satisfaisante des environnements physiques réels, et que les utilisateurs les perçoivent de la même manière que les environnements réels. De plus, les IVE permettent aux architectes de tester différentes options de conception, ce qui serait généralement impossible en raison de contraintes temporelles et financières. Les technologies RM et RV ont donc un potentiel significatif pour améliorer l'efficacité de la revue de conception en affichant des environnements facilement compréhensibles pour les utilisateurs, similaires aux environnements réels.

1.4.1 Positionnement de l'étude dans la perception spatiale

Notre étude contribue à l'analyse de la perception spatiale dans la conception architecturale en comparant les environnements immersifs et non immersifs selon une méthodologie rigoureuse. Les travaux antérieurs (Carrasco et Chen, 2021b) se concentraient sur la comparaison de l'efficacité d'HoloLens aux méthodes traditionnelles en 2D dans la conception architecturale. Nous enrichissons cette analyse en intégrant une troisième condition expérimentale : la visualisation d'un modèle 3D sur un écran classique non immersif. Cette approche nous permet d'affiner la compréhension de la perception spatiale en RM, notamment dans le cadre concret de la rénovation d'un bureau en espace collaboratif.

Notre objectif est d'examiner l'influence des outils technologiques sur la perception et la compréhension de l'espace, un enjeu central dans l'analyse de la perception

spatiale. En distinguant les effets de l’immersion procurée par HoloLens 2 de ceux liés à l’interactivité et à la simple visualisation 3D sur un écran classique, nous cherchons à identifier le rôle spécifique de chaque facteur dans le processus perceptif. Cette distinction est essentielle pour optimiser l’aménagement d’un bureau en un espace collaboratif, flexible et fonctionnel, en analysant la manière dont les utilisateurs perçoivent et interagissent avec différentes configurations spatiales.

Dans cette perspective, nous analysons le processus perceptif selon trois étapes : l’exploration, la catégorisation et la systématisation. Lors de la phase d’exploration, nous examinons comment les participants s’orientent et évaluent la fluidité de circulation dans l’espace réaménagé. La phase de catégorisation s’intéresse aux aspects sensoriels et émotionnels, tels que les matériaux, les couleurs et l’éclairage, et à leur impact sur la collaboration et le bien-être. Enfin, la phase de systématisation évalue la cohérence globale de l’aménagement, en analysant comment les différents éléments facilitent les interactions et les tâches collectives. L’objectif est de relier ces étapes perceptives à la capacité du bureau à répondre aux besoins fonctionnels tout en améliorant l’expérience utilisateur.

En clarifiant le rôle de l’immersion, notre étude permet d’affiner l’analyse de la perception spatiale et d’identifier les contextes dans lesquels les dispositifs immersifs apportent une réelle valeur ajoutée. Une meilleure compréhension des apports spécifiques de chaque technologie nous permet d’orienter plus efficacement les choix en matière de conception d’espaces collaboratifs et de proposer des recommandations adaptées aux besoins des utilisateurs, en plaçant la perception spatiale au cœur de la réflexion.

1.5 Comparaison de la perception spatiale dans les environnements immersifs et non immersifs

Dans le domaine de la conception architecturale, deux grandes approches technologiques sont souvent utilisées : les environnements immersifs (la RM, la RV et la RA) et les outils non immersifs (comme les logiciels de modélisation et de rendu sur écran standard). Ces deux approches diffèrent largement dans la manière dont elles permettent d'interagir avec les modèles 3D et d'analyser l'espace architectural.

Pour mieux comprendre les différences entre ces deux approches, le tableau suivant compare les technologies immersives et non immersives selon plusieurs critères importants dans la conception architecturale :

Critère	Technologies immersives	Technologies non immersives
Technologies utilisées	RA, RV, RM	Modélisation 3D classique, rendu photoréaliste, rendu en temps réel (semi-immersif)
Interactivité avec le modèle	Navigation libre et interactive, interactions physiquement réalistes	Navigation via vues fixes ou déplacements prédéfinis, contrôle précis de la composition
Perception spatiale	Haute précision, échelle et proportions réalistes, intégration avec l'environnement réel	Rendu visuellement riche, mais interaction limitée, difficulté à évaluer l'échelle réelle
Immersion et présence	Forte présence dans l'espace virtuel ou augmenté, expérience réaliste et engageante	Expérience statique, dépendance aux angles de vue et à la qualité des rendus
Visualisation des matériaux	Simulation dynamique en temps réel (textures, éclairages, reflets)	Représentation statique avec rendu pré-calculé, pas d'interaction en temps réel
Exemples d'outils	HoloLens 2 (RM, intégration des outils BIM), Oculus Rift, HTC Vive (RV), Fologram (RA avec LiDAR), Unity 3D et MRTK (RM, développement immersif), Twinmotion (avec casque RV)	SketchUp et Lumion, Autodesk Revit et V-Ray, Revit et Enscape (rendu en temps réel), Blender et Cycles (open source, simulation physique), Rhino et Grasshopper (modélisation paramétrique)
Cas d'usage	Revue de conception collaboratives, simulation de circulation, superposition de modèles 3D sur site, création d'expériences interactives	Conception et visualisation photoréaliste, simulations statiques, communication de projets via images et vidéos
Avantages	Interaction intuitive, meilleure perception de l'espace, expérience immersive et réaliste	Modélisation rapide, rendu de haute qualité, accessibilité, faible coût
Limites	Nécessite du matériel spécialisé, défis de calibration et de suivi, coût élevé	Manque d'interactivité, difficulté à percevoir l'espace en trois dimensions, pas d'intégration avec le monde réel

Tableau 1.2 : Comparaison des technologies immersives et non immersives

Les environnements immersifs utilisent des technologies telles que la RV, la RA, ou la RM pour offrir une expérience d'interaction en 3D. Ces technologies permettent de simuler des espaces réalistes, facilitant la compréhension de l'échelle, des volumes et des matériaux d'une manière intuitive. L'interaction avec les modèles 3D devient plus fluide et naturelle grâce à des outils comme Microsoft HoloLens (RM), Unity 3D et MRTK (pour des interactions réalistes), ou Twinmotion couplé à un casque RV. Toutefois, bien que ces technologies offrent une immersion totale et de nombreuses possibilités pour la conception architecturale, leur adoption reste limitée en raison de coûts élevés, de la complexité technique liée à la calibration et à la gestion des équipements, des risques de fatigue (cybercinétose), et d'une précision parfois réduite pour les ajustements fins. En outre, des études récentes (Yigitbas *et al.*, 2023) montrent que l'intégration des technologies de réalités, la RA et la RV, avec le modèle d'information du bâtiment (BIM) est de plus en plus courante dans le secteur AEC (architecture, ingénierie, construction). L'étude met en évidence les avantages de la RA et de la RV pour améliorer la visualisation et l'interaction avec les modèles BIM, en particulier lors des phases de construction et d'exploitation des bâtiments. Bien que ces technologies soient largement explorées en recherche, des défis demeurent, notamment la complexité d'implémentation et la résistance à l'adoption par les professionnels. L'étude indique que, dans la phase de conception, la RV est particulièrement populaire, tandis que la RA est privilégiée pour la construction et l'exploitation, notamment pour les tâches de révision et d'assurance qualité des projets. Cela témoigne de l'importance croissante de ces technologies dans le processus de conception et de gestion des bâtiments (Yigitbas *et al.*, 2023).

Les outils non immersifs, en revanche, reposent sur des écrans standards et des périphériques classiques tels que la souris et le clavier. Des logiciels comme SketchUp et Lumion, Revit et V-Ray, ou Blender sont utilisés pour la modélisation,

le rendu photoréaliste, et le BIM détaillé. Ces outils permettent une visualisation précise et des rendus de qualité qui facilitent l'analyse des matériaux, de l'éclairage et de l'environnement global d'un projet. L'accès à ces technologies est plus simple, et les solutions collaboratives via le cloud sont courantes. Cependant, la perception spatiale reste limitée par la nature des affichages sur écran, qu'ils soient fixes ou animés. L'interaction avec les modèles 3D est aussi moins immersive que dans les environnements immersifs. Une étude récente menée (Paes *et al.*, 2017b) a exploré la relation entre la perception tridimensionnelle et la présence dans les environnements virtuels, soulignant que la perception 3D n'est pas nécessairement un facteur déterminant pour la présence d'un utilisateur. En effet, leurs résultats suggèrent que les systèmes immersifs en RV ne sont pas forcément plus efficaces que les systèmes non immersifs en termes de présence. Cette constatation pourrait transformer l'usage de la RV dans la conception architecturale, en permettant l'utilisation de systèmes non stéréoscopiques tout en conservant une expérience immersive de qualité (Paes *et al.*, 2017b).

Les outils hybrides combinent les caractéristiques des environnements immersifs et non immersifs. Par exemple, Twinmotion et Enscape proposent une visualisation sur écran qui devient immersive lorsqu'ils sont associés à un casque RV, permettant ainsi de profiter de rendus photoréalistes tout en offrant une immersion totale dans l'espace. De même, des outils comme V-Ray permettent d'exporter des scènes et de les rendre compatibles avec la RV, offrant des rendus visuels de haute qualité tout en permettant une interaction immersive. En outre, SketchUp permet de visualiser des modèles 3D sur un écran classique, mais devient immersif lorsqu'il est utilisé avec un casque HoloLens, créant ainsi une expérience de RM pour explorer les projets architecturaux.

Le choix entre les environnements immersifs et non immersifs dépend largement des besoins spécifiques du projet. Si l'objectif est la précision et l'accessibilité, les

outils non immersifs sont souvent préférés. Cependant, pour des projets nécessitant une immersion profonde et une exploration spatiale intuitive, les outils immersifs, malgré leur coût élevé et leur complexité technique, s'avèrent plus adaptés. Les solutions hybrides, qui combinent les deux approches, offrent quant à elles une flexibilité accrue, répondant à une large gamme de besoins dans le processus de conception architecturale.

1.6 Justification du choix de HoloLens et des outils de visualisation adaptés à l'étude

Notre étude se concentre sur la rénovation d'un bureau en espace collectif, en comparant l'utilisation de la RM à une approche non immersive basée sur la modélisation et le rendu 3D traditionnels. L'objectif est de sélectionner les outils les plus adaptés pour évaluer l'efficacité de la RM par rapport aux méthodes classiques de conception architecturale. Dans cette optique, le HoloLens 2 a été choisi après une analyse comparative approfondie des différentes solutions de RM disponibles sur le marché. De même, les logiciels de modélisation et de rendu SketchUp et Lumion ont été sélectionnés en fonction de leur pertinence et de leur compatibilité avec les objectifs du projet.

1.6.1 Choix de HoloLens 2

Une analyse comparative des casques de RM les plus populaires du marché, présentée dans le tableau suivant, a permis d'identifier plusieurs critères essentiels, tels que le champ de vision, la résolution, le suivi des mains, la collaboration, le confort, la compatibilité logicielle et la technologie utilisée.

Critères	HoloLens 2	Magic Leap 2	Varjo XR-3	Meta Quest Pro
Champ de vision (FoV)	52	50	115	106
Résolution	2K par œil	2.5K par œil	4K par œil	1832x1920 par œil
Suivi des mains	Capteurs capacitifs (précis)	Capteurs optiques (modéré)	Nécessite des contrôleurs	Capteurs limités
Collaboration	Excellente (Microsoft Mesh)	Bonne (spatial computing)	Limitée	Bonne (Horizon Workrooms)
Confort	Très confortable (566 g, équilibré)	Moyen (722 g, lourd)	Assez lourd (890 g)	Léger (722 g)
Compatibilité logicielle	SketchUp, BIM 360, Unity, Unreal	Unreal Engine, Omniverse	Unity, Unreal, Autodesk VRED	Horizon, Unity
Technologie	RM avec see-through optique (verre transparent)	RM avec see-through optique et occultation dynamique (objets opaques)	RM avec pass-through vidéo ultra-haute qualité, combinant VR et RM	RM avec pass-through vidéo en couleur, mais de qualité inférieure au Varjo XR-3

Tableau 1.3 : Comparaison des casques de RM

Lors d'un projet de rénovation d'un bureau d'architectes en espace collectif, il est essentiel d'utiliser un outil permettant de visualiser les modifications, collaborer en équipe et présenter les concepts aux clients de manière immersive.

Le Magic Leap 2 et le Meta Quest Pro ont été écartés en raison de certaines limitations par rapport aux exigences du projet. Le Magic Leap 2, malgré son pass-through optique et son bon suivi spatial, souffre d'un champ de vision res-

treint (50°), ce qui limite l’affichage des modèles 3D dans l’environnement réel. De plus, son écosystème logiciel est moins adapté aux outils BIM et à la conception architecturale comparé au HoloLens 2, qui bénéficie d’une intégration avec la suite Microsoft (SketchUp, BIM 360, Microsoft Mesh). Le Meta Quest Pro, de son côté, propose un pass-through vidéo en couleur, mais sa qualité est inférieure à celle du Varjo XR-3, notamment à cause d’une résolution plus faible et de certains artefacts visuels. Bien qu’il soit plus accessible financièrement et adapté à la collaboration virtuelle (comme Horizon Workrooms), il manque de la précision du suivi spatial du HoloLens 2 et n’est pas optimisé pour les logiciels professionnels de conception.

Le HoloLens 2 est la meilleure option pour ce type de projet grâce à son approche de RM avec pass-through optique (verre transparent). Cela permet aux architectes de superposer un modèle 3D du nouvel aménagement directement sur le bureau réel, offrant une expérience interactive sans immersion totale. Parmi ses avantages, il offre un pass-through optique permettant de voir le monde réel tout en affichant des éléments virtuels, une collaboration efficace grâce à Microsoft Mesh et aux outils BIM (ex. : SketchUp, BIM 360), ainsi qu’une grande mobilité et un confort optimisé avec un casque léger et autonome. Il permet également d’interagir en temps réel, d’annoter et d’ajuster les modèles directement sur l’environnement existant. Toutefois, certaines limitations doivent être prises en compte, notamment un champ de vision réduit à 52° , ce qui peut restreindre l’affichage des modèles 3D, et une résolution de $2K$ par œil, suffisante pour la visualisation des plans, mais moins adaptée aux rendus ultra-détaillés.

Si l’objectif est de plonger totalement dans une version ultra-réaliste du futur bureau, alors le Varjo XR-3 constitue une alternative intéressante. Il propose un pass-through vidéo ultra-haute qualité, combinant réalité virtuelle et RM, ainsi qu’une résolution $4K$ par œil permettant des rendus très précis des textures et

matériaux. Ce casque est particulièrement adapté pour des présentations clients spectaculaires, offrant une immersion complète. Cependant, son coût élevé et la nécessité d'un PC performant peuvent être des freins à son adoption. De plus, son encombrement et son poids rendent son utilisation moins pratique pour les déplacements sur site.

1.6.2 Choix de SketchUp et Lumion

Il est important de sélectionner des logiciels qui offrent à la fois une modélisation précise et une visualisation claire. Des outils populaires sur le marché, tels que SketchUp, Revit, Rhino et ArchiCAD, permettent de développer des modèles adaptés à chaque phase de la conception architecturale. Ensuite, des moteurs de rendu comme Lumion, V-Ray et Enscape transforment ces modèles en images réalistes et en vidéos 3D, facilitant ainsi la présentation des concepts aux clients. Nous allons alors comparer ces outils selon leur capacité à répondre aux besoins spécifiques de notre projet, en offrant une solution simple et efficace.

Critères	SketchUp	Revit	Rhino	ArchiCAD
Facilité d'utilisation	Très simple (interface intuitive, courbe d'apprentissage rapide)	Complexe (nécessite une formation approfondie)	Complexe (interface technique, adapté aux utilisateurs expérimentés)	Moyenne (plus accessible que Revit, mais moins que SketchUp)
Précision de modélisation	Moyenne (bon pour la conception conceptuelle, moins précis pour les détails techniques)	Très élevée (BIM, modélisation paramétrique avancée)	Très élevée (modélisation NURBS, idéal pour formes complexes)	Élevée (BIM, bon équilibre entre précision et facilité d'utilisation)
Compatibilité avec RM	Excellente (SketchUp Viewer a une intégration, native avec HoloLens, permettant une visualisation fluide)	Bonne (nécessite des plugins tiers, mais fonctionnalités avancées)	Moyenne (via Grasshopper, nécessite une configuration complexe)	Limitée (peu d'options pour l'intégration de la RM)
Utilisation principale	Conception rapide, visualisation, prototypage	BIM, documentation détaillé, gestion de projet	Design paramétrique, formes complexes, fabrication numérique	BIM, documentation architecturale, collaboration
Temps d'apprentissage	Court (1-2 semaines pour maîtriser les bases)	Long (plusieurs mois pour une utilisation efficace)	Long (courbe d'apprentissage raide, spécialisation nécessaire)	Moyen (1-2 mois pour une utilisation de base)
Coût	Abordable (licence moins chère, adapté aux petites structures)	Élevé (investissement important, adapté aux grandes entreprises)	Moyen à élevé (selon les modules)	Élevé (comparable à Revit)

Tableau 1.4 : Comparaison de SketchUp avec d'autres logiciels de modélisation 3D

SketchUp se distingue principalement par sa facilité d'utilisation et son faible coût. C'est un excellent choix pour des concepts rapides et des prototypes grâce à sa simplicité et son interface intuitive. Bien que la précision de modélisation soit moyenne, il est largement suffisant pour des projets nécessitant une conception préliminaire ou rapide. Son compatibilité native avec la RM, notamment via l'intégration avec HoloLens, permet de visualiser des projets en 3D de manière fluide et interactive. En revanche, Revit et ArchiCAD sont des logiciels BIM puissants, parfaits pour des projets complexes. Revit est plus technique et demande une formation approfondie, mais il excelle dans la gestion de projets de grande envergure et la documentation détaillée. ArchiCAD, plus accessible, offre aussi une bonne précision et une gestion efficace des informations de construction. Rhino est excellent pour les formes complexes et la modélisation paramétrique, offrant un grand contrôle sur les surfaces. Cependant, il n'est pas adapté aux projets BIM et nécessite des configurations spécifiques pour intégrer la RM.

Voici maintenant un tableau qui compare les moteurs de rendu Lumion, V-Ray et Enscape selon plusieurs critères importants pour le rendu architectural :

Critères	Lumion	V-Ray	Enscape
Qualité de rendu	Très bonne (excellente qualité d'image avec des effets avancés)	Excellente (tracé de rayons réaliste, utilisé dans les productions haut de gamme)	Bonne (équilibre entre performance et rendu de qualité)
Facilité d'utilisation	Très élevée (interface intuitive, rendu rapide)	Complexe (requiert une expertise avancée en rendu)	Très élevée (interface intuitive, intégration directe avec SketchUp)
Temps de rendu	Rapide (optimisé pour les rendus en temps réel ou quasi-instantanés)	Lent (tracé de rayons réaliste, mais exigeant en ressources)	Temps réel (mise à jour dynamique du rendu en direct)
Compatibilité avec SketchUp	Excellente (import direct avec haute fidélité des modèles)	Bonne (nécessite un plugin pour SketchUp)	Excellente (intégration directe et mise à jour en direct)
Bibliothèque d'assets	Très riche (des milliers d'objets et de matériaux)	Limitée (moins de 1 000 matériaux, nécessite des bibliothèques externes)	Riche (plus de 5 000 objets et 800+ matériaux prêts à l'emploi)

Tableau 1.5 : Comparaison de Lumion avec d'autres moteurs de rendu

Lumion se distingue par sa rapidité et sa simplicité d'utilisation, permettant de générer des rendus de haute qualité avec des effets avancés, tout en étant particulièrement performant pour les rendus en temps réel. Son intégration avec SketchUp est fluide, et bien que la qualité de rendu soit légèrement inférieure à celle de V-Ray en termes de précision, Lumion compense par une riche bibliothèque d'assets et sa facilité d'utilisation, idéale pour des visualisations rapides. V-Ray, quant à lui, offre une qualité de rendu exceptionnelle avec des images réalistes et une grande précision dans les matériaux et l'éclairage, mais il est plus complexe à utiliser et nécessite une expertise avancée en rendu 3D, ce qui en fait un excellent

choix pour des projets photoréalistes. Enscape, grâce à son intégration directe avec SketchUp, permet des rendus en temps réel avec mise à jour dynamique du modèle et offre une interface intuitive pour des présentations interactives. Bien qu'il n'atteigne pas la précision de V-Ray, Enscape reste une excellente option pour des visualisations rapides et efficaces, avec une bibliothèque d'assets bien fournie.

Pour conclure, les deux outils SketchUp et Lumion se complètent parfaitement dans notre projet. SketchUp offre une modélisation rapide et accessible, idéale pour la phase conceptuelle, tandis que Lumion permet de produire des rendus de haute qualité avec des visualisations dynamiques en temps réel. Ensemble, ils offrent un workflow efficace pour la RM, permettant une gestion fluide de notre projet tout au long du processus de conception, de la modélisation à la visualisation immersive.

CHAPITRE II

CONCEPTION ET PERCEPTION D'UN MODÈLE DE MAISON EN 2D ET RM VIA HOLOLENS 2

Nous effectuons une démonstration du SketchUp Viewer sur Microsoft HoloLens 2 afin d'illustrer la visualisation d'une maison en 3D. Pendant cette démonstration, en collaboration avec notre architecte Alaeddine, nous observons notre modèle de maison à l'échelle réelle (1 : 1) grâce aux capacités de suivi du regard de HoloLens 2. Cela offre une expérience immersive à l'utilisateur dans un environnement virtuel. Cette démonstration montre comment la technologie de RM peut contribuer à améliorer la conception, la construction et la communication dans le domaine de la construction.

2.1 Aperçu architectural d'une maison à l'aide de HoloLens

Grâce au HoloLens, un client potentiel peut explorer une maison virtuelle à taille réelle en se déplaçant autour et à l'intérieur de la maison, en zoomant sur les détails, en tournant les murs et les meubles et en manipulant les éléments de la maison avec des gestes ou des commandes vocales. Par exemple, le client peut entrer dans la maison par la porte d'entrée et se promener dans le salon, en examinant les grandes fenêtres qui offrent une vue panoramique sur la ville.

Les architectes peuvent également utiliser HoloLens pour inspecter les détails

architecturaux de la maison virtuelle et déterminer si les mesures sont précises et si les éléments sont conformes aux normes de construction. Par exemple, ils peuvent examiner la hauteur des plafonds ou la largeur des portes pour s'assurer qu'ils répondent aux exigences de sécurité et de confort.

Les constructeurs peuvent également utiliser HoloLens 2 pour visualiser les plans de la maison virtuelle tout en travaillant sur le site de construction, ce qui peut aider à garantir que la construction est conforme au modèle et aux normes de construction. Par exemple, ils peuvent vérifier que les murs en béton sont alignés correctement et que les fenêtres sont placées correctement.

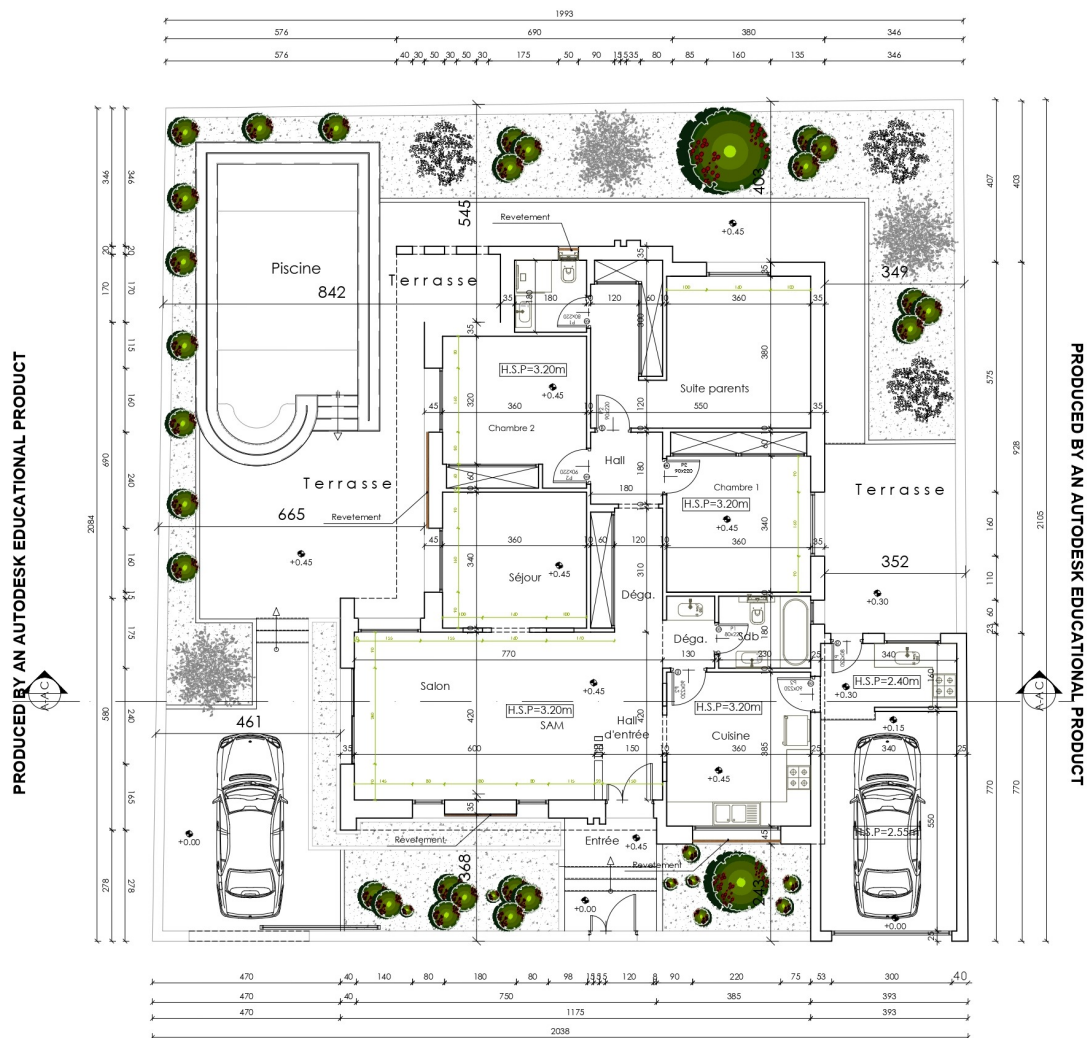
La technologie de RM peut faciliter la communication et la collaboration entre les différents intervenants du projet de construction. Les clients, les ingénieurs, les architectes et les constructeurs peuvent tous visualiser le modèle de la maison en 3D et interagir avec lui en temps réel, ce qui peut améliorer la productivité globale du projet. Par exemple, les clients peuvent visualiser le modèle de la maison virtuelle tout en travaillant avec l'architecte pour concevoir la disposition de la cuisine et des salles de bains.

2.2 Préparation du modèle SketchUp de la maison

Nous sommes intéressés par la conception d'une maison moderne de plain-pied, au design minimaliste avec une surface habitable de 146 m^2 et un garage de 31.43 m^2 . Cette maison est conçue dans un style minimaliste moderne, avec un toit plat et des murs blancs dotés de fenêtres encastrées. Elle est baignée de lumière naturelle, créant ainsi une atmosphère lumineuse et aérée. L'espace de vie est vaste et ouvert, comprenant une cuisine, une salle à manger, une salle de bains, un salon et un petit séjour, ainsi que trois chambres, dont une suite parentale avec un grand dressing et une salle d'eau. La cuisine est accessible

depuis la salle à manger et le salon, ainsi que depuis le garage pour faciliter les tâches ménagères. Elle est équipée d'appareils électroménagers modernes et haut de gamme, tels qu'une plaque de cuisson à induction, un four, un four à micro-ondes et un réfrigérateur-congélateur. La décoration minimaliste de la cuisine comprend des armoires encastrées en blanc brillant et des comptoirs en marbre noir. L'entrée s'ouvre sur un salon intégré à une salle à manger, offrant un accès direct à la piscine. Les larges baies vitrées offrent une vue sur la terrasse, le jardin paysager et la piscine, créant ainsi une atmosphère de détente et de convivialité. Les matériaux modernes tels que l'acier, le verre et le béton, sont utilisés pour créer un design minimaliste épuré et durable. Le spacieux salon est doté d'un canapé en forme de L pouvant accueillir jusqu'à cinq personnes, ainsi qu'une table basse intégrée pour plus de confort. La salle à manger est également intégrée dans cet espace avec une table d'appoint moderne et six chaises pour les dîners formels. Adjacent à la salle à manger et le salon, une petite chambre de séjour s'ouvre sur la piscine pour offrir un espace de détente supplémentaire. Le design minimaliste de la maison permet de mettre en valeur l'environnement naturel et de créer une ambiance apaisante et harmonieuse. L'accès direct à la piscine depuis le salon crée un sentiment d'harmonie entre l'intérieur et l'extérieur, tout en permettant aux invités de profiter du soleil et de la piscine en toute tranquillité.

- ★ Préparer les mesures de notre maison : Avant de commencer à élaborer le plan, nous avons pris des mesures précises de notre maison en nous basant sur le plan AutoCAD fourni par un architecte. Et puis nous devons exporter le plan AutoCAD au format .DWG et l'importer dans SketchUp pour transférer les mesures de notre maison.



Plan RDC

Surface: 146.00m²

Surface garage: 31.43m²

Figure 2.1 : Plan AutoCAD de la maison

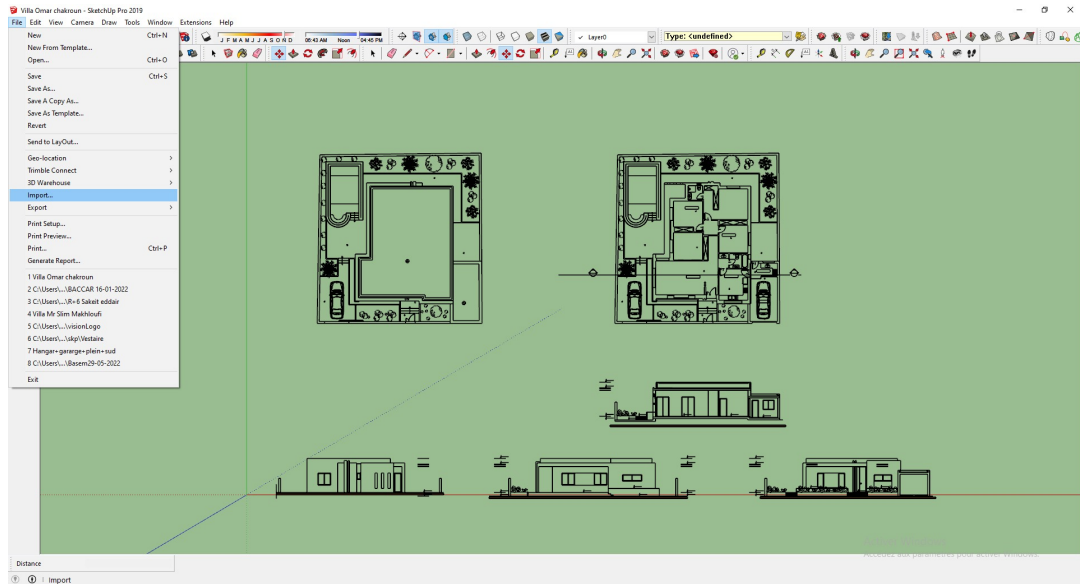


Figure 2.2 : Importation du plan AutoCAD de la maison au SketchUp

- ★ Mettre notre modèle SketchUp à l'échelle : Notre plan AutoCAD est importé dans SketchUp, mais il est possible que les mesures soient différentes de celles de notre modèle SketchUp. Pour vérifier cela, on utilise l'outil "Mesure" dans la barre d'outils pour mesurer une distance précise sur le plan AutoCAD. On peut vérifier si la distance mesurée correspond à la réalité à l'aide d'un ruban à mesurer ou d'un outil de mesure. Si les mesures ne correspondent pas à la réalité, on utilise l'outil "Échelle" de SketchUp pour ajuster la taille de notre modèle SketchUp. En effet, on sélectionne l'outil "Échelle", et puis on clique sur l'un des coins de notre modèle et on le glisse pour agrandir ou réduire la taille.

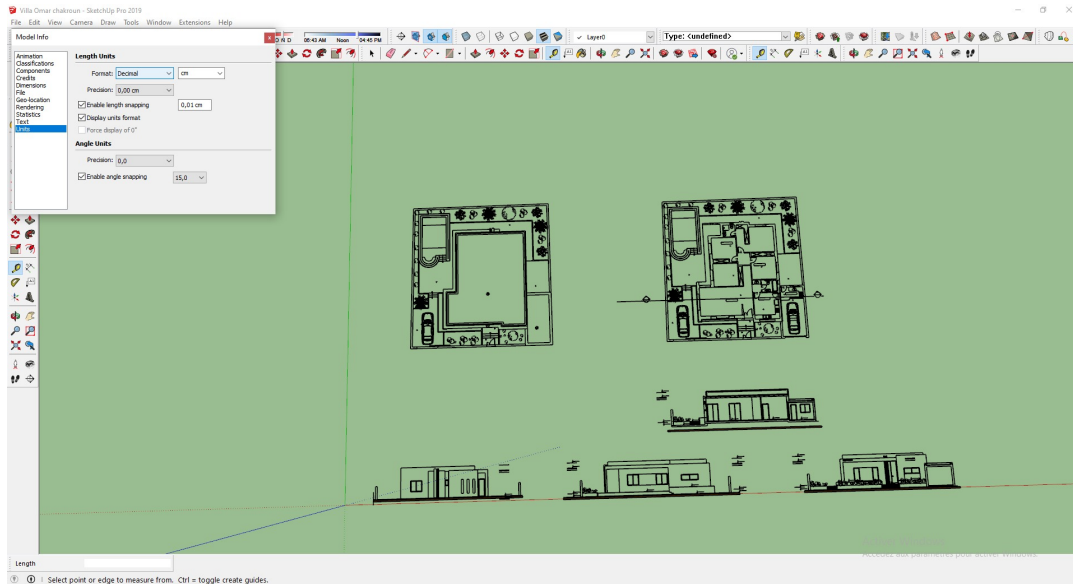


Figure 2.3 : Ajustement de l'échelle du plan de la maison dans SketchUp

★ Convertir le plan en modèle 3D : Il existe plusieurs outils que nous pouvons utiliser pour aider à la modélisation. Il ne faut pas oublier de sauvegarder notre modèle régulièrement au fur et à mesure de la progression de notre travail.

- L'outil "Extrusion" est l'un des outils les plus simples pour créer un modèle 3D à partir d'un plan 2D. On sélectionne la forme que nous voulons extruder, puis en cliquant sur l'outil "Extrusion" nous glissons la souris pour créer la hauteur souhaitée.
- L'outil "Follow Me" permet de créer des formes 3D complexes en suivant un chemin défini. Il peut être utilisé pour créer des éléments architecturaux tels que des colonnes, des arcs et des corniches.
- L'outil "Push/Pull" permet de créer des formes 3D en poussant ou en tirant une surface plane. Cela peut être utilisé pour créer des murs, des toits et des planchers.

- L'outil "Tape Measure" consiste à mesurer les dimensions de notre modèle, ce qui est important pour la précision de la modélisation.
- L'outil "Ligne" est utilisé pour dessiner les murs de notre maison en utilisant les mesures que nous avons prises. Il faut s'assurer de dessiner chaque mur sur le plan horizontal, puis de les lever à la hauteur correcte.
- Nous utilisons l'outil "Rectangle" pour dessiner les zones de plancher, les escaliers, les plafonds, les portes et les fenêtres et autres éléments plats.
- L'outil "Décalage" nous permet pour créer des épaisseurs de mur ou de plancher.
- À la fin, nous utilisons l'outil "Make Group" dans SketchUp pour simplifier la manipulation d'objets dans SketchUp et faciliter la gestion de modèles complexes. Cet outil a été appliqué pour regrouper un ensemble d'entités (objets, lignes, faces, etc.) en une seule entité et ainsi manipuler facilement plusieurs objets en même temps, sans affecter les autres objets dans le modèle.

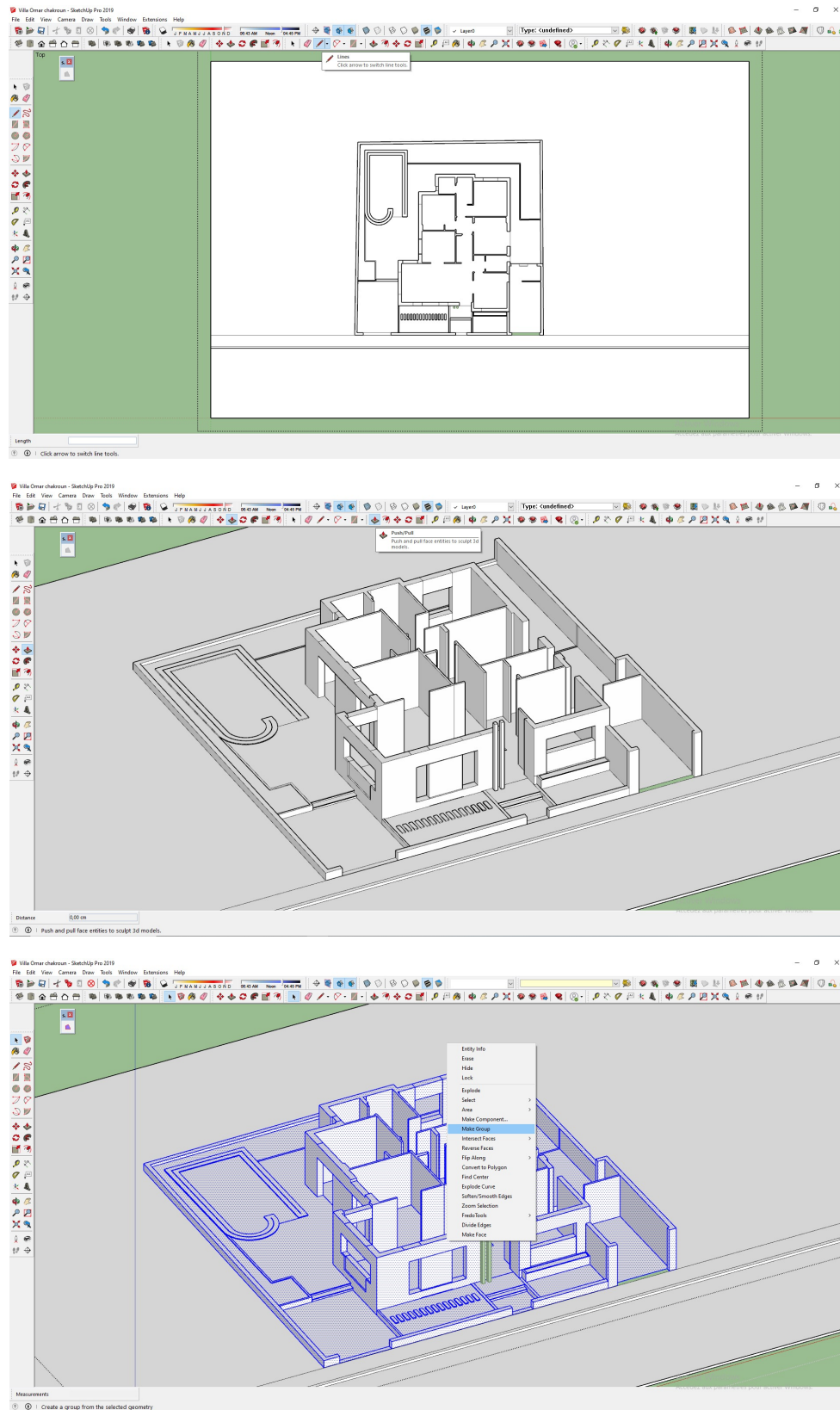


Figure 2.4 : Transformation d'un plan en modèle 3D en plusieurs étapes

- ★ Ajouter les toits : Nous utilisons l'outil "Toit" pour ajouter les toits de notre maison. Nous pouvons choisir différents types de toits tels que les toits en pente, les toits plats ou les toits en mansarde. Dans notre cas, c'est un toit plat.

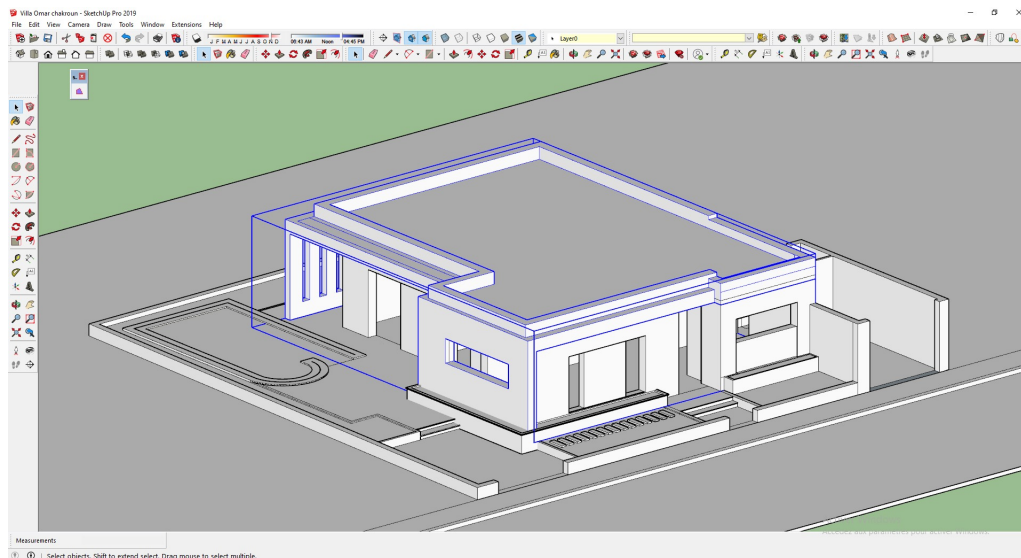


Figure 2.5 : Mise en place du toit

- ★ Ajouter des détails via 3D Warehouse (Trimble Navigation, nd) : C'est une bibliothèque en ligne de modèles 3D gratuits pour SketchUp, créée et maintenue par Trimble Navigation. Elle contient des milliers de modèles 3D créés par des utilisateurs du monde entier, tels que des meubles, des objets décoratifs, des véhicules, des bâtiments, des paysages et bien plus encore. Les modèles peuvent être utilisés pour ajouter des détails à des modèles SketchUp existants ou pour créer de nouveaux modèles. Nous pouvons rechercher des modèles par mot-clé ou par catégorie, et télécharger des modèles pour une utilisation dans SketchUp.
- ★ Ajouter les textures : Nous ajoutons des textures aux murs, aux toits et aux

sols pour donner à notre modèle une apparence plus réaliste. Nous pouvons également ajouter des textures pour les portes et les fenêtres.

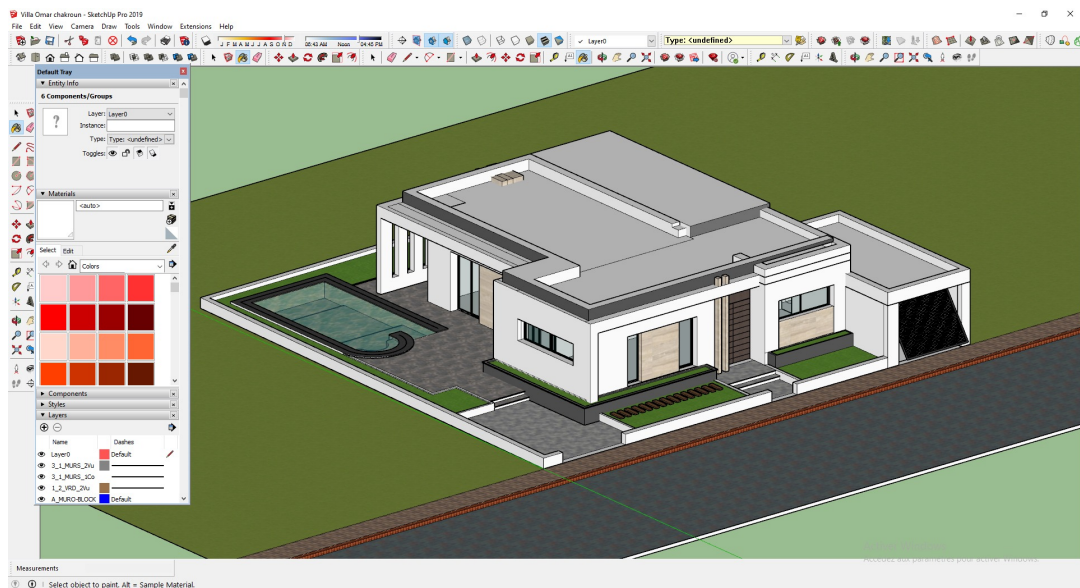
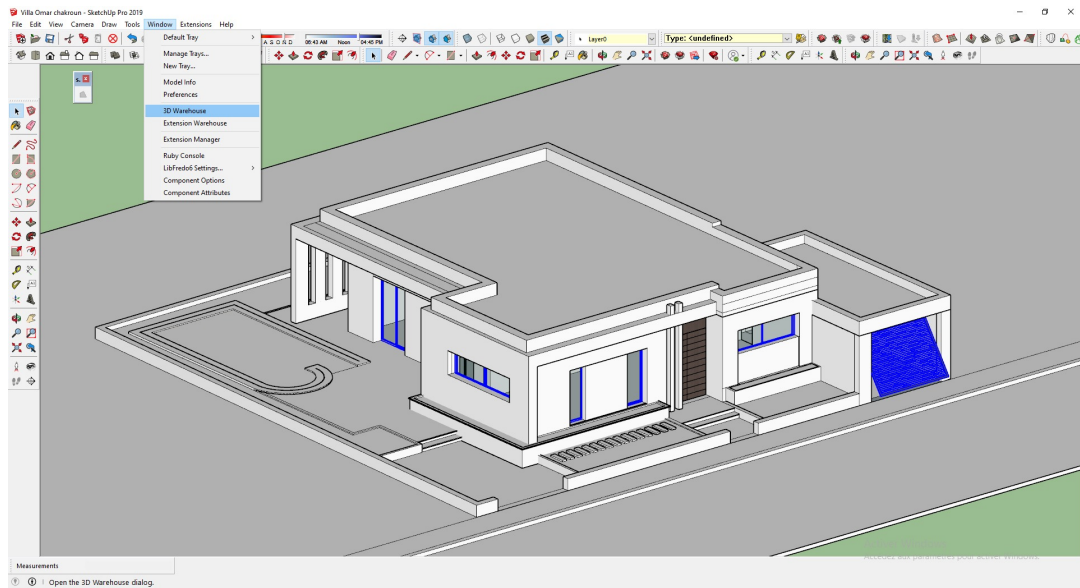


Figure 2.6 : Ajout de détails et d'accessoires à la maison SketchUp

- ★ Enregistrer notre modèle : Une fois que nous avons terminé, nous enregistrons notre modèle SketchUp. Nous pouvons utiliser le logiciel Lumion (Lum, nd) qui est un logiciel de visualisation 3D en temps réel, offre une variété d'options pour ajouter de la vie et de la réalité à nos modèles SketchUp. Il est également utile pour présenter notre modèle de manière professionnelle et convaincante.



Figure 2.8 : Deux façades différentes de la maison à l'aide de Lumion

Il est fréquent de se poser la question suivante : Le logiciel Lumion peut-il s'intégrer à SketchUp Viewer pour HoloLens 2 ? Malheureusement, Lumion ne prend pas directement en charge la réalité virtuelle pour Microsoft HoloLens. Il est conçu pour fonctionner avec des casques RV tels qu'Oculus Rift et HTC Vive, et se connecte à des ordinateurs de bureau ou portables dotés de cartes graphiques puissantes pour un rendu en temps réel de haute qualité. La méthode de projection d'images en temps réel utilisée par HoloLens pour créer des objets de réalité augmentée est différente de celle utilisée par ces casques RV modernes. HoloLens 2 utilise la technologie holographique pour projeter des images virtuelles dans le champ de vision de l'utilisateur, superposant des objets virtuels sur le monde réel. Par conséquent, les images projetées par HoloLens sont semi-transparentes et peuvent être vues à travers l'écran transparent de l'appareil, permettant aux utilisateurs de voir à la fois le monde réel et les objets virtuels.

2.2.1 Configuration de Microsoft HoloLens 2

La configuration de HoloLens 2 peut varier en fonction des spécifications du modèle et de la région où il est vendu.

Pour configurer Microsoft HoloLens 2, on suit les étapes suivantes :

- ★ Allumer HoloLens 2 en appuyant sur le bouton d'alimentation situé sur le côté droit du casque.
- ★ Sélectionner notre langue et notre région à l'aide de la commande gestuelle.
- ★ Connecter HoloLens 2 à un réseau Wi-Fi en entrant les identifiants.
- ★ Mettre à jour le système d'exploitation et les applications préinstallées en suivant les instructions à l'écran.
- ★ Créer un compte Microsoft ou connectons-nous à un compte existant pour accéder à Microsoft Store et télécharger des applications.

- ★ Configurer le suivi de l'utilisateur en utilisant la commande gestuelle pour définir la position des yeux et des mains de l'utilisateur.
- ★ Calibrer les capteurs de profondeur pour améliorer la précision de la reconnaissance des gestes et des mouvements de l'utilisateur.
- ★ Personnaliser les paramètres du casque, tels que la luminosité de l'affichage, le son et la langue.
- ★ Enregistrer notre casque pour bénéficier des mises à jour logicielles et de l'assistance technique.

Une fois la configuration terminée, l'appareil est prêt à exécuter des applications de RM et à explorer des environnements virtuels à l'aide de commandes gestuelles.

2.2.2 Importation du modèle SketchUp maison dans SketchUp Viewer

Voici les étapes pour importer un modèle SketchUp maison dans SketchUp Viewer sur HoloLens 2 :

- ★ Ouvrir notre modèle dans SketchUp Pro.
- ★ S'assurer que le modèle est prêt à être exporté en vérifiant qu'il ne comporte pas d'erreurs et qu'il est correctement texturé.
- ★ Sélectionner Fichier > Exporter > Modèle 3D dans le menu de SketchUp.
- ★ Dans la boîte de dialogue "Exporter le modèle", sélectionner le format de fichier ".skp" pour l'exportation.
- ★ Enregistrer le fichier dans un emplacement facilement accessible sur notre ordinateur.
- ★ Ouvrir SketchUp Viewer sur notre appareil HoloLens 2.
- ★ Sélectionner "Ouvrir" dans le menu principal de SketchUp Viewer.
- ★ Rechercher et sélectionner le fichier ".skp" que nous avons exporté précédemment.

- ★ Attendre que le modèle soit chargé dans SketchUp Viewer.
- ★ Utiliser les commandes gestuelles pour interagir avec le modèle et explorer la maison en RM.

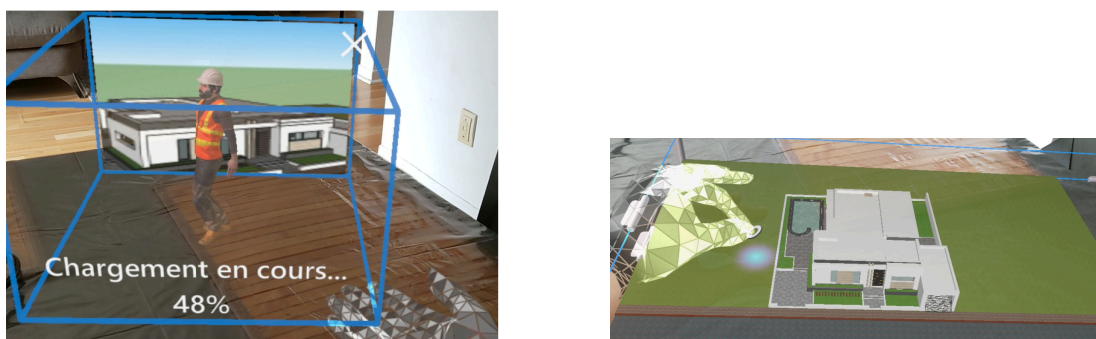


Figure 2.9 : Chargement du modèle dans SketchUp Viewer sur HoloLens 2

Notons que certaines fonctionnalités avancées de SketchUp, telles que les animations ou les composants dynamiques, peuvent ne pas être prises en charge dans SketchUp Viewer. Il est donc conseillé de tester le modèle avant de le présenter à un public.

2.3 Démonstration

Notre démonstration de SketchUp Viewer pour une maison sur HoloLens 2 offre aux utilisateurs une expérience immersive permettant de visualiser et de manipuler un modèle 3D de maison dans un environnement virtuel. Grâce aux capacités avancées de suivi des mouvements de la tête, des mains et des yeux de HoloLens 2, les utilisateurs peuvent explorer et interagir avec la maison virtuelle à taille réelle. Ils peuvent aussi se déplacer dans l'espace, zoomer et pivoter le modèle, et manipuler les différents éléments de la maison en utilisant des commandes gestuelles ou vocales.

La présentation de SketchUp Viewer pour une maison sur HoloLens 2 offre de nombreux avantages pour l'industrie de la construction. Elle permet aux clients de visualiser et de comprendre les plans de construction de manière plus concrète, ce qui peut faciliter la prise de décision et réduire les coûts liés aux changements de dernière minute. Les ingénieurs et les architectes peuvent également utiliser la RM pour détecter et corriger les erreurs de conception avant la construction réelle, ce qui peut réduire les coûts et les retards de construction. Enfin, la technologie de RM peut améliorer la communication entre les différents intervenants du projet de construction, favorisant ainsi la collaboration et la productivité globale.

2.3.1 Utilisation de la fonctionnalité de placement pour positionner la maison dans l'espace

Lorsque nous utilisons SketchUp Viewer sur HoloLens 2, nous pouvons utiliser la fonctionnalité de placement pour positionner le modèle de notre maison virtuelle dans l'espace réel. Cette fonctionnalité utilise les capteurs de suivi de l'appareil pour placer notre modèle à l'emplacement exact où nous voulons qu'il soit dans notre environnement physique.

Pour utiliser la fonctionnalité de placement, on suit les étapes suivantes :

- ★ Ouvrir SketchUp Viewer sur notre HoloLens 2 et sélectionner le modèle de notre maison virtuelle.
- ★ Sélectionner l'icône "Placement" dans la barre d'outils située en haut de l'écran.
- ★ Placer le modèle de notre maison virtuelle à l'emplacement souhaité en regardant l'endroit où nous souhaitons le placer et effectuer un air tap avec le doigt.
- ★ Ajuster la taille de notre modèle en utilisant les gestes de pincement pour

agrandir ou réduire la taille.

- ★ Utiliser les gestes de glissement pour faire pivoter le modèle dans la direction souhaitée.
- ★ Pour fixer le modèle en place, faire un autre geste de tapotement de l'air avec notre doigt.
- ★ Le modèle est maintenant placé dans l'espace réel et nous pouvons nous déplacer autour de lui pour l'observer sous tous les angles.

En utilisant la fonctionnalité de placement, nous pouvons positionner notre modèle de maison virtuelle à l'endroit précis où nous voulons qu'il soit dans notre environnement réel, ce qui aide à mieux visualiser comment il s'intégrera dans notre environnement physique. Cela peut être utile pour planifier l'emplacement de la maison sur le terrain, ou pour voir comment elle sera visible depuis différents angles et perspectives.

2.3.2 Utilisation des outils pour explorer et visualiser la maison en RM

Les outils immersifs de SketchUp Viewer sur notre HoloLens 2 sont un ensemble de fonctionnalités qui améliorent l'expérience immersive de l'utilisation de l'application en réalité augmentée. Ces outils sont conçus pour nous aider à naviguer et à interagir avec nos modèles SketchUp de manière plus intuitive et naturelle en utilisant les capacités de calcul spatial de HoloLens 2.

Parmi les outils immersifs disponibles dans SketchUp Viewer pour HoloLens 2, on peut citer :

- ★ Déplacement : Pour déplacer la maison, on la pointe avec notre regard et on fait glisser notre doigt sur l'écran dans la direction dans laquelle nous souhaitons la déplacer. Si nous souhaitons déplacer la maison dans un plan

spécifique, nous pouvons utiliser un geste de glissement diagonal pour verrouiller l'axe de déplacement.

- ★ Rotation : Pour faire pivoter la maison, on la pointe avec notre regard et faites glisser notre doigt sur l'écran dans la direction dans laquelle nous souhaitons la faire pivoter. Si nous souhaitons faire pivoter la maison selon un axe spécifique, nous pouvons utiliser un geste de rotation diagonal pour verrouiller l'axe de rotation.
- ★ Redimensionnement : Pour modifier la taille de la maison, on la pointe avec notre regard et utilisons un geste de pincement pour l'agrandir ou la réduire. Nous pouvons également utiliser des gestes de glissement pour modifier la hauteur, la largeur ou la profondeur de la maison individuellement. Pour agrandir ou réduire la taille de notre modèle, nous utilisons des gestes de pincement. Nous écartons nos doigts pour zoomer, et nous rapprochons-les pour réduire la taille.
- ★ Verrouillage de la position et de la taille : Si nous souhaitons verrouiller la position ou la taille de la maison, nous pouvons utiliser un geste de maintien avec deux doigts pour sélectionner la maison, puis utiliser les gestes de maintien avec un seul doigt pour verrouiller ou déverrouiller la position ou la taille.

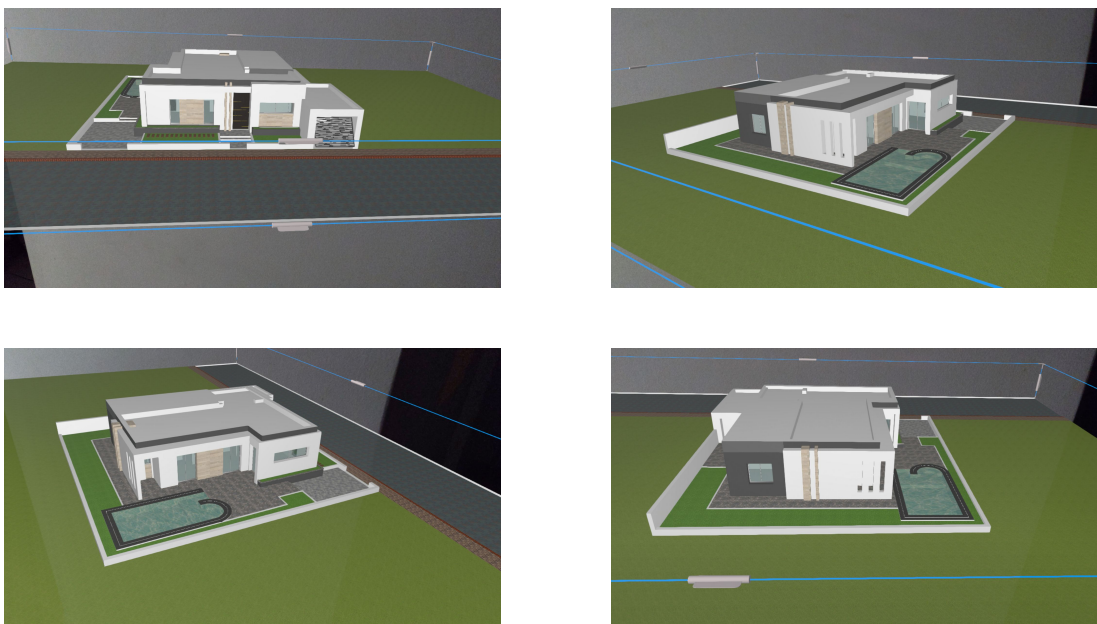


Figure 2.10 : Placement et orientation de la façade principale : vers la droite, la gauche, le haut ou le bas

- ★ Utiliser l'outil de "sauter" : Nous allons passer en mode immersif en utilisant " l'outil de sauter " à partir du menu d'invocation, puis nous allons placer juste devant la porte principale de notre maison. Ici, on peut constater que le mode immersif est activé, avec le modèle rendu à l'échelle 1 : 1. Si nous levons la main, on peut voir que SketchUp Viewer nous place automatiquement dans l'outil de sauter afin que nous puissions commencer à sauter immédiatement et faire un tour soit à l'intérieur ou l'extérieur de la maison. D'autre part, dans l'outil de "sauter", nous avons la possibilité d'ajuster la hauteur des yeux en appuyant sur les flèches vers le haut ou vers le bas. Il est à noter que l'outil d'ascenseur est disponible dans le panneau d'outils, ce qui peut être pratique pour naviguer à travers des projets qui ont plusieurs étages. Toutefois, puisque notre modèle est une maison à un seul niveau, l'utilisation de cet outil ne sera pas nécessaire.

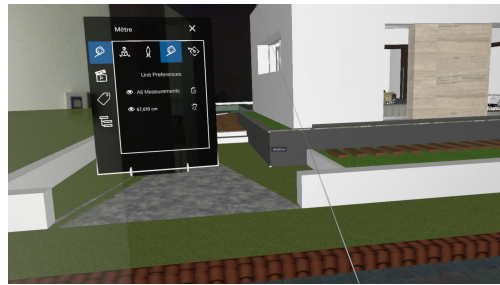
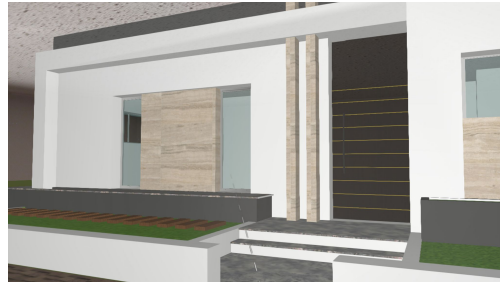


Figure 2.11 : Positionnement à l'échelle 1 : 1 devant l'entrée principale

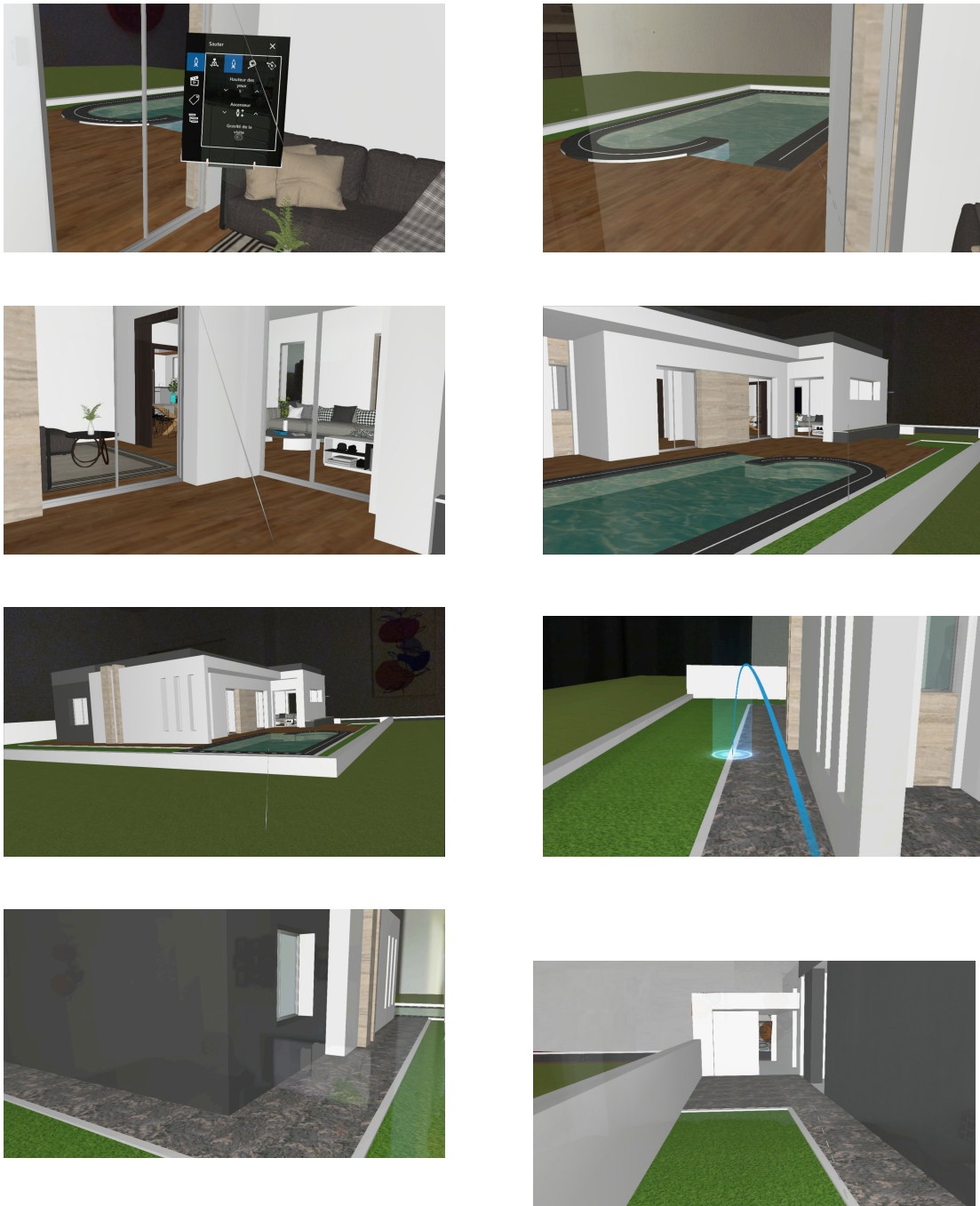


Figure 2.12 : Déplacement dans les couloirs et les terrasses extérieurs de la maison dans l'échelle 1 : 1



Figure 2.13 : Déplacement à l'intérieur de la maison dans l'échelle 1 : 1

En utilisant ces commandes, nous pouvons explorer notre modèle de maison virtuelle en RM sous tous les angles et perspectives, et examiner les détails de près. Cela peut être utile pour vérifier l'agencement des pièces, pour visualiser l'intérieur de la maison, ou pour inspecter les détails architecturaux.

2.3.3 Interaction avec les objets dans la maison pour voir des informations complémentaires

Dans SketchUp Viewer sur HoloLens 2, nous pouvons interagir avec les objets dans notre modèle de maison pour voir des informations supplémentaires. Voici comment procéder :

- ★ Affichage des informations : Une fois l'objet sélectionné, nous pouvons afficher des informations supplémentaires sur celui-ci. Par exemple, si nous sélectionnons une porte, nous pouvons voir des informations sur ses dimensions, son emplacement et son orientation. Pour afficher ces informations, nous utilisons un geste de maintien avec un seul doigt sur l'objet sélectionné pour faire apparaître un menu contextuel, puis nous sélectionnons "Afficher les informations".



Figure 2.14 : Identification de deux entités : un plot de terre et un plateau en bois

- ★ Utilisation des calques pour afficher ou masquer certains objets dans le modèle : Cela peut nous aider à visualiser les différents aspects de la maison et

à obtenir des informations supplémentaires sur chaque partie. Par exemple, pour masquer le toit dans le modèle, on peut accéder à la liste de tous les calques présents dans le modèle, sélectionner le calque contenant le toit, puis désactiver ce calque en cliquant sur l'icône d'il à côté de son nom. De cette façon, le toit est masqué dans le modèle et il devient alors possible d'observer les détails de la structure sous-jacente.

En utilisant cette méthode, on peut masquer ou afficher différents objets dans notre modèle SketchUp Viewer Hololens 2 en fonction de nos besoins.

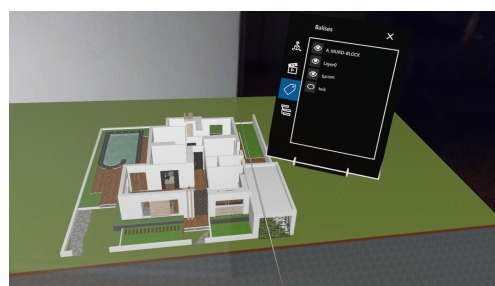


Figure 2.15 : Maquettes d'intérieur de maison sans toit

En interagissant avec les objets dans notre modèle de maison, nous pouvons ob-

tenir des informations supplémentaires et effectuer des modifications précises en temps réel. Cela peut être particulièrement utile lors de la planification de la conception de notre maison ou lors de l'inspection de modèles de maisons existants pour des projets de rénovation.

2.3.4 Synthèse de la démonstration

Voici une synthèse des résultats et observations que nous avons pu observer en comparant l'utilisation de SketchUp Viewer sur HoloLens avec celle de SketchUp 2D pour la conception d'une maison lors de notre démonstration.

- ★ Visualisation immersive : La visualisation en 3D immersive sur HoloLens permet de mieux comprendre les proportions de la maison et les interactions avec le paysage environnant, contrairement à SketchUp 2D qui ne permet qu'une visualisation plate. Par exemple, les utilisateurs pourraient explorer et visualiser l'espace de vie de manière immersive, en se déplaçant virtuellement à l'intérieur et à l'extérieur de la maison. Ils pourraient utiliser la RM pour mieux appréhender les dimensions et les proportions de l'espace de vie, notamment en observant les perspectives et les détails de la maison tels que les fenêtres encastrées, les baies vitrées arrière, les jardins paysagés et la piscine. Comparativement, l'utilisation de SketchUp 2D pour la conception de cette maison serait plus limitée, car les utilisateurs ne pourraient qu'observer la maison sous forme de plan et d'élévations, sans pouvoir se déplacer à l'intérieur ou voir les détails de manière immersive. La visualisation immersive de SketchUp Viewer sur HoloLens permet donc une meilleure compréhension de l'espace de vie et des détails de la maison, offrant ainsi une expérience de conception plus complète et satisfaisante pour les utilisateurs.
- ★ Collaboration en temps réel : La collaboration en temps réel avec les clients

et les partenaires de projet est plus facile avec SketchUp Viewer sur HoloLens, ce qui facilite l'itération et la conception d'une maison personnalisée. En revanche, avec SketchUp 2D, la collaboration se fait plus difficilement, car les clients ont du mal à se projeter dans l'espace (Carrasco et Chen, 2021b).

- ★ Détection des conflits : Grâce à la visualisation en 3D immersive sur HoloLens, il est facile de repérer les conflits dans la conception de la maison, comme les problèmes de circulation, les espaces de vie mal agencés ou les erreurs de mesure. Ce qui peut éviter des coûts supplémentaires et des retards. Avec SketchUp 2D, cette détection est plus difficile, car il est difficile de se projeter dans l'espace.
- ★ Prise de décision rapide : La visualisation en temps réel et la possibilité de se déplacer dans l'espace en temps réel avec SketchUp Viewer sur HoloLens permet une prise de décision rapide et facile. Les clients peuvent voir l'effet de leurs décisions sur la conception de la maison en temps réel, ce qui facilite la prise de décision. Avec SketchUp 2D, la prise de décision est plus difficile, car les clients ont du mal à se projeter dans l'espace.
- ★ Réduction des coûts : Grâce à la détection des conflits et à une collaboration efficace, SketchUp Viewer sur HoloLens peut contribuer à réduire les coûts de conception et de construction, ce qui peut être un avantage pour la construction de cette maison. En s'appuyant sur les travaux de (Paes, 2020), l'usage de la RM permet de réduire les erreurs de chantier de 2 % à 5 % du budget total grâce à une détection des problèmes 35 % plus rapide. L'outil devient ainsi rentable dès qu'une seule erreur de coordination majeure est évitée avant la construction.

L'utilisation de l'échelle réelle SketchUp Viewer est plus avantageuse que l'échelle 2D pour évaluer la systématisation, la disposition, les limites spatiales, les infor-

mations sensorielles et surtout l'aménagement d'une maison, car elle permet une visualisation plus précise et réaliste des dimensions et de l'agencement de l'espace.

Lors de notre démonstration, voici quelques exemples de questions et réponses pour illustrer la différence entre l'utilisation de l'échelle réelle SketchUp Viewer et l'échelle 2D pour évaluer la systématisation d'une maison avec une entrée principale donnant sur un salon, un séjour donnant sur une piscine, et une cuisine distincte :

★ Question (échelle 2D) : À quelle distance se trouve la piscine par rapport au salon et à la cuisine ? À partir d'une échelle 2D, il est possible de mesurer la distance approximative entre la piscine, le salon et la cuisine en utilisant l'échelle et les mesures précises de la planche. La piscine semble être à environ 10 mètres du salon et à environ 15 mètres de la cuisine.

★ Question (échelle 2D) : Comment évaluer la vue depuis le salon et le séjour sur la piscine avec une échelle 2D ?

Avec une échelle 2D, il peut être difficile d'évaluer la vue depuis le salon et le séjour sur la piscine, car elle ne prend pas en compte la profondeur et la perspective. Cependant, vous pouvez évaluer la vue en utilisant des mesures approximatives de distance et de hauteur par rapport aux murs et aux fenêtres. Vous pouvez également utiliser des images ou des dessins de référence pour vous donner une idée de l'apparence de la vue depuis différents angles. En revanche, l'utilisation d'une échelle réelle SketchUp Viewer serait plus avantageuse, car elle permettrait une représentation plus précise et réaliste de la vue.

★ Question (échelle 2D ou échelle réelle SketchUp Viewer) : Est-ce que la piscine est suffisamment éloignée de la maison pour des raisons de sécurité ? Si vous utilisez l'échelle 2D, il peut être difficile de répondre à cette question

avec précision, car il est difficile de visualiser la distance entre la maison et la piscine. Cependant, en utilisant l'échelle réelle SketchUp Viewer, il est possible de mesurer avec précision la distance entre la maison et la piscine et de déterminer si elle est suffisante pour des raisons de sécurité. Il est également possible de créer des simulations pour évaluer les risques potentiels en cas d'accident, tels que des projections d'eau sur les fenêtres ou des chutes accidentelles.

- ★ Question (échelle 2D) : Y a-t-il suffisamment d'espace pour les meubles : un canapé de forme L de cinq places, une table basse et un ensemble table de salle à manger (six chaises et une table d'appoint moderne de 120 cm de diamètre) que nous prévoyons d'installer dans le salon ? Si oui, est-il possible pour une personne de se déplacer de la cuisine jusqu'au séjour en passant par l'espace situé à droite du salon sans déranger les personnes assises à table en train de manger ?

Il est possible que l'utilisation de l'échelle 2D permette d'évaluer si les meubles mentionnés peuvent être disposés dans le salon sans être encombrants. Cependant, il est difficile de déterminer si une personne peut se déplacer de la cuisine jusqu'au séjour en passant par l'espace situé à droite du salon sans déranger les personnes assises à table en train de manger, car l'échelle 2D ne permet pas de visualiser la profondeur de la pièce et l'agencement des meubles dans l'espace en trois dimensions.

- ★ Question (échelle réelle SketchUp Viewer) : Y a-t-il suffisamment d'espace pour installer un îlot dans la cuisine ?

La réponse est Non. L'utilisation de l'échelle 2D ne permet pas de répondre à cette question de manière satisfaisante. En revanche, l'utilisation de l'échelle réelle SketchUp Viewer permet de modéliser l'espace disponible dans la cuisine et de simuler l'installation de l'îlot de cuisine afin de déterminer si son

placement compromettrait la circulation ou la fonctionnalité de la cuisine.

- ★ Question (échelle réelle SketchUp Viewer ou échelle 2D) À quelle hauteur doit être placé le comptoir de cuisine pour une personne de taille moyenne ?
La réponse à cette question dépend de la taille de la personne et de sa préférence ergonomique, mais en général, le comptoir de cuisine est placé à une hauteur de 85 à 90 cm pour une personne de taille moyenne. Il est important de considérer les activités qui seront effectuées sur le comptoir, comme la préparation des aliments, la cuisson, etc., pour déterminer la hauteur idéale. L'utilisation d'un logiciel comme SketchUp Viewer ou SketchUp 2D permet de visualiser la hauteur du comptoir par rapport aux autres éléments de la cuisine et de l'ajuster en conséquence pour assurer un espace de travail confortable et ergonomique.

- ★ Question (échelle 2D) : Quelles sont les dimensions des portes et des fenêtres dans la pièce ?

Les dimensions des portes et des fenêtres peuvent être mesurées à l'aide d'un ruban à mesurer sur un plan 2D.

- ★ Question (échelle réelle SketchUp Viewer) : Y aura-t-il des modifications apportées aux portes et aux fenêtres existantes ?

Le SketchUp Viewer permet de créer une modélisation en 3D des portes et des fenêtres existantes afin de pouvoir examiner et évaluer les modifications possibles quant à leur dimension et leur emplacement.

- ★ Question (échelle réelle SketchUp Viewer) : Comment cela affectera-t-il la lumière naturelle dans le salon ?

En utilisant SketchUp Viewer, il est possible de modéliser la lumière naturelle dans la pièce en fonction de l'emplacement des fenêtres et de la position du soleil à différents moments de la journée. Les modifications apportées aux portes et aux fenêtres peuvent ensuite être évaluées pour déterminer

leur impact sur la lumière naturelle dans le salon.

Au cours de notre démonstration, nous avons comparé l'utilisation de SketchUp Viewer sur HoloLens avec celle de SketchUp 2D pour la conception d'une maison. Après avoir analysé les résultats, il est apparu que SketchUp Viewer sur HoloLens offre une expérience de conception plus immersive et plus intuitive que SketchUp 2D. Cette expérience plus aboutie de la conception de la maison nous a permis de mieux comprendre les dimensions et les proportions de l'espace de vie. Nous avons ainsi pu réaliser une maison lumineuse et aérée, avec un grand espace de vie ouvert comprenant une cuisine, une salle à manger et un salon, ainsi que trois chambres dont une suite parentale avec un grand dressing et une salle de bain. Le design minimaliste épuré a été réalisé en utilisant des matériaux modernes tels que l'acier, le verre et le béton pour créer un équilibre entre esthétique et durabilité. Les larges baies vitrées offrent une vue panoramique sur la terrasse, les jardins paysagés et la piscine, permettant ainsi de profiter pleinement de l'espace extérieur.

En général, l'utilisation de SketchUp Viewer sur HoloLens 2 présente de nombreux avantages pour le secteur de la construction. Tout d'abord, la visualisation en 3D immersive permet de superposer les modèles de maisons sur le monde réel, ce qui facilite la compréhension de l'espace et des proportions de la maison. En outre, la collaboration en temps réel avec les clients permet de recevoir des feedbacks en temps réel pour une itération et une conception de maison personnalisée. La détection des conflits facilite la résolution des problèmes avant la construction, réduisant ainsi les coûts et les retards. La visualisation en temps réel permet également une prise de décision rapide et efficace. Enfin, en évitant les erreurs de conception et en facilitant la collaboration, SketchUp Viewer sur HoloLens peut contribuer à réduire les coûts de conception et de construction, ainsi que les coûts de modification en cours de construction.

CHAPITRE III

MODÉLISATION STATISTIQUE DE L'ÉVALUATION SPATIALE D'UN PROJET DE RÉNOVATION DE BUREAU EN 2D, 3D ET RM

Ce chapitre présente la démarche expérimentale adoptée pour analyser la compréhension d'un projet de rénovation architecturale en fonction des modalités de visualisation. Le modèle utilisé simule la transformation d'un bureau d'architecte en un espace de travail collaboratif. Ce travail s'appuie sur l'article (Carrasco et Chen, 2021b), qui décrit une étude menée auprès d'experts en architecture et en génie civil dans le contexte d'un projet de rénovation. Cette étude a montré que les utilisateurs comprennent généralement mieux les conceptions de bâtiments de type bureau que celles de type résidentiel. Pour évaluer cette compréhension, nous avons conçu un questionnaire visant à mesurer la perception des éléments architecturaux selon plusieurs modalités de visualisation. Initialement, l'étude comparait la visualisation 2D sur écran à celle en 3D immersive via HoloLens 2. Toutefois, cette approche ne permettait pas de distinguer si les éventuelles différences de performance étaient dues à l'effet immersif de la RM ou simplement à la représentation en 3D. Afin de lever cette ambiguïté, nous avons introduit une condition expérimentale intermédiaire : la visualisation 3D non immersive sur écran. Trois modalités sont donc testées dans cette étude : la visualisation en 2D sur écran (méthode traditionnelle), la visualisation 3D non immersive sur écran, et la visualisation 3D immersive via HoloLens 2. Cette structure expérimentale permet de

clarifier si l'amélioration des performances observée avec la RM est véritablement liée à l'immersion ou simplement au passage de la 2D à la 3D. Sans cette distinction, les conclusions sur l'apport de la RM pourraient être biaisées. L'étude a été menée auprès de 63 participants, répartis de manière équitable entre les trois groupes. Ce chapitre décrit les modalités de création du modèle, le déroulement de l'expérience, le matériel utilisé, ainsi que la préparation du questionnaire destiné à recueillir les réponses des participants.

3.1 Espace d'expérimentation

Le lieu d'expérimentation est le bureau de notre architecte Alaeddine Ammar. Le bureau est situé au 1er étage de l'immeuble Idriss, appartement A03, sur la route de Tunis à 7,5 kilomètres de Sfax, 3021, Tunisie.



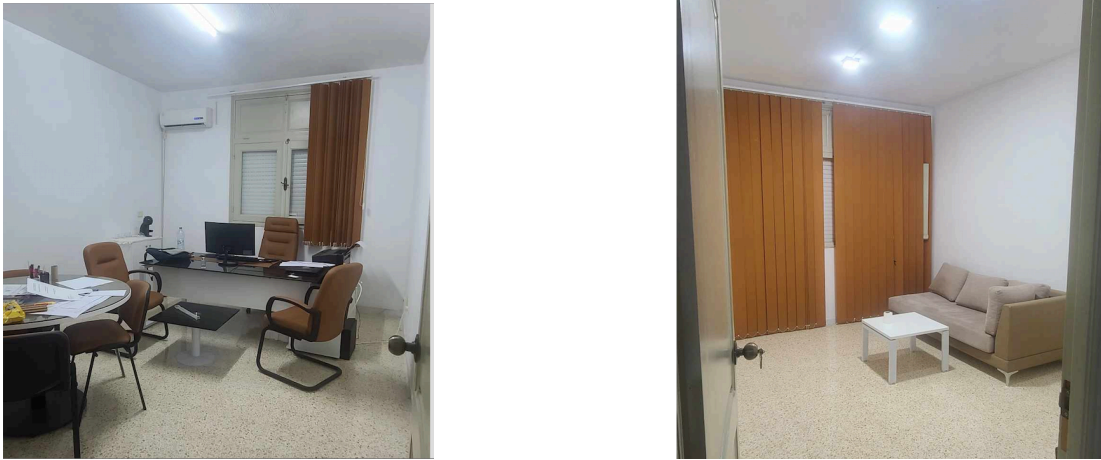


Figure 3.1 : Photographies de l'intérieur du local : la vue 1 (le bureau du directeur), la vue 2 (le bureau du responsable) et la vue 3 (l'entrée principale avec la zone d'accueil).

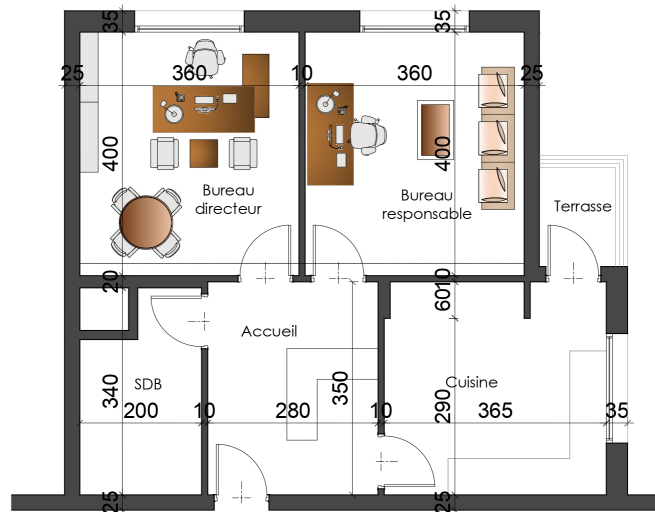


Figure 3.2 : Plan de niveau existant

En collaboration avec notre architecte, nous avons employé la RM pour présenter notre concept architectural aux participants. Notre conception comprend différents espaces avec des fonctions spécifiques, des niveaux de sol variés et des hauteurs de plafonds différents. Cette complexité nous a aidés à voir si les participants pouvaient repérer et comprendre l'ensemble de l'environnement.

La rénovation de cet espace vise à créer un environnement de travail moderne, ouvert, et propice à la collaboration, plutôt qu'un simple bureau. Les espaces rénovés principaux comprennent l'Open-Space, la cuisine, la salle de réunion et la zone de réception. Des améliorations spécifiques incluent le remplacement des fenêtres pour une meilleure luminosité et esthétique, l'ajout d'un faux plafond en staff pour une ambiance chaleureuse dans l'Open-Space, l'utilisation de matériaux de qualité tels que le marbre et le granite dans la cuisine, et la conception ergonomique de la salle de réunion avec un accès à une mezzanine. Dans l'ensemble, cette rénovation vise à favoriser une atmosphère fluide et collaborative entre les employés, tout en intégrant des matériaux modernes et élégants.

3.2 Description et préparation du système

Cette analyse statistique repose sur trois composants essentiels, similaires à ceux utilisés dans le chapitre précédent : un ordinateur, le casque HoloLens 2, ainsi que les logiciels SketchUp et SketchUp Viewer pour la génération d'un modèle 3D holographique. Pour les conditions de visualisation traditionnelles, les logiciels AutoCAD, SketchUp et Lumion 12 ont été mobilisés afin de permettre une comparaison entre la revue de conception en RM, la visualisation en 3D non immersive et les méthodes classiques en 2D.

La création de l'hologramme est réalisée à l'aide de SketchUp, en combinaison avec l'application SketchUp Viewer, qui permet d'exploiter la fonctionnalité de

RM. Cette méthode assure un ajustement précis des dimensions du modèle 3D, aligné à l'échelle 1 : 1 avec l'espace réel, et permet son positionnement exact dans un environnement physique donné.

3.3 Définition des variables

L'objectif de cette expérience est d'évaluer dans quelle mesure la compréhension d'un client vis-à-vis d'un projet architectural est influencée par le mode de visualisation utilisé (variable indépendante), en mesurant le pourcentage de compréhension spatiale (variable dépendante). Pour cela, les participants ont été répartis aléatoirement en trois groupes distincts :

1. Groupe 2D : Les participants ont examiné la conception à partir de plans imprimés en deux dimensions, comprenant des élévations, des coupes, des rendus, ainsi que des détails architecturaux.
2. Groupe RM : Les participants ont exploré la conception à l'aide du casque HoloLens 2, leur permettant de visualiser le projet en RM à l'échelle réelle dans un environnement physique.
3. Groupe 3D non immersif : Ce groupe a visualisé le projet sur écran, au moyen d'une vidéo 3D en haute définition générée à partir des rendus réalisés avec les logiciels SketchUp et Lumion, sans recours à un dispositif immersif.

3.4 Échantillonnage

Lorsqu'un architecte exerce sa profession, il est souvent confronté à une clientèle présentant une grande diversité en termes de culture, d'âge et de niveau de connaissances. Il est important alors que les participants choisis pour cette étude représentent cette diversité culturelle et académique.

En outre, étant donné que chaque région dans un pays peut avoir son propre style architectural distinct, nous avons décidé de limiter l'annonce à une seule région pour éviter tout conflit d'expériences. Nous avons choisi de manière aléatoire plusieurs endroits dans la région de Sfax, en Tunisie. Cela nous a permis de sélectionner des participants répondant aux critères de l'étude, incluant des personnes de milieux culturels différents, de sexes variés, de différentes tranches d'âge et avec des niveaux de connaissances divers. Ces participants ont ensuite choisi volontairement de participer à l'étude en toute conscience.

L'expérience a été menée auprès de 63 participants répartis aléatoirement en trois groupes, dans le but de comparer l'efficacité de la revue de conception architecturale selon trois modalités de visualisation : les capacités holographiques du casque HoloLens 2 (RM), les méthodes traditionnelles en deux dimensions (2D), et une visualisation tridimensionnelle non immersive (3D sur écran).

3.5 Collecte de données

La collecte de données est importante dans tout processus de recherche. Nous examinons alors les méthodes que nous avons adoptées pour obtenir les informations essentielles à notre étude. Nous avons choisi de recueillir les données des participants en utilisant un questionnaire écrit. À cet effet, nous avons conçu un questionnaire spécialement adapté en tenant compte des aspects de perception mentionnés dans le Tableau 1.1, ainsi que des caractéristiques évaluées dans le domaine de la conception architecturale.

3.5.1 Sélection aléatoire des participants et le mode de recrutement

Étant donné que chaque région dans un pays peut avoir son propre style architectural distinct, nous avons restreint l'annonce à la seule région de Sfax, en Tunisie,

afin d'éviter tout conflit d'expérience. Nous avons sélectionné aléatoirement plusieurs endroits dans cette région et sollicité nos amis et proches pour distribuer des affiches détaillant un aperçu général de l'expérience, l'adresse, ainsi que mon numéro de téléphone pour rejoindre et prendre rendez-vous. Cette approche nous a permis de choisir des participants variés, issus de différents milieux culturels, sexes, tranches d'âge (de 22 à 67 ans), et niveaux d'expérience professionnelle et éducatives.

3.5.2 Information des participants et le processus de collecte des données

Les participants ont été invités à se rendre au bureau de notre architecte. Nous avons élaboré la conception architecturale de la rénovation de ce bureau en un espace de travail collaboratif. Cette conception comprenait les capacités holographiques de HoloLens 2, les méthodes traditionnelles en 2D et une visualisation tridimensionnelle non immersive (3D sur écran). Les participants ont été informés verbalement des objectifs de l'étude à travers une vidéo projetée sur un téléviseur, et ils ont choisi volontairement de participer en toute conscience. En cas d'accord, ils ont été affectés aléatoirement à l'un des trois groupes et invités à explorer le projet selon la méthode assignée, avant de répondre à un questionnaire d'évaluation.

Avant de commencer à répondre au questionnaire, les participants ont signé une section de consentement dans la première page. De plus, j'ai obtenu une copie de leurs pièces d'identité. Une fois les données collectées, les résultats ont été analysés à l'aide d'un formulaire d'évaluation pour obtenir les moyennes et les pourcentages nécessaires à la compréhension des résultats.

Le processus de collecte de données s'est déroulé tout au long du mois d'août 2023, avec une durée d'environ 30 minutes par session, pour les groupes RM et 2D. Dans

le groupe RM, les participants ont commencé par visionner une vidéo explicative de 3 minutes, puis ont inspecté les lieux pendant 1 minute, avant d'utiliser le casque HoloLens 2 pendant 5 minutes. Ils ont ensuite consacré environ 10 minutes à remplir un questionnaire, suivies de 2 minutes supplémentaires avec le casque pour compléter les réponses manquantes. De manière similaire, les participants du groupe 2D ont utilisé des supports traditionnels tels que des plans et des rendus architecturaux imprimés, à la place du casque HoloLens 2. Deux ans plus tard, en juillet 2025, un troisième groupe, intitulé 3D non immersif, a été intégré à l'étude et a suivi une procédure équivalente. La visualisation du projet s'est effectuée à l'aide d'une vidéo 3D haute définition projetée sur écran, réalisée à partir de modèles conçus avec SketchUp et rendus dans Lumion. À la fin de chaque modalité, une phase d'évaluation de 5 minutes a permis de répondre oralement aux questions restées sans réponse ou incorrectes, en alternant entre les méthodes utilisées.

3.5.3 Conception architecturale

Nous avons conçu l'architecture de la rénovation du bureau de notre architecte en un espace de travail collaboratif, comme illustré dans les figures 3.4, 3.5, 3.6. Cette conception incluait les nouveaux plans de rénovation pour les niveaux et les élévations, des rendus conçus avec Lumion, une coupe transversale, ainsi que des perspectives isométriques.

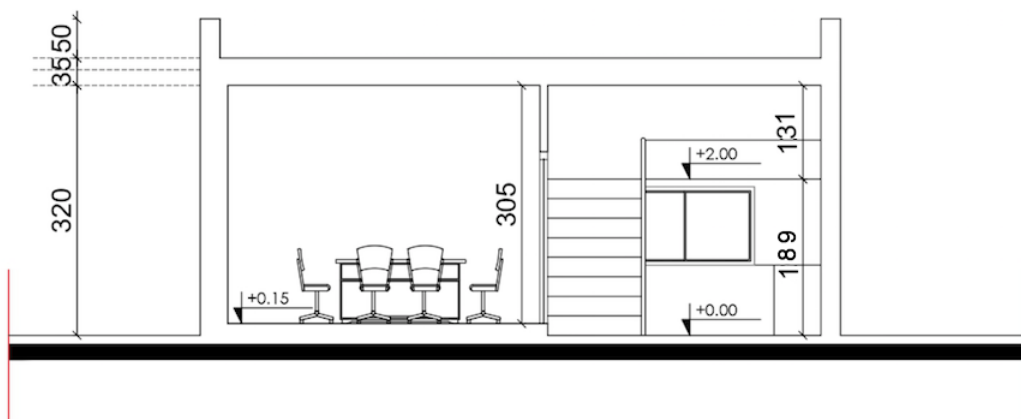
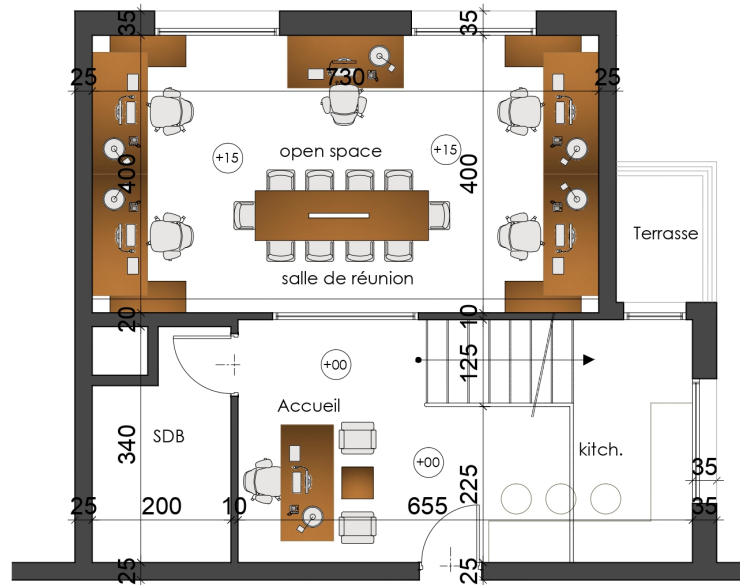


Figure 3.3 : Nouveaux plans de niveau et d'élévation



Figure 3.4 : Rendus : l'accueil, la cuisine, la mezzanine, l'Open-Space et la salle de réunion



Figure 3.5 : Perspectives isométriques



Figure 3.6 : Coupe transversale

L'objectif de notre projet était de fournir les éléments à évaluer dans le questionnaire, en fonction des aspects de perception énoncés dans le Tableau 1.1. Selon cette approche, les phases soumises à évaluation et les caractéristiques intégrées sont les suivants :

1. Phase d'exploration : La première phase consiste à parvenir à une compréhension approfondie de la disposition spatiale, des limites et de l'expérience d'ensemble dans l'environnement rénové. Cette compréhension servira de base pour une évaluation globale de l'environnement rénové. Cette phase est structurée en deux étapes distinctes, chacune ayant ses propres objectifs :
 - Détermination de la disposition et les limites spatiales : L'objectif initial est de comprendre en profondeur les changements structurels apportés de l'espace pendant la rénovation. Cela implique de clarifier les modifications effectuées, en particulier en ce qui concerne les espaces modifiés, les décisions relatives à la démolition ou à la préservation des

cloisons, et la détermination des dimensions finales. L'idée principale est alors d'obtenir une vue détaillée et concrète des évolutions spatiales intervenues.

- Expérience et caractérisation environnementale : L'objectif est d'explorer l'expérience globale de l'environnement rénové. Cela englobe l'identification d'emplacements adaptés pour diverses activités, telles que le pause-déjeuner, le travail, le repos et le stockage des archives au sein de la zone rénovée. Il s'agit de mettre en évidence les aspects fonctionnels et expérimentaux de l'espace rénové.

2. Phase de catégorisation : Il s'agit de créer un ensemble de données détaillées qui permettent d'évaluer l'ensemble de l'environnement rénové d'une manière complète et holistique. Cette phase se décline en trois sous-objectifs, à savoir :

- Informations générales : Cette sous-phase a pour objectif de recueillir des informations générales sur les modifications structurelles, telles que les changements aux fenêtres, aux portes, aux revêtements de sol, et à l'exposition d'éléments structurels tels que les colonnes, poutres et dalles.
- Informations spécifiques : L'objectif ici est de collecter des données spécifiques sur les composants et les matériaux utilisés dans la conception, notamment le nombre et le type de faux plafonds, d'éléments en aluminium, de revêtements de sol, de luminaires, et les matériaux utilisés dans la cuisine.
- Informations sensorielles : Cette étape vise à évaluer l'expérience sensorielle de l'espace, notamment la circulation dans les escaliers et les espaces de réunion, la possibilité de se déplacer dans la zone de travail et d'accéder à la cuisine lorsque d'autres personnes sont présentes, la

capacité de se tenir debout dans la mezzanine et la cuisine en fonction de la taille, et enfin, l'identification des zones où l'espace offre une sensation de fluidité et d'ouverture.

3. Phase de systématisation : Elle vise à évaluer la cohérence environnementale, c'est-à-dire la capacité de décrire l'environnement de manière cohérente et d'identifier sa fonction globale. Cette étape permet d'assurer que l'espace rénové soit conçu de manière à ce que sa structure et son utilisation soient en harmonie, créant ainsi un environnement cohérent et fonctionnel.

- Fonction globale de l'espace : Le but ici est de déterminer la fonction générale de l'espace rénové, que ce soit un lieu de travail, de détente ou de divertissement. Cette information permettra de clarifier l'objectif et l'utilisation prévus pour l'espace rénové.
- Description de la rénovation : Cette étape consiste à demander une description détaillée et personnelle de la rénovation envisagée pour cet espace. Cela inclut les espaces principaux, les matériaux à utiliser, les fonctions à remplir, ainsi que les sensations que l'espace doit évoquer. Toute information pertinente peut être ajoutée pour assurer une compréhension complète de la vision de la rénovation.

3.5.4 Questionnaire

La version définitive du questionnaire, le Tableau 3.2, comprenait un total de 24 questions couvrant divers aspects de la conception architecturale. Chaque question était conçue pour évaluer la compréhension des participants en fonction de leur groupe d'affectation. La dernière question, la 25e, était une question ouverte visant à évaluer le degré de cohérence environnementale perçu par le participant. Cette question offrait aux participants la possibilité de fournir des réponses ouvertes et

approfondies, nous permettant d'obtenir des informations plus détaillées sur leur compréhension de l'environnement. Chaque question du questionnaire était notée sur une échelle de 4 points, permettant de calculer le pourcentage de compréhension atteint par chaque participant. En sommant les scores de chaque question correctement répondue, un score global de compréhension sur 100 pouvait être obtenu pour chaque participant, en fonction de son groupe d'affectation.

En parallèle, un test d'interaction avec le HoloLens 2, composé de 5 questions, avait été réalisé pour évaluer le niveau de confort des participants lors de son utilisation. Ce test vise à évaluer l'expérience de l'utilisateur et à recueillir des informations sur l'efficacité du dispositif en termes de soutien à la compréhension de la conception architecturale.

L'utilisation du questionnaire avec le HoloLens 2 nous a permis d'obtenir des données précises concernant la compréhension des participants et leur expérience avec le dispositif. Ces données ont été essentielles pour effectuer une évaluation approfondie de l'efficacité de la conception architecturale présentée et de l'outil de RM utilisé dans l'étude. Conformément à des recherches antérieures (Paes et Irizarry, 2018), les résultats des tests appliqués aux participants sont résumés dans le tableau suivant :

Test	Mesure	Résultats attendus	
		RM	2D
Niveau de compréhension (25 questions)	Questionnaire (24 questions)	85-95% de compréhension	55-75% de compréhension
	Compréhension globale (1 question)	Score de 4	Score de moins de 4
Interaction avec l'appareil (5 questions)	Questionnaire de qualité ergonomique	< 4 sur les 5 aspects	< 4 sur les 5 aspects

Tableau 3.1 : Résultats attendus pour les tests de l'expérience (Paes et Irizarry, 2018).

Les réponses des participants ont été enregistrées à l'aide du formulaire d'évaluation figurant dans le Tableau 3.3. Nous avons suivi en détail la procédure standard opérationnelle, comme décrite dans le Tableau 3.4. Une fois les données recueillies, les résultats ont été compilés et analysés à l'aide du formulaire d'évaluation pour obtenir les moyennes et les pourcentages nécessaires à la compréhension des résultats. Le tableau suivant présente les questions posées pendant l'évaluation, classées selon leur catégorie.

Questionnaire	
EXPLORATION	
Détermination de la disposition et des limites spatiales	
01	Quels espaces ont été modifiés par rapport à l'existant lors de la rénovation ?
02	Quels murs de cloison seront démolis ou conservés après la rénovation ?
03	Après la rénovation, quelles seront les dimensions totales (longueur et largeur) de l'Open Space ?
Expérience et Définition Environnementales	
04	Où pouvez-vous déjeuner dans la zone de rénovation ?
05	Où pouvez-vous travailler dans la zone de rénovation ?
06	Où pouvez-vous vous asseoir et vous reposer dans la zone de rénovation ?
07	Y a-t-il un espace dédié au rangement des archives dans la zone rénovation ?
CATÉGORISATION	
Informations Générales	
08	Est-ce que les fenêtres ont été modifiées ? Si oui comment ?
09	Est-ce que les portes ont été modifiées ? Si oui comment ?
10	Y a-t-il un changement de niveau entre les revêtements de sols dans l'espace rénové ?
11	Quels éléments structurels (colonnes, poutres, dalle) vont être laissés exposés (non recouverts par aucun type de matériau sauf de la peinture) et lesquels vont être couverts ?
Informations Spécifiques	
12	Combien de types de faux plafonds sont inclus dans la conception, quel est leur matériau ?
13	Combien d'éléments utilisent de l'aluminium ?
14	Combien de types de revêtements de sol sont inclus dans la conception ? Quel est leur matériau ?
15	Combien de types de luminaires sont inclus dans la conception ?
16	Quels matériaux sont utilisés dans la cuisine ?
Informations Sensorielles	
17	Les escaliers de la salle de réunion sont-ils suffisamment larges pour accueillir 3 personnes par rangée ?
18	Est-il possible pour vous de vous déplacer dans la salle de réunion, même si toutes les chaises sont occupées ?
19	Est-il possible pour vous de traverser l'espace de travail jusqu'à la zone de cuisine alors que tout le monde est assis et travaille ?
20	Est-ce que l'espace de la mezzanine est suffisant pour permettre à une personne mesurant 1,65 mètre ou plus de se tenir debout ?
21	Si vous mesurez plus de 1,89 mètre, pourrez-vous vous tenir debout dans la cuisine ?
22	Est-ce que les contremarches de l'escalier menant à la mezzanine sont faciles à monter ?
23	Dans quelle zone l'espace donne-t-il une sensation fluide et ouverte s'il y en a ?
SYSTÉMATISATION	
Cohérence environnementale	
24	Quelle sera la fonction globale de l'espace dans cette rénovation ? (Un lieu de travail, de détente ou de divertissement ?)
25	Veillez décrire en vos propres mots la rénovation qui doit être entreprise dans cet espace. (Par exemple, mentionnez quels sont les espaces principaux, les matériaux, les fonctions et les sensations que l'espace aura. Vous pouvez ajouter toute autre information que vous jugez pertinente.
INTERACTION AVEC L'APPAREIL (basé sur une échelle de Likert)	
26	Le HoloLens était lourd.
27	Le HoloLens était difficile à ajuster.
28	Vos yeux étaient douloureux pendant l'utilisation du HoloLens.
29	Vous avez eu des nausées ou des vertiges en interagissant avec le modèle de réalité mixte.
30	Vous vous êtes senti perdu ou désorienté en explorant le modèle de réalité mixte.

Tableau 3.2 : Questionnaire

FORMULAIRE D'ÉVALUATION

Numéro		Groupe		2D		RM		3D												
Information sur le participant																				
Nom				Âge				Genre												
Niveau d'éducation				Exp. prof.(années)																
Spécialité				Nationalité																
Numéro & score		Modèle utilisé pour répondre à la question					Numéro & score		Modèle utilisé pour répondre à la question											
N	T	S	RM	3D	2D					N	T	S	RM	3D	2D					
					RD	IS	B	P	CP						RD	IS	B	P	CP	
01										13										
02										14										
03										15										
04										16										
05										17										
06										18										
07										19										
08										20										
09										21										
10										22										
11										23										
12										24										
25. Identifiez les fonctions principales de l'expérience																				
Question d'interaction avec l'appareil sur l'échelle de Likert																				
N	Désaccord total		Désaccord		Léger désaccord		Léger accord		Accord	Accord total										
26																				
27																				
28																				
29																				
30																				
Moyennes des réponses						Abréviations : Score (S); Coupe (CP); Rendu (RD); Isométrique (IS); Réalité Mixte (RM); Modèle vidéo (3D); Brouillons (B); Plan (P); Tour de réponse (T) ("T1" premier tour (5 minutes); "T2" deuxième tour; "T3" inversion des groupes.														
		T	S									%								
		1																		
		2																		
		3																		
TOTAL																				

Tableau 3.3 : Formulaire d'évaluation pour l'application de l'expérience

3.5.5 Procédure opérationnelle standard

La procédure standard de l'expérience définie dans le Tableau 3.4, impliquant les trois groupes 2D, 3D et RM, se déroule comme suit :

Dans le groupe 2D, les participants reçoivent les plans et les rendus de rénovation prêts à soumettre (RTA), accompagnés d'une introduction à l'expérience et à ses objectifs. Un architecte leur explique les plans pour les familiariser avec le contenu. Dans le groupe 3D, les participants suivent la même introduction, mais explorent le projet en visionnant directement une vidéo 3D en haute définition, sans explication préalable. Le groupe en RM, quant à lui, utilise exclusivement le modèle RM via un casque HoloLens 2. Après une courte introduction, les participants sont guidés dans la configuration et la prise en main de l'équipement, puis explorent le modèle en RM. Dans les trois groupes, les participants disposent de 5 minutes pour examiner le contenu (plans, vidéo ou modèle RM), puis remplissent un questionnaire, chaque bonne réponse valant 4 points, sinon 0, pour un total maximum de 100 points. Une période supplémentaire de 2 minutes est ensuite accordée pour compléter les réponses manquantes. Les taux de réponses sont enregistrés pour les deux phases d'évaluation (T1 et T2).

Le pourcentage total de compréhension est calculé en cumulant les pourcentages de réponses correctes obtenues lors des sessions T1 et T2, comme présenté dans le Tableau 3.3. En cas de questions non répondues, les participants des groupes 2D et 3D peuvent explorer le projet via le casque HoloLens 2 pour vivre l'expérience en RM, tandis que les participants du groupe RM peuvent consulter les supports traditionnels en 2D.

Procédure opératoire standard de l'expérience	
Groupe 2D ou 3D	Groupe RM
<p>Le groupe 2D recevra uniquement les plans et les rendus de rénovation prêts à soumettre (RTA). Le groupe 3D, quant à lui, visualisera le projet sur écran à l'aide d'une vidéo 3D en haute définition générée à partir de ces rendus. Nous suivrons les étapes décrites ci-dessous :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Une brève introduction à l'expérience et à la recherche sera lue. 2. Les plans (pour le groupe 2D) seront expliqués par notre architecte afin de familiariser les participants avec le contenu. Pour le groupe 3D, les participants visionneront directement la vidéo. 3. Les participants regardent les plans pendant 5 minutes. 4. Après 5 minutes, le participant est invité à compléter notre questionnaire en utilisant un stylo de couleur bleue. 5. Le pourcentage de questions répondues avec la 2D ou la 3D pendant cette première phase (T1) doit être noté dans la section 4, T1 du formulaire, Tableau 3.3. 6. Ensuite, le participant aura 2 minutes de plus pour revoir les informations afin de répondre aux questions manquantes en utilisant un stylo vert. 7. Le pourcentage de réponses fournies à l'aide de la 2D ou de la 3D pour cette seconde phase (T2) devra être enregistré dans la section 4, T2 du formulaire, Tableau 3.3. 	<p>Le groupe RM recevra uniquement le modèle RM et le casque HoloLens 2. Nous suivrons les étapes décrites ci-dessous :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Nous lirons une brève introduction sur l'expérience et la recherche. 2. Nous nous assurerons que le casque HoloLens 2 est correctement positionné sur la tête du participant, et nous confirmerons ensemble que tout est en ordre." 3. Les participants exploreront le modèle pendant 5 minutes. 4. Après 5 minutes, le participant est invité à compléter notre questionnaire en utilisant un stylo de couleur bleue. 5. Le pourcentage de questions répondues avec RM pour cette tour doit être enregistré dans la section 4 du formulaire, le Tableau 3.3. 6. Ensuite, le participant aura 2 minutes de plus pour revoir les informations afin de répondre aux questions manquantes. 7. Le pourcentage de questions répondues avec RM pour cette tour (T2) doit être enregistré jusqu'à présent dans la section 4 T2 du formulaire Tableau 3.3.
<p>La somme des pourcentages obtenus pendant T1 et T2 permet d'obtenir le pourcentage total de compréhension. Étant donné que l'expérience a été annoncée comme une comparaison entre des dessins sur papier et des hologrammes, les étapes suivantes ont été établies pour s'assurer que les participants pouvaient interagir avec tous les modèles utilisés dans l'expérience et avaient la possibilité de faire l'expérience de la RM.</p>	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Si des questions sont restées sans réponse ou ont été incorrectes, le participant devra utiliser le casque de RM pendant une durée de 5 minutes afin d'examiner le modèle RM. 2. Nous reposons ensuite verbalement les questions qui n'ont pas encore obtenu de réponse ou qui ont été mal comprises. 3. Le pourcentage de questions répondues en 2D ou 3D pour cette tour (T3) doit être enregistré à ce stade dans la section 4, T3 du formulaire Tableau 3.3. 4. Les questions 26-30 doivent être posées pour évaluer l'expérience utilisateur avec le HoloLens 2. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Si des questions sont restées sans réponse ou ont été incorrectes, le participant regardera les plans RTA en 2D pendant 5 minutes. 2. Nous reposons ensuite verbalement les questions qui n'ont pas encore obtenu de réponse ou qui ont été mal comprises. 3. Le pourcentage de questions répondues en RM pour cette tour (T3) doit être enregistré à ce stade dans la section 4 T3 du formulaire Tableau 3.3. 4. Les questions 26 à 30 doivent être posées pour évaluer l'expérience utilisateur avec le HoloLens 2.

Tableau 3.4 : Procédure opérationnelle standard (Paes et Irizarry, 2018).

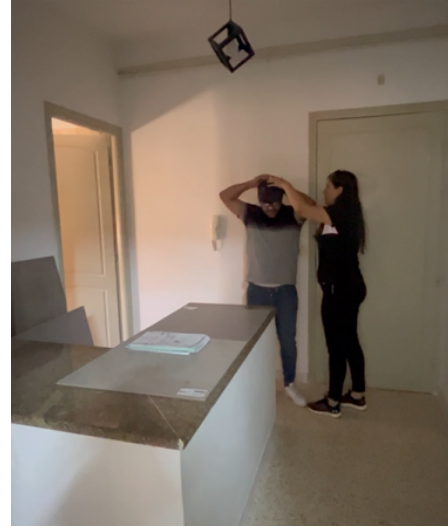
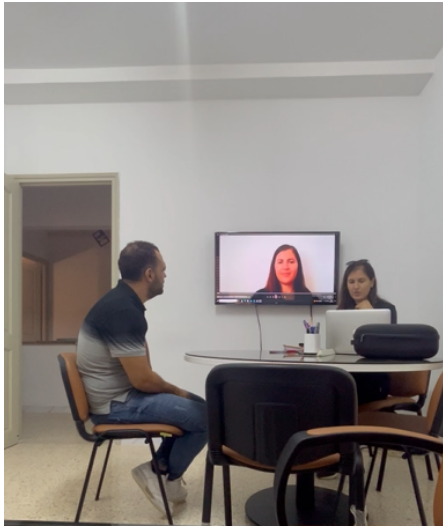


Figure 3.7 : Images capturées pendant l'expérience.



Figure 3.8 : Utilisation de HoloLens 2 pour observer la proposition de conception intégrée à l'environnement réel.

3.6 Présentation des résultats

Au total, 63 participants ont pris part à l'expérience, dont 41 hommes et 22 femmes, répartis équitablement entre les trois groupes : 2D, RM et 3D, avec 21 participants chacun. L'âge moyen était environ 35 ans, avec une plage allant de 18 à 72 ans. En ce qui concerne le parcours académique, les participants étaient répartis en quatre groupes : 21 avaient obtenu un baccalauréat (équivalent du collège au Canada), 17 avaient un niveau universitaire de premier cycle (équivalent au baccalauréat au Canada), 19 étaient au niveau du deuxième cycle universitaire, et 4 étaient doctorants. Par ailleurs, 23 des 63 participants disposaient déjà de connaissances en lecture de plans, acquises dans le milieu professionnel, lors de l'achat de propriétés ou à travers des projets personnels de rénovation.

Groupe RM									
N	Parcours académique	Âge	Genre	Exp. Prof. (années)	Exp. 2D antérieure	Nationalité	Résultat % (3D)	Résultat % (2D)	Résultat % (RM)
01	Ingénieur en génie industriel	26	M	4	Non	France	-	-	96
02	Doctorante en désigne d'espace	29	F	3	Oui	Tunisie	-	-	96
03	Ingénieur en génie industriel	24	M	2	Non	Tunisie	-	-	96
04	Doctorant en informatique	44	M	18	Non	France	-	-	92
05	Licence en finance	26	M	2	Non	Tunisie	-	-	92
06	Licence en comptabilité	27	M	2	Non	Tunisie	-	-	92
07	Architecte d'intérieur	24	M	1	Oui	Tunisie	-	-	92
08	Baccalauréat en informatique	42	F	15	Non	Tunisie	-	-	92
09	Ingénieur en génie industriel	25	M	2	Non	Tunisie	-	-	92
10	Maîtrise (bac+4) en technique	60	F	35	Non	Tunisie	-	-	88
11	Baccalauréat en mécanique	24	M	3	Oui	Tunisie	-	-	88
12	Ingénieur en mécanique	27	M	2	Non	Tunisie	-	-	88
13	Comptabilité	27	M	3	Non	Tunisie	-	-	88
14	Licence en maintenance	25	M	2	Oui	Tunisie	-	-	88
15	Ingénieur en génie industriel	23	M	1	Oui	Tunisie	-	-	84
16	Master en qualité, sécurité et environnement	27	M	3	Non	Tunisie	-	-	84
17	Doctorant en mathématique	37	M	14	Non	Tunisie	-	-	80
18	Ingénieur en génie industriel	24	M	0	Non	Tunisie	-	-	80
19	Licence en génie logistique	23	M	2	Oui	Tunisie	-	-	80
20	Baccalauréat en économique et gestion	24	M	3	Non	Tunisie	-	-	80
21	Master en marketing	28	F	3	Non	Tunisie	-	-	76
Groupe 2D									
22	Baccalauréat en mécanique	67	M	35	Non	Tunisie	-	88	-
23	Ingénieur en génie civil	38	M	15	Oui	Tunisie	-	88	-
24	Ingénieur en génie civil	41	M	17	Oui	Tunisie	-	84	-
25	Doctorante en sciences économiques	36	F	13	Non	Tunisie	-	80	-
26	Baccalauréat en techniques	63	M	40	Non	Tunisie	-	80	-
27	Baccalauréat en maintenance	26	M	6	Oui	Tunisie	-	76	-
28	Maîtrise (bac+4) en finance	41	F	11	Non	Tunisie	-	76	-
29	Licence en informatique	23	M	2	Non	Tunisie	-	72	-
30	Baccalauréat	51	F	30	Non	Tunisie	-	72	-
31	Baccalauréat	48	M	18	Oui	Tunisie	-	72	-
32	Maîtrise (bac+4) en informatique	33	F	15	Non	Tunisie	-	72	-
33	Doctorante en design	30	F	10	Non	Tunisie	-	68	-
34	Licence en management industriel	23	M	2	Non	Tunisie	-	68	-
35	Baccalauréat en mécanique	57	M	30	Oui	Tunisie	-	68	-
36	Baccalauréat en chimie	63	M	30	Non	Tunisie	-	64	-
37	Ingénieur en génie mécanique	27	M	3	Non	Tunisie	-	64	-
38	Baccalauréat en mécanique	22	M	2	Non	Tunisie	-	64	-
39	Baccalauréat en mécanique	57	F	20	Oui	Tunisie	-	60	-
40	Ingénieur en informatique	24	F	0	Non	Tunisie	-	60	-
41	Master en gestion	31	F	10	Oui	Tunisie	-	60	-
42	Baccalauréat en administration	57	F	30	Oui	Tunisie	-	60	-
Groupe 3D									
43	Licence en éducation	26	F	4	Oui	Tunisie	96	-	-
44	Licence en chimie	42	M	15	Non	Tunisie	92	-	-
45	Licence en management industriel	72	M	45	Oui	Tunisie	92	-	-
46	Ingénieur en agriculture	38	F	10	Non	Tunisie	88	-	-
47	Baccalauréat en économie	41	M	15	Non	Tunisie	88	-	-
48	Baccalauréat en lettre	30	M	4	Non	Tunisie	88	-	-
49	Licence en informatique	26	M	2	Oui	Tunisie	88	-	-
50	Maîtrise (bac+4) en comptabilité	41	M	12	Non	Tunisie	88	-	-
51	Baccalauréat	64	F	20	Non	Tunisie	84	-	-
52	Licence en informatique	35	M	10	Non	France	84	-	-
53	Doctorant en économie	42	M	10	Non	Canada	84	-	-
54	Baccalauréat en art	28	M	2	Oui	Tunisie	84	-	-
55	Master en administration et gestion des affaires	43	M	30	Oui	Canada	84	-	-
56	Baccalauréat	62	F	28	Oui	Tunisie	80	-	-
57	Baccalauréat en économie	18	F	0	Non	Tunisie	80	-	-
58	Master en mathématiques	53	M	25	Oui	Tunisie	80	-	-
59	Licence en activité physique et sportive	40	M	12	Non	Tunisie	76	-	-
60	Licence en compatibilité	39	F	10	Oui	Canada	76	-	-
61	Baccalauréat en économie	30	F	2	Non	Tunisie	76	-	-
62	Master en Management de l'Environnement	37	F	10	Oui	Canada	76	-	-
63	Baccalauréat	40	F	5	Non	Tunisie	76	-	-

Tableau 3.5 : Données des participants et résultats des évaluations cognitives en fonction des groupes de traitement.

Les résultats montrent que le groupe 2D affiche la moyenne la plus basse (71,2%) et la plus grande dispersion (écart-type de 9), traduisant une compréhension moins homogène et moins approfondie. La 3D non immersive améliore à la fois la moyenne (83,8%) et la stabilité des résultats (écart-type de 6) par rapport à la 2D, montrant un avantage de la 3D même sans immersion totale. Le groupe RM se distingue par la meilleure moyenne (87,8%) et la variabilité la plus faible (écart-type de 6), indiquant que l'immersion complète favorise une compréhension plus fine et uniforme. Ainsi, les performances progressent clairement de la 2D à la 3D non immersive, puis à la RM, mettant en évidence l'intérêt pédagogique croissant des environnements immersifs. Les boîtes à moustaches présentées assurent la visualisation de ces résultats de manière claire et synthétique.

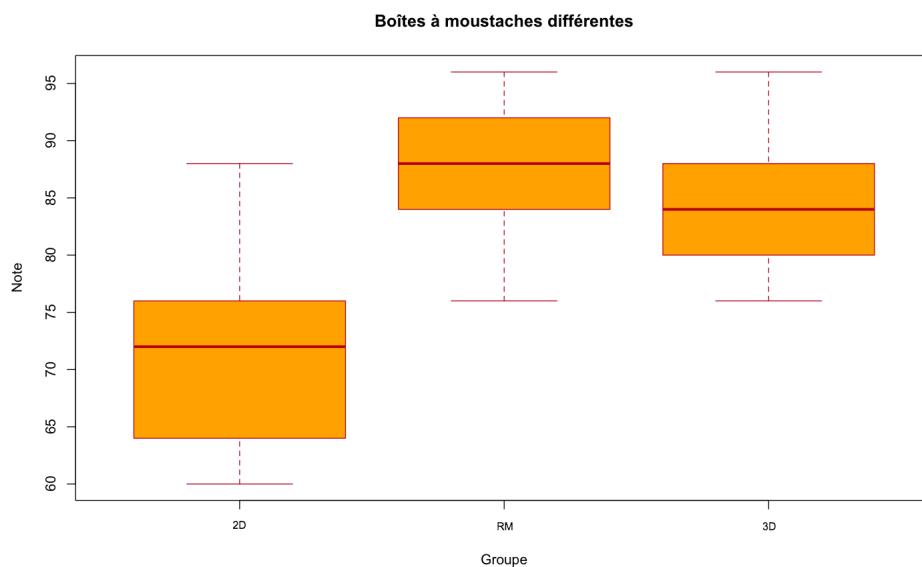


Figure 3.9 : Boîtes à moustaches représentant la distribution de trois groupes distincts, à savoir les groupes 2D, RM et 3D

3.6.1 Analyse détaillée des informations de conception 2D

Dans le groupe 2D, nous avons utilisé le formulaire d'évaluation, le Tableau 3.3, pour consigner et quantifier le type d'informations (rendus, perspectives isométriques, brouillons, plans et coupes transversales) le plus fréquemment utilisé par ses membres dans leur tentative de compréhension de la conception. Cela a été réalisé en comptant combien de fois les participants en 2D ont recouru à un type spécifique de dessin pour fournir des réponses au cours de leur session d'expérimentation. Les résultats indiquent que les plans (plans de niveaux et élévations) sont les plus utiles et les plus faciles à lire, car ils peuvent transmettre rapidement des informations aux participants. La deuxième place revient aux rendus, grâce à l'utilisation de logiciels de visualisation 3D en temps réel, notamment Lumion. La troisième place est attribuée aux perspectives isométriques, la quatrième aux coupes transversales, et en dernier lieu viennent les brouillons (voir le Tableau 3.6).

Numéro	Rendus	Perspectives isométriques	Brouillons	Plans	Coupe transversale
22	5	4	0	9	2
23	5	4	0	9	2
24	6	3	1	7	2
25	7	4	0	7	2
26	4	4	2	9	2
27	3	4	1	4	1
28	4	3	1	7	2
29	5	3	0	8	2
30	2	7	1	7	1
31	6	1	3	6	1
32	7	2	0	5	2
33	4	3	2	5	1
34	3	5	1	4	3
35	3	3	1	7	4
36	6	3	1	5	1
37	3	6	3	4	1
38	5	4	1	4	1
39	4	2	0	6	1
40	4	5	3	4	0
41	2	5	1	5	1
42	4	6	0	4	2
Moyenne d'utilisation par session	4.38	3.86	1.05	6	1.62

Tableau 3.6 : Utilisation de l'information par les participants du groupe 2D

3.6.2 Comparaison des modalités de visualisation (2D, 3D et RM) pour la revue de conception

Après avoir achevé les trois tours de notre évaluation, nous avons compté combien de participants ont opté pour chaque modèle (RM ou 2D ou 3D) pour répondre correctement à chaque question du questionnaire 3.2, comme le montre ce tableau.

Technologie	Questions associées
2D uniquement	03, 11
3D uniquement	(aucune)
RM uniquement	18, 19
2D et 3D	15
2D et RM	21
3D et RM	08, 09, 10, 12, 13, 16, 17, 23
2D, 3D et RM	01, 02, 04, 05, 06, 07, 14, 20, 22, 24, 25

Tableau 3.7 : Répartition des questions selon la technologie ayant permis une réponse correcte.

L'analyse des résultats montre que les supports en 2D se sont révélés particulièrement performants pour les questions d'ordre technique et structurel, notamment celles relatives aux dimensions et aux éléments constructifs (Q03, Q11). La 3D non immersive, en revanche, n'a pas permis de répondre correctement à une question spécifique, ce qui indique qu'elle ne présente pas de tendance marquée dans l'évaluation des informations architecturales. La RM s'est distinguée pour les questions liées à l'expérience spatiale et à l'ergonomie (Q18, Q19), confirmant la pertinence de l'immersion à l'échelle réelle pour appréhender les conditions d'usage. La 2D et la 3D non immersive ont permis d'identifier correctement les luminaires (Q15), grâce à la précision des plans et à la qualité des rendus. En revanche, la RM avec HoloLens s'est révélée moins adaptée à cette tâche, en raison de la résolution limitée qui ne permettait pas de distinguer clairement ces éléments. Pour l'évaluation de la hauteur sous plafond dans la cuisine (Q21), les modèles 2D et la RM (RM) ont joué un rôle déterminant. La 2D offrait la précision des mesures, tandis que la RM permettait une immersion favorisant une perception réaliste de l'espace, mais

la 3D non immersive s'est montrée insuffisante, car elle ne rendait pas compte de la perception réelle de la hauteur. Seuls les participants en 3D et en RM ont montré une meilleure compréhension des éléments architecturaux et matériels (Q08, Q09, Q10, Q12, Q13, Q16, Q17, Q23). Enfin, les questions plus générales et globales portant sur la rénovation et l'usage des espaces (Q01, Q02, Q04, Q05, Q06, Q07, Q14, Q20, Q22, Q24, Q25) ont été correctement comprises par les trois groupes, confirmant que chaque modalité, prise séparément, est suffisante pour transmettre les aspects globaux du projet.

On conclut que chaque modalité de représentation apporte des avantages spécifiques et présente des limites propres. La 2D s'avère la plus adaptée pour les aspects techniques et structurels, où la précision des mesures est déterminante. La 3D non immersive, bien qu'offrant une certaine visualisation tridimensionnelle, ne permet pas une compréhension approfondie de certaines dimensions architecturales, ce qui limite sa pertinence dans l'évaluation détaillée des espaces. La RM, quant à elle, facilite l'appréhension des conditions spatiales et ergonomiques grâce à l'immersion, mais reste contrainte par des aspects techniques tels que la résolution visuelle, qui limite la reconnaissance d'éléments précis.

CHAPITRE IV

ANALYSE DES RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION DU PROJET DE RÉNOVATION DE BUREAU

Dans ce chapitre, nous procéderons à une analyse approfondie des résultats obtenus lors de notre expérience tout en fournissant une interprétation de l'utilisation de la revue de conception holographique par rapport aux méthodes traditionnelles 2D, ainsi qu'à une condition intermédiaire de visualisation 3D non immersive sur écran classique. Cette approche permet de distinguer plus précisément si les bénéfices observés proviennent de l'immersion propre à la RM ou simplement du passage de la 2D à la 3D. Nous intégrons également une condition intermédiaire de visualisation 3D non immersive sur écran classique, afin de distinguer plus précisément l'effet de la simple visualisation en 3D de celui de l'immersion en RM. Une analyse de régression est réalisée pour déceler les relations entre les différentes variables. Nous constatons que les résultats démontrent une amélioration notable de la qualité de la conception et une satisfaction globale accrue des utilisateurs grâce à l'utilisation de la revue de conception holographique, tout en mettant en évidence les différences spécifiques entre la 2D, la 3D non immersive et la RM immersive.

4.1 Modèle de régression linéaire à plusieurs facteurs

Notre modèle vise à établir le niveau de compréhension de la conception architecturale d'un participant, une variable dépendante en fonction de diverses variables indépendantes telles que son groupe d'appartenance (MR ou 2D ou 3D), son âge, son genre, son niveau d'éducation, sa connaissance de la conception en 2D, ainsi que son expérience professionnelle.

Pour ce faire, nous recueillons les résultats de notre expérience, soit les 63 évaluations des participants, que nous stockons dans un fichier Excel nommé "Holo.xlsx". Ce fichier contient un ensemble de données comprenant les éléments suivants :

- Note obtenue dans le questionnaire représenter la compréhension de la conception architecturale.
- Genre (féminin ou masculin) : La valeur 1 correspond au genre féminin, tandis que la valeur 2 est assignée au genre masculin.
- Âge du participant.
- Niveau d'éducation : Baccalauréat, premier cycle, deuxième cycle, troisième cycle. Chacun est représenté par les valeurs 1, 2, 3, et 4 respectivement.
- Expérience professionnelle en années.
- Connaissance de la conception en 2D (oui est associé à la valeur 2, non à la valeur 1).
- Groupe d'appartenance (MR ou 2D ou 3D) : La valeur 1 correspond au groupe 2D, la valeur 2 au groupe MR et la valeur 3 au groupe 3D.

Nous appliquons une approche de régression linéaire multiple pour étudier la relation entre les variables indépendantes. Cette analyse est réalisée en utilisant le langage R. Les instructions, les codes utilisés, ainsi que les sorties des consoles sont fournis dans l'Appendice A.

4.1.1 Évaluation des multicollinéarités et ajustement du modèle

Nous allons d'abord nous assurer que nos données satisfont à l'hypothèse d'indépendance des observations. Tous les détails sont présentés dans l'Appendice A.2.

Nous observons une forte corrélation de 97% entre "Expérience" et " Âge", avec un comportement linéaire évident comme illustré dans le graphique ci-dessous.

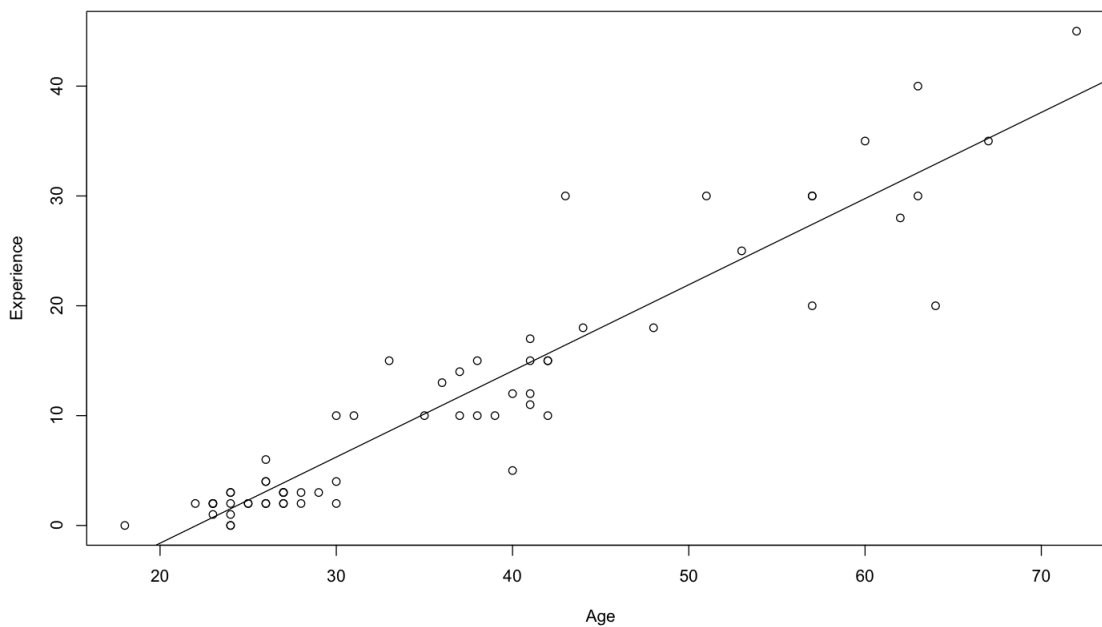


Figure 4.1 : Colinéarité entre les deux variables "Expérience" et " Âge"

Cette observation indique que l'expérience professionnelle en années d'un participant est étroitement liée à son âge. En outre, l'indice de conditionnement kappa (κ) élevé de 42,03 confirme la forte interdépendance entre les variables, confirmant ainsi notre observation précédente sur la relation entre "Expérience" et " Âge".

Après avoir évalué les facteurs d'inflation de la variance (VIF), il apparaît que l'âge ne contribue pas de manière significative à la compréhension de la conception architecturale, justifiant ainsi sa suppression du modèle.

4.1.2 Validation des hypothèses

Dans l'Appendice A.3, nous évaluons les hypothèses de normalité et d'homoscédasticité des résidus. L'homoscédasticité n'est pas rejetée ($p = 0,302 > 0,05$), indiquant qu'il n'y a pas suffisamment de preuves pour rejeter l'hypothèse nulle. Le graphique associé ci-dessous montre que l'homoscédasticité des résidus est jugée raisonnable puisque la ligne de référence semble être plate et horizontale. Ce qui signifie que les données présentent une homogénéité des variances des résidus à travers les niveaux de la variable indépendante.

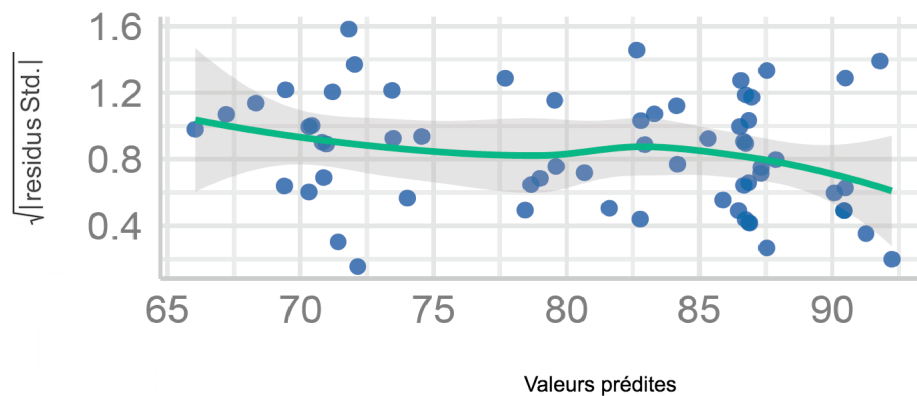


Figure 4.2 : Homogénéité de la variance

Concernant la normalité des résidus, elle n'est pas rejetée grâce au test de Shapiro-Wilk, voir l'Appendice A.3, comme indiqué par une p-valeur de 0,49, supérieur au seuil de signification de 0,05. De plus, si on observe la distribution des points

sur le graphique ci-dessous, on constate qu'il y a une légère déviation par rapport à la linéarité, les points semblent être assez raisonnablement répartis le long de la ligne. La normalité des résidus peut être alors considérée comme acceptable.

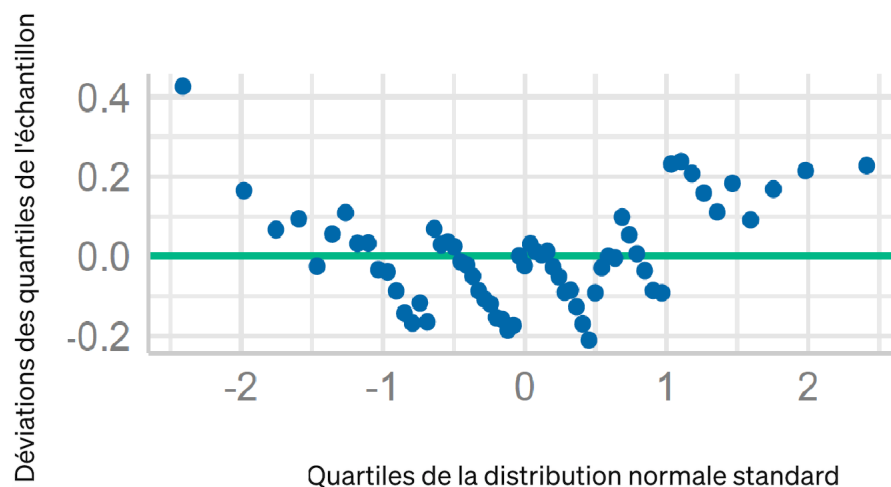


Figure 4.3 : Normalité des résidus

Nous déduisons que la normalité et l'homoscédasticité des résidus ne sont pas parfaites, mais elles semblent également raisonnables.

4.1.3 Choix du modèle réduit

Après avoir exclu la variable "Âge", les résultats du modèle ajusté, détaillés dans l'Appendice A.4 et résumés dans le tableau ci-dessous, montrent que les variables "Exp.2D" (expérience en conception 2D) et "Éducation" (niveau d'éducation) ne sont pas significatives, avec des valeurs p respectives de 0,97 et 0,26. En d'autres termes, le niveau d'éducation et la connaissance de la conception en 2D ne semblent pas exercer une influence significative sur la compréhension de la conception architecturale.

Variable explicative	Somme des carrés	Degrés de liberté	Valeur F	Valeur p
Groupe	2576.72	2	27.4586	5.93×10^{-9}
Genre	216.28	1	4.6096	0.0363
Experience	80.56	1	1.7170	0.1956
Éducation	193.56	3	1.3751	0.2602
Exp.2D	0.03	1	0.0007	0.9797
Résidus	2533.68	54		

Tableau 4.1 : Tableau ANOVA (tests de type II) du modèle ajusté

Finalement, il est essentiel de vérifier si notre modèle de régression comportait des valeurs aberrantes pour assurer des résultats fiables, surtout en cas d'observations inhabituelles. Cette vérification a été réalisée dans l'Appendice A.4 avec la fonction "check_outliers()", confirmant que les données atypiques des participants n'ont pas affecté les résultats. De plus, le graphique suivant montre que les points demeurent à l'intérieur des contours des lignes, ce qui renforce cette conclusion.

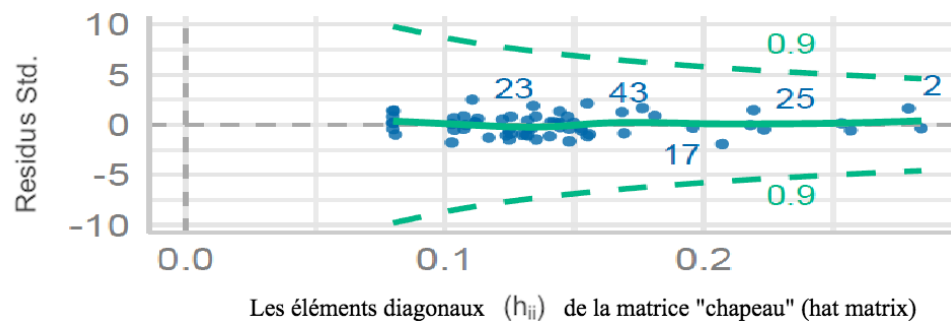


Figure 4.4 : Observations aberrantes

Cela conduit à une sélection optimale, expliquée dans l'Appendice A.5, qui converge

vers le choix optimal du modèle (Groupe, Genre, Expérience) pour le modèle linéaire multiple.

Variable	Estimation	Erreur Std.	Valeur t	Valeur p
Intercept	70.94617	2.15896	32.861	$< 2 \times 10^{-16}$
Groupe RM	16.91663	2.32848	7.265	1.05×10^{-9}
Groupe 3D	12.97726	2.13374	6.082	9.98×10^{-9}
Femmes	-4.03961	1.86528	-2.166	0.0345
Expérience	0.12533	0.08263	1.517	0.1348

Erreur standard résiduelle : 6.86 sur 58 degrés de liberté
R carré multiple : 0.5597, R carré ajusté : 0.5294
Statistique F : 18.44 sur 4 et 58 DL, valeur p : 8.012×10^{-10}

Tableau 4.2 : Tableau d'analyse du modèle réduit

En vertu de ce tableau, l'équation de ce modèle réduit est donnée alors par :

$$\text{Note} = 70.95 + 16.29 \text{ Groupe MR} + 12.98 \text{ Groupe 3D} - 4.04 \text{ Femme} + 0.12 \text{ Expérience} + c$$

Le coefficient de détermination ajusté R^2 est 0.56. Notre modèle réduit est alors un modèle de régression linéaire multiple qui semble être modérément adapté. En utilisant un seuil de significativité de 5 %, les variables Groupe RM, Groupe 3D et Femme montrent une forte signification, avec des pentes de 16,92, 12,98 et -4,04 respectivement. Par contre, la variable Expérience n'est pas significative, avec une pente positive de 0,12.

4.1.4 Synthèse des résultats

Notre étude montre que non seulement HoloLens 2 améliore la compréhension de la conception de 17 % par rapport aux méthodes 2D classiques, mais aussi que les vidéos 3D apportent une amélioration de 13 %. Les femmes semblent avoir une compréhension inférieure de 4 % par rapport aux hommes lorsqu'elles examinent une conception architecturale pour la première fois, quelle que soit leur âge, leur niveau éducatif, ou leur connaissance de la conception en 2D. Enfin, chaque année d'expérience professionnelle pourrait améliorer la compréhension de 0,12%, bien que cet effet ne soit pas statistiquement significatif.

4.2 Discussion

La RM permet aux utilisateurs d'explorer un espace de manière immersive, offrant une perception spatiale proche de la réalité et facilitant ainsi l'évaluation des conditions d'usage. Les casques tels que le HoloLens 2 présentent l'avantage d'une prise en main relativement intuitive, sans nécessiter de formation préalable spécifique, ce qui en fait un outil accessible pour l'examen des conceptions. Toutefois, l'intégration d'une troisième condition dans notre expérimentation, à savoir la visualisation 3D non immersive sur écran, a montré que l'amélioration de la compréhension provient principalement du passage de la 2D à la 3D, indépendamment du caractère immersif. Les résultats statistiques (ANOVA et test de Tukey) indiquent en effet que les performances obtenues en 3D non immersive sont proches de celles observées avec la RM. Certaines tâches spécifiques illustrent cette tendance : par exemple, l'identification des luminaires (Q15) a été correctement réalisée avec la 2D et la 3D non immersive grâce à la précision des plans et à la qualité des rendus, alors que la RM s'est révélée moins adaptée à cette tâche en raison de la résolution limitée du dispositif, ne permettant pas de distinguer

clairement ces éléments. En revanche, la RM s'est montrée particulièrement efficace pour l'appréhension spatiale et ergonomique, notamment dans la perception de la hauteur et des volumes.

D'autre part, l'analyse statistique fait apparaître un effet limité, mais significatif attribuable au sexe : les femmes obtiennent en moyenne des résultats légèrement inférieurs que les hommes. Cet écart, bien que significatif, doit toutefois être interprété avec prudence, car il pourrait refléter des facteurs contextuels ou des variables non contrôlées plutôt qu'une réelle différence de compétence. Par ailleurs, l'expérience professionnelle ne semble pas avoir d'impact notable sur la compréhension. Dans l'ensemble, ces résultats suggèrent que la perception initiale des espaces architecturaux dépend davantage de la modalité de visualisation que du profil ou de l'expérience préalable des participants.

Enfin, la manière dont les participants interagissent avec la conception est importante pour la compréhension. Une simulation réaliste de cette interaction favorise la compréhension, tout comme l'évaluation du confort des utilisateurs avec l'affichage et l'utilisation judicieuse des textures pour fournir des informations précises sur les propriétés matérielles. En fait, les cinq dernières questions de notre évaluation, basées sur l'interaction des utilisateurs avec l'appareil HoloLens 2, ont mesuré le confort des participants et l'efficacité du dispositif dans la compréhension de la conception architecturale. Les résultats reflètent une satisfaction attendue, indiquant une utilisation sans difficultés majeures de l'appareil.

4.2.1 Impact de la RM et de la visualisation 3D sur la perception de l'environnement

L'impact de la RM et de la visualisation 3D sur la perception de l'environnement se manifeste de manière complémentaire, mais distincte. La RM combine

des éléments virtuels avec le monde réel, permettant à l'utilisateur de visualiser un modèle architectural directement intégré dans son environnement physique, souvent grâce à des casques comme Hololens 2. Cette approche immersive favorise une perception plus intuitive de l'espace et facilite également la cognition spatiale, c'est-à-dire la capacité à réfléchir et à manipuler mentalement les structures et les relations entre les éléments. En revanche, la visualisation 3D non immersive se fait sur un écran classique, comme un ordinateur ou une tablette, et ne donne pas la sensation d'être "à l'intérieur" du modèle. Bien qu'elle permette d'examiner les formes, les plans et les volumes, elle sollicite différemment la perception et la cognition spatiale, en s'appuyant davantage sur la compréhension abstraite et la visualisation mentale des espaces. Dans le cadre de la révision architecturale, ces deux méthodes offrent donc des avantages complémentaires : la RM apporte une expérience immersive et interactive qui renforce l'appréhension directe des volumes, tandis que la 3D non immersive facilite une analyse plus conventionnelle et structurée des projets. Ensemble, elles enrichissent la manière dont les architectes et étudiants en architecture perçoivent, évaluent et révisent les espaces conçus.

4.2.2 Limitations de l'étude et suggestions pour de futures recherches

Cette dernière partie examine les principales limites observées au cours de notre étude, à la fois d'un point de vue technologique et méthodologique, tout en ouvrant des pistes pour de futures recherches. Bien que les résultats fournissent des informations précieuses sur l'usage de la 2D, de la 3D non immersive et de la RM mixte dans l'analyse architecturale, certaines limitations persistent et suggèrent des pistes d'amélioration potentielles.

1. Limitations de la RM par rapport à la 3D non immersive et à la 2D :

- *Autonomie des dispositifs* : Les casques RM portables comme le Hololens 2 ont une autonomie limitée, ce qui peut interrompre l'expérience

lors d'une session prolongée ou nécessiter des pauses fréquentes pour recharger l'appareil.

- *Qualité des textures et rendu en temps réel* : Les contraintes de calcul en temps réel peuvent réduire la résolution des textures et la fidélité des modèles 3D, ce qui peut affecter la perception précise des matériaux, des surfaces et des volumes.
- *Champ de vision et sensibilité à la luminosité* : Le champ de vision limité du casque et l'influence de la lumière ambiante peuvent rendre certains hologrammes difficiles à distinguer, en particulier dans des environnements très lumineux ou très sombres.
- *Charge cognitive et inconfort* : L'intégration simultanée du réel et du virtuel exige de traiter deux sources d'information, ce qui peut provoquer une fatigue visuelle, un certain inconfort ou des sensations de vertige chez certains utilisateurs.
- *Complexité de manipulation* : L'interaction avec les hologrammes peut nécessiter des gestes précis ou des commandes spécifiques, ce qui demande un apprentissage initial et peut ralentir l'analyse des modèles.

2. Limitations de la 3D non immersive par rapport à la RM et à la 2D :

- *Perception spatiale moins intuitive* : Sans immersion complète, les utilisateurs peuvent avoir à interpréter les volumes et distances à travers un écran. L'impact exact sur la compréhension des proportions et des relations entre les éléments n'a pas été directement mesuré et constitue une piste pour de futures recherches.
- *Multiplicité des points de vue* : Pour appréhender complètement l'espace, l'utilisateur doit souvent faire pivoter ou zoomer le modèle 3D, ce qui demande une manipulation mentale supplémentaire.

- *Interaction moins naturelle* : L’usage de la souris, du clavier ou d’autres périphériques pour naviguer dans le modèle peut être moins instinctif que l’interaction gestuelle ou naturelle offerte par la RM.

3. Limitations de la 2D par rapport à la RM et à la 3D non immersive :

- *Perception limitée de la profondeur* : La 2D ne permet pas de visualiser les volumes ou les distances de manière directe, ce qui peut compliquer l’évaluation de l’espace ou la détection d’erreurs de conception.
- *Charge cognitive pour la visualisation spatiale* : L’utilisateur doit reconstruire mentalement les relations spatiales à partir de plans et vues plates. L’effet exact sur l’effort cognitif reste à quantifier dans des études ultérieures.
- *Interaction moins intuitive* : La navigation dans les plans ou les vues 2D se fait généralement par défilement ou zoom, ce qui limite la perception immersive et l’exploration spontanée de l’espace.

En outre, certains aspects méthodologiques mériteraient d’être explorés plus en détail dans de futures recherches, notamment pour mieux quantifier l’efficacité et la charge cognitive associées aux différentes modalités d’affichage. En particulier, aucun indicateur objectif tel que le temps de complétion des tâches ou la charge mentale perçue n’a été mesuré. L’intégration de ces mesures dans de prochains travaux permettrait d’évaluer plus précisément l’efficacité, l’effort cognitif et la facilité d’usage des technologies 2D, 3D non immersive et RM.

Au regard de ces limites, il devient essentiel d’envisager de nouvelles orientations de recherche, en particulier pour approfondir le potentiel évolutif de la RM dans le contexte architectural :

- Dans quelle mesure l’évolution des dispositifs de RM (par exemple, une version améliorée du HoloLens) pourrait-elle offrir un rendu plus réaliste,

avec une qualité et des performances comparables à celles d'un ordinateur ?

- Est-il possible d'utiliser la RM pour placer un modèle à l'échelle 1 : 1 directement sur site, afin d'évaluer l'intégration contextuelle d'un projet architectural ?
- Comment cette technologie pourrait-elle être exploitée pour réaliser une analyse préliminaire du site dès les phases amont de conception ?
- Dans quelle mesure la RM pourrait-elle contribuer à la médiation architecturale ou à la valorisation commerciale d'un projet auprès de clients ou de décideurs ?
- Enfin, comment les futures études pourraient-elles combiner mesures objectives (temps de tâche, charge cognitive, erreurs de perception) et analyses qualitatives pour mieux comprendre l'impact cognitif et ergonomique de ces environnements hybrides ?

Par ailleurs, bien que la 3D non immersive se situe entre la 2D et la RM, son potentiel immersif reste encore limité. Ainsi, de futures recherches pourraient explorer des améliorations techniques et perceptives pour rapprocher l'expérience 3D sur écran d'un sentiment d'immersion plus profond. Plusieurs interrogations demeurent ouvertes :

- Comment les environnements 3D non immersifs pourraient-ils intégrer un rendu plus réaliste (textures haute fidélité, ombres dynamiques, éclairage physique) afin de renforcer la sensation de profondeur et de présence ?
- Dans quelle mesure l'ajout de retours sensoriels supplémentaires, tels que l'audio spatial ou le retour haptique, pourrait-il accroître l'immersion et la compréhension spatiale sans recourir à un casque RM ?
- L'utilisation d'écrans panoramiques, ultra-larges ou de configurations multi-écrans permet-elle de recréer une immersion visuelle comparable à celle de

la RM?

- Est-il possible de simuler une immersion partielle en 3D non immersive grâce à des dispositifs de suivi des mouvements de tête ou du regard (eye tracking), sans équipement immersif?
- Quels types de modes de navigation (gestes, commandes vocales, interfaces naturelles) pourraient réduire la barrière technique de la souris/clavier et offrir une interaction plus intuitive, proche de celle de la RM?

En conclusion, cette étude souligne la complémentarité et les spécificités propres à chaque modalité d'affichage. La RM permet une immersion et une interaction enrichies, mais reste limitée par certaines contraintes technologiques et par l'effort cognitif requis pour traiter simultanément les informations réelles et virtuelles. La 3D non immersive constitue un compromis efficace, qui pourrait être amélioré grâce à des interfaces plus intuitives et à un rendu graphique renforcé, tandis que la 2D demeure pertinente pour des analyses rapides et synthétiques. Toutefois, si la RM semble favoriser une meilleure compréhension de l'organisation spatiale, elle ne garantit pas une perception exacte des distances ou des proportions, ce qui relève d'un champ de recherche distinct. Ces constats invitent donc à orienter de futures recherches vers l'optimisation de l'expérience utilisateur, la réduction de la charge mentale, ainsi que l'étude des biais perceptifs propres aux environnements immersifs. Il serait également pertinent d'explorer des solutions techniques innovantes visant à rapprocher l'expérience proposée par la 3D non immersive d'un niveau d'engagement plus proche de celui de la RM.

APPENDICE A

CODES R POUR LA RÉGRESSION LINÉAIRE MULTIPLE

Cette annexe contient les codes R ainsi que les sorties des consoles, utilisés pour la régression linéaire multiple dans le chapitre 4.

A.1 Chargement des données

Dans toute la suite, nous aurons besoin d'installer ces packages. Nous exécutons alors ces codes (nous n'avons besoin de le faire qu'une seule fois) :

```
install.packages("readxl", repos="http://cran.us.r-project.org")
install.packages("car", repos="http://cran.us.r-project.org")
install.packages("GGally", repos="http://cran.us.r-project.org")
install.packages("performance", repos="http://cran.us.r-project.org")
```

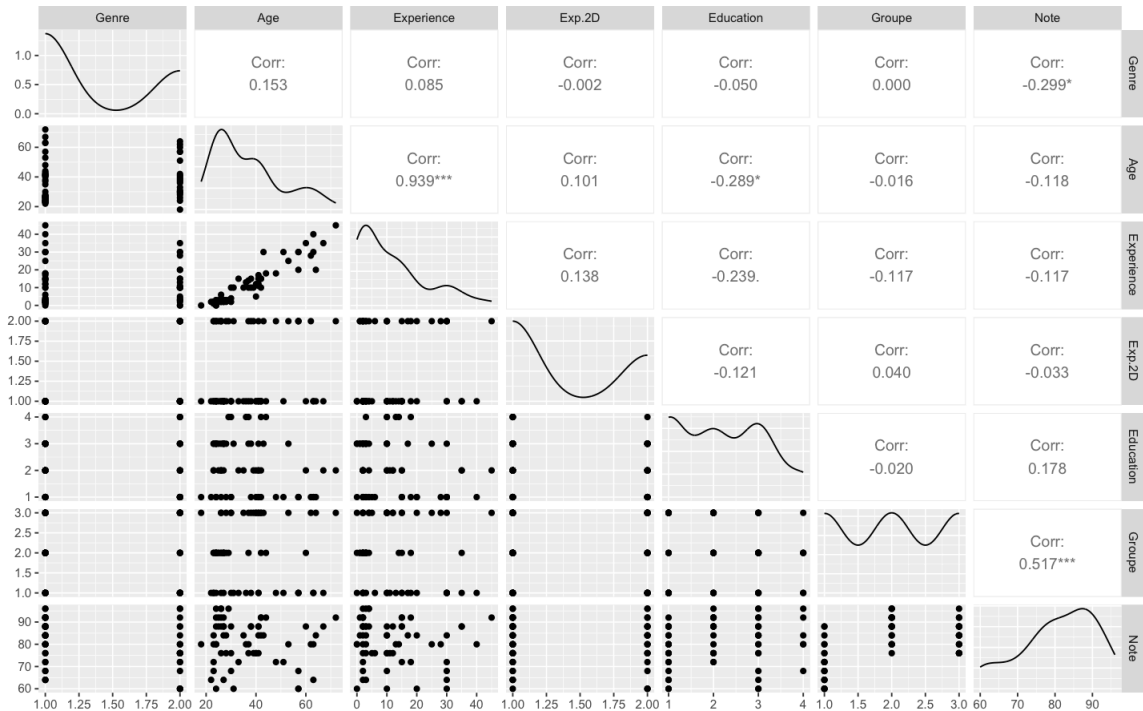
Nous chargeons le fichier « Holo.xlsx » dans R.

```
library(readxl)
Holo <- read_excel("HoloLens.xlsx")
```

A.2 Évaluation des multicolinéarités

Pour explorer les corrélations linéaires entre les variables explicatives deux à deux, nous utilisons généralement la fonction `ggpairs` du package `GGally` en raison de sa syntaxe simplifiée :

```
library(GGally)
ggpairs(Holo)
```



En exécutant ce code, la sortie générée est une matrice symétrique. Les éléments de la diagonale présentent une corrélation de 1, car ils représentent la corrélation des variables avec elles-mêmes. Les autres éléments de la matrice indiquent les corrélations deux à deux entre les variables : Note, Âge, Groupe, Expérience, Éducation et Exp.2D. Deux variables sont considérées comme presque dépendantes si leur

corrélation est proche de 1. Ensuite, nous vérifions la multicollinéarité à l'aide de l'indice de conditionnement κ . Cet indice nous permet de mesurer le degré de colinéarité :

```
x<-data.frame(Holo$Groupe, Holo$Genre, Holo$Experience, Holo$Education,
Holo$Exp.2D, Holo$Âge)
xx<-cor(x[1:6])
kappa(xx, exact=TRUE)
[1] 42.03191
```

Par la suite, nous pouvons évaluer la colinéarité de ce modèle en examinant les facteurs d'inflation de la variance (VIF). La fonction « `check_collinearity()` » du package `performance` fournit une description détaillée de la multicollinéarité.

```
reg<-lm(Note~Âge+factor(Groupe)+factor(Genre)+Experience
+factor(Education)+factor(Exp.2D), data = Holo)
library(performance)
check_collinearity(reg)
```

Low Correlation

Term	VIF	VIF 95% CI	Increased SE
factor(Groupe)	1.52	[1.24, 2.14]	1.23
factor(Genre)	1.12	[1.02, 1.92]	1.06
factor(Education)	1.35	[1.13, 1.92]	1.16
factor(Exp.2D)	1.06	[1.00, 3.22]	1.03
Tolerance	0.66	[0.47, 0.81]	

0.89	[0.52, 0.98]
0.74	[0.52, 0.88]
0.94	[0.31, 1.00]

High Correlation

Term	VIF	VIF 95% CI	Increased SE
Âge	10.31	[7.12, 15.17]	3.21
Experience	10.05	[6.94, 14.77]	3.17
Tolerance	Tolerance	95% CI	
0.10		[0.07, 0.14]	
0.10		[0.07, 0.14]]	

Lorsqu'une variable a un VIF supérieur à 10, il est nécessaire de la retirer du modèle. Puis, il faut recalculer les VIFs et retirer une deuxième variable si nécessaire, et ainsi de suite, jusqu'à obtenir des VIFs inférieurs à 5. Nous excluons ici la variable Âge du modèle, nous pouvons employer la fonction « update() », comme ceci :

```
reg1 <- update(reg, .~-Âge)
check_collinearity(reg1)

# Check for Multicollinearity
```

Low Correlation

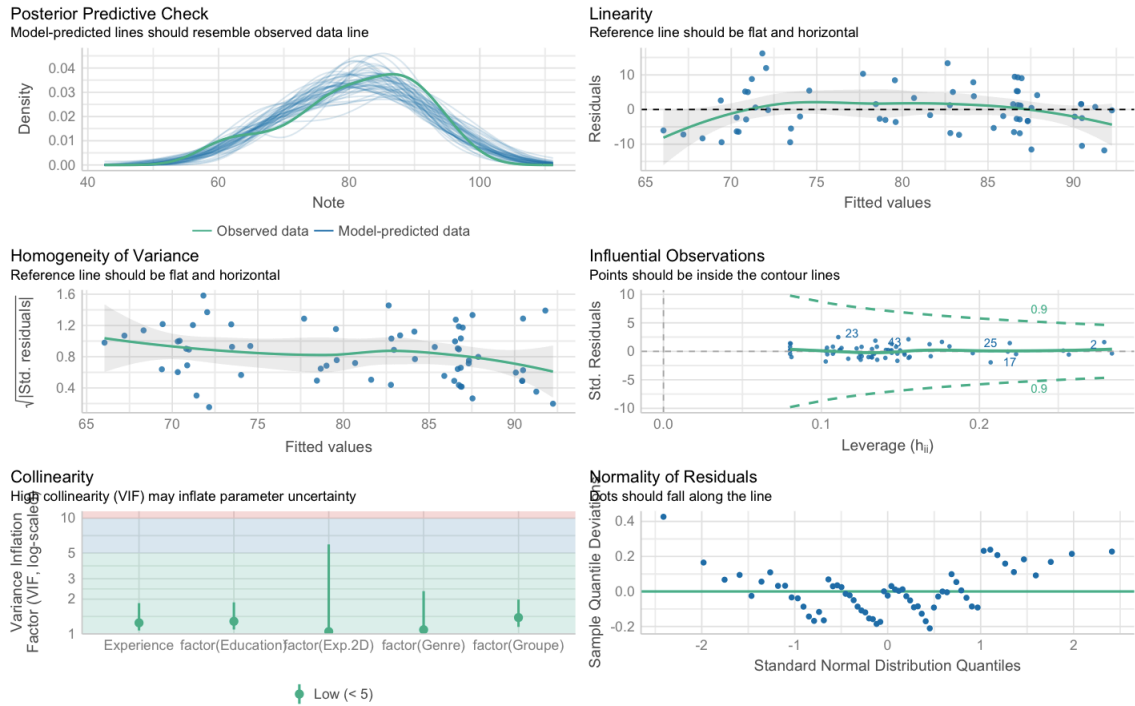
Term	VIF	VIF 95% CI	Increased SE
------	-----	------------	--------------

factor(Groupe)	1.39	[1.15, 1.98]	1.18
factor(Genre)	1.09	[1.01, 2.34]	1.04
Experience	1.25	[1.07, 1.84]	1.12
factor(Education)	1.29	[1.09, 1.87]	1.13
factor(Exp.2D)	1.05	[1.00, 5.93]	1.02
Tolerance Tolerance 95% CI			
	0.72	[0.51, 0.87]	
	0.92	[0.43, 0.99]	
	0.80	[0.54, 0.93]	
	0.78	[0.53, 0.91]	
	0.95	[0.17, 1.00]	

A.3 Hypothèses de normalité et d'homoscédasticité des résidus.

Encore une fois, le package `performance` propose des fonctionnalités très utiles, notamment avec « `check_model()` ». Cette fonction permet de diagnostiquer une régression en produisant six graphiques. Elle permet d'évaluer diverses hypothèses telles que la linéarité, l'homoscédasticité, et la normalité des résidus, ainsi que la présence de multicollinéarité et de valeurs aberrantes.

```
check_model(reg1)
```



Nous pouvons effectuer un test de Shapiro-Wilk pour évaluer la normalité des résidus en utilisant la fonction « `check_normality()` » :

```
check_normality(reg1)
```

OK: residuals appear as normally distributed ($p = 0.490$).

La normalité n'est pas rejetée ($p = 0.49 > 0.05$).

Nous pouvons aussi procéder à un test de Breusch-Pagan pour évaluer l'hypothèse d'homoscédasticité des résidus en utilisant la fonction « `check_heteroscedasticity()` » :

» :

```
check_heteroscedasticity(reg1)
```

OK: Error variance appears to be homoscedastic ($p = 0.302$).

L'homoscédasticité n'est pas rejetée ($p = 0,302 > 0,05$).

A.4 Résultats du modèle complet

Le tableau de régression peut être obtenu en utilisant la fonction `summary()` :

```
summary(reg1)
```

Call:

```
lm(formula = Note ~ factor(Groupe) + factor(Genre) + Experience +
    factor(Education) + factor(Exp.2D), data = Holo)
```

Residuals:

	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-11.7930	-4.4705	-0.1544	4.5774	16.1801

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value
(Intercept)	70.100826	2.575143	27.222
factor(Groupe)2	16.421791	2.387425	6.878
factor(Groupe)3	12.402312	2.172050	5.710
factor(Genre)2	-4.052671	1.887608	-2.147
Experience	0.111480	0.085077	1.310
factor(Education)2	3.697689	2.294164	1.612
factor(Education)3	-0.004068	2.346427	-0.002
factor(Education)4	3.709635	3.286146	1.129

```

factor(Exp.2D)2      0.046901  1.835029  0.026
                    Pr(>|t|)
(Intercept)         < 2e-16 ***
factor(Groupe)2     6.49e-09 ***
factor(Groupe)3     4.95e-07 ***
factor(Genre)2      0.0363 *
Experience           0.1956
factor(Education)2  0.1128
factor(Education)3  0.9986
factor(Education)4  0.2639
factor(Exp.2D)2     0.9797
---

```

Signif. codes:

0 *** 0.001 ** 0.01 * 0.05 . 0.1 1

Residual standard error: 6.85 on 54 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.5913, Adjusted R-squared: 0.5307

F-statistic: 9.764 on 8 and 54 DF, p-value: 2.919e-08

Lorsque les variables sont catégorielles avec k modalités, la table de régression fournit $k - 1$ p-values correspondant à chaque modalité. Afin d'obtenir la p-value reflétant l'effet global de la variable, il est nécessaire d'effectuer une analyse de la variance en utilisant une table dédiée, comme suit :

```
car::Anova(reg1)
```

Anova Table (Type II tests)

Response: Note

	Sum Sq	Df	F value	Pr(>F)	
factor(Groupe)	2576.72	2	27.4586	5.93e-09	***
factor(Genre)	216.28	1	4.6096	0.0363	*
Experience	80.56	1	1.7170	0.1956	
factor(Education)	193.56	3	1.3751	0.2602	
factor(Exp.2D)	0.03	1	0.0007	0.9797	
Residuals	2533.68	54			

Signif. codes:

0 *** 0.001 ** 0.01 * 0.05 . 0.1 1

A.5 Sélection de variables (choix de modèle réduit)

Nous utilisons des algorithmes de sélection « Pas à Pas » (Sélection, Élimination, Mixte) afin de choisir judicieusement un modèle réduit d'une régression linéaire multiple. Ces approches nous aident à identifier le modèle optimal parmi différentes alternatives dans une régression linéaire multiple.

Nous commençons d'abord par l'algorithme de « Sélection » :

```

null<-lm(Note~1,data=Holo)
full<-reg1
forward<-step(null,scope=list(lower=null,upper=full),
direction="forward")

```

Start: AIC=291.11

Note ~ 1

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
+ factor(Groupe)	2	3140.57	3058.3	250.60
+ factor(Genre)	1	552.65	5646.2	287.22
+ factor(Education)	3	578.48	5620.4	290.93
<none>			6198.9	291.11
+ Experience	1	85.44	6113.4	292.23
+ factor(Exp.2D)	1	6.72	6192.1	293.04

Step: AIC=250.6

Note ~ factor(Groupe)

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
+ factor(Genre)	1	220.977	2837.3	247.87
+ Experience	1	108.526	2949.8	250.32
<none>			3058.3	250.60
+ factor(Education)	3	222.563	2835.7	251.84
+ factor(Exp.2D)	1	0.063	3058.2	252.59

Step: AIC=247.87

Note ~ factor(Groupe) + factor(Genre)

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
+ Experience	1	108.236	2729.1	247.42
<none>			2837.3	247.87
+ factor(Education)	3	221.549	2615.8	248.75

```
+ factor(Exp.2D)      1      0.042 2837.3 249.87
```

```
Step:  AIC=247.42
```

```
Note ~ factor(Groupe) + factor(Genre) + Experience
```

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
<none>			2729.1	247.42
+ factor(Education)	3	195.361	2533.7	248.74
+ factor(Exp.2D)	1	1.828	2727.2	249.38

Nous utilisons maintenant l'algorithme d'« Élimination » :

```
backward<-step(full,data=Holo,direction="backward")
```

```
Start:  AIC=250.74
```

```
Note ~ factor(Groupe) + factor(Genre) + Experience + factor(Education) +
      factor(Exp.2D)
```

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
- factor(Exp.2D)	1	0.03	2533.7	248.74
- factor(Education)	3	193.56	2727.2	249.38
- Experience	1	80.56	2614.2	250.71
<none>			2533.7	250.74
- factor(Genre)	1	216.28	2750.0	253.90
- factor(Groupe)	2	2576.72	5110.4	290.94

```
Step:  AIC=248.74
```

```
Note ~ factor(Groupe) + factor(Genre) + Experience + factor(Education)
```

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
- factor(Education)	3	195.36	2729.1	247.42
<none>			2533.7	248.74
- Experience	1	82.05	2615.8	248.75
- factor(Genre)	1	216.44	2750.2	251.91
- factor(Groupe)	2	2576.96	5110.7	288.94

Step: AIC=247.42

Note ~ factor(Groupe) + factor(Genre) + Experience

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
<none>			2729.1	247.42
- Experience	1	108.24	2837.3	247.87
- factor(Genre)	1	220.69	2949.8	250.32
- factor(Groupe)	2	2864.42	5593.5	288.63

Nous terminons par l'algorithme « Mixte » qui est une combinaison entre les deux derniers algorithmes :

```
stepwise<-step(null,scope = list(upper=full),data=Holo,
direction="both")
```

Start: AIC=291.11

Note ~ 1

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
+ factor(Groupe)	2	3140.57	3058.3	250.60

```

+ factor(Genre)      1    552.65 5646.2 287.22
+ factor(Education) 3    578.48 5620.4 290.93
<none>                6198.9 291.11
+ Experience         1     85.44 6113.4 292.23
+ factor(Exp.2D)    1      6.72 6192.1 293.04

```

Step: AIC=250.6

Note ~ factor(Groupe)

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
+ factor(Genre)	1	220.98	2837.3	247.87
+ Experience	1	108.53	2949.8	250.32
<none>			3058.3	250.60
+ factor(Education)	3	222.56	2835.7	251.84
+ factor(Exp.2D)	1	0.06	3058.2	252.59
- factor(Groupe)	2	3140.57	6198.9	291.11

Step: AIC=247.87

Note ~ factor(Groupe) + factor(Genre)

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
+ Experience	1	108.24	2729.1	247.42
<none>			2837.3	247.87
+ factor(Education)	3	221.55	2615.8	248.75
+ factor(Exp.2D)	1	0.04	2837.3	249.87
- factor(Genre)	1	220.98	3058.3	250.60
- factor(Groupe)	2	2808.90	5646.2	287.22

Step: AIC=247.42

Note ~ factor(Groupe) + factor(Genre) + Experience

	Df	Sum of Sq	RSS	AIC
<none>			2729.1	247.42
- Experience	1	108.24	2837.3	247.87
+ factor(Education)	3	195.36	2533.7	248.74
+ factor(Exp.2D)	1	1.83	2727.2	249.38
- factor(Genre)	1	220.69	2949.8	250.32
- factor(Groupe)	2	2864.42	5593.5	288.63

A.6 Résultats du modèle réduit

Tout d'abord, nous évaluons les hypothèses d'homoscédasticité et de normalité des résidus pour ce modèle réduit. Les résultats indiquent qu'elles sont satisfaisantes.

```
check_heteroscedasticity(stepwise)
```

```
check_normality(stepwise)
```

OK: Error variance appears to be homoscedastic (p = 0.066).

OK: residuals appear as normally distributed (p = 0.083).

Il est important de vérifier qu'il n'y a pas de valeurs aberrantes dans ce modèle de régression afin d'évaluer si les résultats n'ont pas été impactés par des points singuliers. Pour ce faire, nous pouvons utiliser la fonction « `check_outliers()` » du package `performance`. Plusieurs approches sont disponibles ; pour plus d'informations, veuillez consulter l'aide de cette fonction.

```
check_outliers(stepwise)
```

OK: No outliers detected.

- Based on the following method and threshold: cook (0.849).

- For variable: (Whole model)

Les estimations des pentes partielles sont alors données par :

```
summary(stepwise)
```

Call:

```
lm(formula = Note ~ factor(Groupe) + factor(Genre) + Experience,
    data = Holo)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-10.7061	-5.1371	-0.1599	3.8865	15.6149

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	70.94617	2.15896	32.861	< 2e-16
factor(Groupe)2	16.91663	2.32848	7.265	1.05e-09
factor(Groupe)3	12.97726	2.13374	6.082	9.98e-08
factor(Genre)2	-4.03961	1.86528	-2.166	0.0345
Experience	0.12533	0.08263	1.517	0.1348

(Intercept) ***

factor(Groupe)2 ***

factor(Groupe)3 ***

factor(Genre)2 *

Experience

Signif. codes:

0 *** 0.001 ** 0.01 * 0.05 . 0.1 1

Residual standard error: 6.86 on 58 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.5597, Adjusted R-squared: 0.5294

F-statistic: 18.44 on 4 and 58 DF, p-value: 8.012e-10

Pour obtenir la p-value de l'effet global de la variable, nous utilisons une table d'analyse de la variance :

```
car::Anova(stepwise)
```

Anova Table (Type II tests)

Response: Note

	Sum Sq	Df	F value	Pr(>F)	
factor(Groupe)	2864.42	2	30.4382	9.155e-10	***
factor(Genre)	220.69	1	4.6902	0.03446	*
Experience	108.24	1	2.3003	0.13478	
Residuals	2729.07	58			

Signif. codes:

0 *** 0.001 ** 0.01 * 0.05 . 0.1 1

RÉFÉRENCES

- (n.d.). Lumion - 3D Rendering Software. Récupéré de <https://lumion.com/>
- Alford, D., Sackett, P. et Nelder, G. (2000). Mass customisation an automotive perspective. *International Journal of Production Economics*, 65, 99–110.
- Arain, F. et Phen, L. (2005). The potential effects of variation orders on institutional building projects. *Journal of Facilities*, 23(11/12), 496–510.
- Autodesk (February 2020). Architectural rendering by autodesk. *Autodesk Solutions*.
- Azuma, R. T. (1997). A survey of augmented reality. *Presence : teleoperators & virtual environments*, 6(4), 355–385.
- Balakrishnan, P. et Guo, H.-J. (2024). Hololens 2 technical evaluation as mixed reality guide. Dans *International Conference on Human-Computer Interaction*, 145–165. Springer.
- Barriball, K. L. et While, A. (1994). Collecting data using a semi-structured interview : a discussion paper. *Journal of Advanced Nursing-Institutional Subscription*, 19(2), 328–335.
- Bimber, O. et Raskar, R. (2005). *Spatial Augmented Reality : Merging Real and Virtual Worlds*. A K Peters/CRC Press.
- Blade, R. A. et Padgett, M. L. (2002). Virtual environments : History and profession. In *Handbook of Virtual Environments* 1207–1218. CRC Press.
- Bulman, J., Crabtree, B., Gower, A., Oldroyd, A., Lawson, M. et Sutton, J. (2004). Mixed reality applications in urban environments. *BT Technology Journal*, 22(3), 84–94.
- Carrasco, M. et Chen, Y. (2021a). Mixed reality in architectural design : A comparative study. *Journal of Architectural Engineering*.

- Carrasco, M. D. O. et Chen, P.-H. (2021b). Application of mixed reality for improving architectural design comprehension effectiveness. *Automation in Construction*, 126, 103–677.
- Chen, Y. et Duh, H. (2019). Augmented reality in architecture : A review of applications and challenges. *Journal of Architectural Engineering*.
- Cheng, J. C., Chen, K. et Chen, W. (2020). State-of-the-art review on mixed reality applications in the aeeco industry. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(2), 03119009.
- Conseil National de la XR (2023). Rapport étude de marché cnxr 2023 v.1 : L'économie de l'immersif en france. Consulté le 4 janvier 2025. Récupéré de <https://cnxr.fr/etude-de-marche/>
- Davidson, J. N. et Campbell, D. A. (1996). Collaborative design in virtual space - greenspace ii : A shared environment for architectural design review. *Design Computation : Collaboration, Reasoning, Pedagogy : ACADIA Conference Proceedings*, 165–179.
- Eastman, C. M. (2011). Bim handbook : A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors.
- Evans, G., Miller, J., Pena, M. I., MacAllister, A. et Winer, E. H. (2017). Evaluating the microsoft hololens through an augmented reality assembly application. *SPIE Defense + Security*, 1–16.
<http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1117/12.2262626>
- Finsen, E. (1999). *The Building Contract A Commentary on the JBCC Agreements* (1st éd.). Cape Town : Juta and Co, Ltd.
- Hammad, A., Garrett, J. H. et Karimi, H. A. (2002). Potential of mobile augmented reality for infrastructure field tasks. *7th Int. Conf. on Applications of Advanced Technologies in Transportation*, 425–432.
- Heilig, M. L. (1962). Sensorama simulator. US Patent 3,050,870.
- Hovestadt, V. et Hovestadt, L. (1999). The armilla project. *Autom. Constr.*, 8(3), 325–333.
- Kang, S. e. a. (2013). Mobile augmented reality for construction site monitoring. *Automation in Construction*.
- Kato, H. et Billinghurst, M. (1999). Marker tracking and hmd calibration for a video-based augmented reality conferencing system. Dans *Proceedings of the 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality*.

- Keane, P., Sertyesilisik, B. et Ross, A. D. (2010). Variations and change orders on construction projects. *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*, 2, 89–96.
- Krueger, M. W. (1983). Artificial reality.
- Liu, Y. et Leicht, R. (2020). Virtual reality in design review meetings : A longitudinal study. *Journal of Architectural Engineering*.
- Longhurst, R. (2016). *Key Methods in Geography*. London : Sage Publications Ltd.
- Loures Brandão, G. V., Henriques do Amaral, W. D., Rabite de Almeida, C. A. et Barroso Castañon, J. A. (2018). Virtual reality as a tool for teaching architecture. Dans *Design, User Experience, and Usability : Designing Interactions : 7th International Conference, DUXU 2018, Held as Part of HCI International 2018, Las Vegas, NV, USA, July 15-20, 2018, Proceedings, Part II 7*, 73–82. Springer.
- Majumdar, T. e. a. (2007). Virtual reality in architectural design : A review of applications. *Journal of Architectural Engineering*.
- Memon, A. H., Rahman, I. A. et Hasan, M. F. A. (2014). Significant causes and effects of variation orders in construction projects. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 7(21), 4494–4502.
- Meta Platforms, Inc. (2023). Passthrough in oculus / meta quest. Consulté le 17 février 2026. Récupéré de <https://developer.oculus.com/documentation/unity/unity-passthrough/>
- Milgram, P. et Jr., H. C. (1999). A taxonomy of real and virtual world display integration, in mixed reality : Merging real and virtual worlds. *New York, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.*, 5–30.
- Milgram, P. et Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 77(12), 1321–1329.
- Milovanovic, J., Moreau, G., Siret, D. et Miguet, F. (2017). Virtual and augmented reality in architectural design and education. Dans *17th international conference, CAAD futures 2017*.
- Mohamed, A. A. (2001). *Analysis and Management of Change Orders for Combined Sewer Overflow Construction Projects*. (Thèse de doctorat). Wayne State University.

- Navab, N. *et al.* (2002). Registration of technical drawings and calibrated images for industrial augmented reality. *Mach. Vision Appl.*, 13, 111–118.
- Paes, D., Arantes, E. et Irizarry, J. (2017a). Immersive environment for improving the understanding of architectural 3d models : Comparing user spatial perception between immersive and traditional virtual reality systems. *automation in Construction*, 84, 292–303.
- Paes, D., Arantes, E. et Irizarry, J. (2017b). Immersive environment for improving the understanding of architectural 3d models : Comparing user spatial perception between immersive and traditional virtual reality systems. *automation in Construction*, 84, 292–303.
- Paes, D. et Irizarry, J. (2018). A usability study of an immersive virtual reality platform for building design review : Considerations on human factors and user interface. Dans *Construction Research Congress 2018*, 419–428.
- Paes, P. S. (2020). *Utilizing Mixed Reality Technology to Support Decision Making Processes in the Construction Industry*. (Thèse de doctorat). University of Twente. Récupéré de <https://purl.utwente.nl/essays/81342>
- Pakkanen, J., Juuti, T. et Lehtonen, T. (2016). Brownfield process : A method for modular product family development aiming for product configuration. *Design Studies*, 45, 210–241.
- Research, M. (2015). Hololens : The new mixed reality platform. Presented at Build Conference 2015.
- Roberts, G., Evans, A., Dodson, A., Denby, B., Cooper III, S. et Hollands, R. (2002). Look beneath the surface with augmented reality [visualization of subsurface assets]. *GPS world*, 13(2).
- Rosenberg, L. B. (1993). Virtual fixtures : Perceptual tools for telerobotic manipulation. Dans *Proceedings of IEEE virtual reality annual international symposium*, 76–82. Ieee.
- Shen, J., Wu, Y. et Liu, H. (2001). Urban planning using augmented reality. *J. Urban Plann. Dev.*, 127(3), 118–125.
- Speicher, M., Hall, B. D. et Nebeling, M. (2019). What is mixed reality ? Dans *Proceedings of the 2019 CHI conference on human factors in computing systems*, 1–15.
- Sutherland, I. E. *et al.* (1965). The ultimate display. Dans *Proceedings of the IFIP Congress*, volume 2, 506–508. New York.

Thomas, B. e. a. (2001). Tinmith : A mobile augmented reality platform for architectural design. Dans *Proceedings of IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*.

Thomas, P. C. et David, W. (1992). Augmented reality : An application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. Dans *Hawaii international conference on system sciences*, volume 2, 659–669. ACM SIGCHI Bulletin.

Trimble (2023). Immersive virtual reality experiences with sketchup viewer on meta quest. Consulté le 17 février 2026. Récupéré de <https://www.sketchup.com/blog/en-US/article/untethered-vr-experiences-with-the-new-sketchup-viewer-for-meta-quest>

Trimble Navigation (n.d.). 3D Warehouse. Récupéré le 22 mars 2023. Récupéré de <https://3dwarehouse.sketchup.com/>

Wainwright, W. et Wood, A. (1983). *Variation and Final Account Procedure* (4th éd.). Hutchinson : Nelson Thornes Ltd.

Webster, A., Feiner, S., MacIntyre, B., Massie, W. et Krueger, T. (1996). Augmented reality in architectural construction, inspection, and renovation.

Webster, A. e. a. (2000). Augmented reality in construction : A review of applications. *Journal of Construction Engineering and Management*.

Wolfartsberger, J. (2019). Virtual reality in engineering and design : A comparative study. *Journal of Engineering Design*.

Y. Liu, F. Castronovo, J. M. et Leicht, R. (2020). Evaluating the impact of virtual reality on design review meetings. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 34.

Yigitbas, E., Nowosad, A. et Engels, G. (2023). Supporting construction and architectural visualization through bim and ar/vr : A systematic literature review. Dans *IFIP Conference on Human-Computer Interaction*, 145–166. Springer.