

Mémoire de fin d'études: Les maquettes architecturales à l'ère numérique : Apports et défis de la Réalité Augmentée

Auteur : Sanz Fraile, Abel

Promoteur(s) : Hallot, Pierre

Faculté : Faculté d'Architecture

Diplôme : Master en architecture, à finalité spécialisée en art de bâtir et urbanisme

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/23025>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Université de Liège, Faculté d'Architecture

Maquettes augmentées : vers une pédagogie
innovante en architecture

Travail de fin d'études présenté par Abel Sanz Fraile en vue de l'obtention du
grade de master en Architecture

Sous la direction du doyen de la faculté d'architecture, Pierre Hallot

Année académique 2024 - 2025

Remerciements

Je tiens, tout d’abord, à exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur, monsieur **Pierre Hallot**, pour son accompagnement rigoureux, ses vastes connaissances, sa bonne humeur constante, mais également pour son soutien tout au long de ce travail.

Je souhaite également remercier mes lecteurs, monsieur **François Gena**, monsieur **Michael Schyns**, et monsieur **Frédéric Delvaux**, dont les conseils avisés et les remarques pertinentes ont été d’une aide précieuse dans l’élaboration de ce travail.

Je tiens également à remercier **Jon Jäguer**, employé du SIG-AR/VR Lab-Digital, pour son implication dans l’élaboration des expérimentations 3D sur Unity. Mais également, monsieur **David Tieleman** et madame **Sarah Amighetti** pour leurs précieux conseils tout au long de l’élaboration de ce mémoire.

Je ne pourrais oublier **Umina Luigia**, **Emilio Sanz Fraile** et **Dea Boffin**, mes parents et ma petite sœur, qui m’ont témoigné un soutien indéfectible durant ces cinq années d’études.

Je tiens aussi à remercier **Romane Mathy**, ma compagne, et **Ulysse Bauwens**, **Gilles Remacles**, **Manon Grandjean**, **Léa Di prospero**, **Axel Gaeta**, **Arthur Audra** et **Quentin Audra**, mes amis, qui ont été une source précieuse de motivation, de soutien et de moments de détente indispensables. Leur présence et leur bienveillance ont rendu ce travail, et plus largement ces années d’études plus enrichissantes et agréables.

Enfin, je souhaite exprimer ma reconnaissance envers certains de mes professeurs : monsieur **Frédéric Haesevoets**, monsieur **Pascal Noé**, madame **Patricia Gardier**, monsieur **Maxime Coq**, monsieur **François Gena** et madame **Marina Frisenna**, qui, par leur soutien, leur dévouement et leur pédagogie, m’ont guidé et encouragé tout au long de mon parcours académique. Leur engagement constant ainsi que la richesse de leurs précieux conseils ont joué un rôle déterminant dans ma formation.

Enfin, je remercie chaleureusement toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce document.

Table des matières

Remerciements	2
Table des matières	4
Abstract.....	9
Listes des abréviations	10
Définition.....	11
La réalité virtuelle.....	12
La réalité mixte.....	14
La réalité augmentée.....	16
Introduction	20
Réinvention des maquettes physiques dans un cadre académique grâce à la réalité augmentée	20
Questionnement et hypothèse.....	21
Objectifs :	23
.....	24
Chapitre 1 : Contextualisation	24
Historique de l'évolution de la maquette en architecture.	25
Origine et Antiquité.....	25
Moyen Âge.....	26
Renaissance, 14 ^e -16 ^e siècle.....	26
18 ^e siècle	27
19 ^e siècle	27
20 ^e siècle	28
21 ^e siècle	30
Conclusion	30
Dates essentielles :	31
Historique de l'évolution de la réalité augmentée	32
Introduction	32
1960 – les prémices expérimentales	33
1970-1980 – Progrès techniques et premières applications.....	34
1990 – Formalisation conceptuelle et adoption industrielle	35
2000 – Explosion technologique et première application pratique.....	36
2010 – Vulgarisation et adoption massive.....	37
2020 – Maturité technologique et convergence avec l'intelligence artificielle	38
Conclusion	39
Dates essentielles :	40
Synthèse.....	41
.....	44
Chapitre 2 : Maquette et technologies immersives.....	44

Réalité augmentée :	46
Maquettes augmentées : Enjeux éducatifs et architecturaux	47
Introduction	47
Réalité augmentée et virtuelle dans l'éducation architecturale.	48
Application de la réalité augmentée et virtuelle en architecture.....	52
Application de l'utilisation de maquette augmentée en architecture.	55
Conclusion	58
L'utilisation des technologies de numérisation 3D pour la modélisation des maquettes architecturales : avancées et perspectives.	59
Introduction	59
Approches de numérisation 3D appliquées aux maquettes architecturales.	60
Comparaison des technologies de numérisation.....	61
Conclusion et perspective.....	63
L'étude de l'ensoleillement dans la conception architecturale.	64
La lumière naturelle comme élément structurant de l'architecture	65
Approches et stratégies d'intégration de la lumière naturelle	67
Ensoleillement et confort visuel : enjeux et méthodologies d'évaluation.	68
Performance énergétique et lumière naturelle	69
Outils d'analyse de l'ensoleillement : simulation et réalité augmentée.....	70
Conclusion	71
Synthèse.....	72
.....	76
Chapitre 3 : Méthodologie de recherche et mise en œuvre du dispositif de maquette augmentée..	76
Définition.....	77
Méthodologie.....	79
Dispositif d'enquête par entretiens semi-directifs.	80
Objectifs de la démarche	80
Cadre méthodologique	80
Constitution de l'échantillon	80
Dispositif de recueil des données	81
Stratégie d'analyse	81
Présentation du projet et des acteurs pédagogiques.....	82
Procédure de modélisation.....	83
Scan de la maquette physique et numérisation.....	83
Configuration du projet Unity et intégration de Needle Engine.	84
Intégration de la maquette numérisée et création de l'environnement interactif	85
Conclusion.....	87
.....	88
Chapitre 4 : Appropriation pédagogique de la maquette augmentée.....	88
Analyse croisée des entretiens : perspectives critiques sur l'usage d'une maquette augmentée dans l'enseignement de l'architecture.	89

Introduction	89
La maquette augmentée comme outil de médiation	91
Postures pédagogiques et philosophie d'enseignement	92
La simulation d'enseillement : potentiel et limites.....	93
La maquette augmentée comme outil d'analyse.....	94
Une transition vers la conception ?	95
L'immersion : changer d'échelle pour mieux percevoir	96
Communication et mise en récit du projet.....	97
Conclusion	100
Chapitre 5 : Conclusion et perspectives	102
Une réception critique et située de la maquette augmentée	103
Relecture de la problématique à l'aune des données empiriques	103
La technologie comme révélateur des conceptions pédagogiques	104
Temporalité pédagogique et place de la maquette augmentée	105
Vers une configuration critique de l'hypothèse initiale.....	105
Perspectives	107
Amélioration technique et ergonomique de l'outil.....	108
Multiplication des usages pédagogiques et communicationnels	109
Préparation du jury grâce aux maquettes numérisées.....	110
Accompagnement institutionnel et formation	111
Table des illustrations.....	112
Bibliographie	114
Article de revue :	114
Actes de colloque et conférence :	115
Littérature grise (prépublications, archives ouvertes) :	115
Livre :	116
Article de presse	116
Média vidéo.....	116
Site internet :	116
Intelligences artificielles	117

Abstract

Dans le cadre de l'évolution des outils d'apprentissage en architecture, ce travail examine l'apport de la réalité augmentée (RA) appliquée aux maquettes physiques. Bien que les maquettes traditionnelles jouent un rôle essentiel dans la compréhension spatiale, leur caractère statique limite la représentation de phénomènes dynamiques. L'objectif est d'analyser comment l'ajout d'une couche numérique interactive peut enrichir les méthodes d'enseignement, stimuler la créativité pédagogique et favoriser de nouvelles manières de présenter et d'analyser les projets en atelier.

En combinant des expérimentations pratiques et des entretiens semi-directifs avec des enseignants, cette étude met en évidence que la maquette augmentée est perçue comme un outil pédagogique prometteur, capable de révéler de nouvelles dynamiques d'enseignement. Elle permet une meilleure lecture critique des projets, notamment grâce à la simulation d'effets lumineux ou de flux environnementaux, mais impose aussi de repenser les usages en fonction des contraintes techniques, organisationnelles et temporelles.

Ainsi, la maquette augmentée se positionne comme un levier d'innovation pédagogique en architecture. De plus, l'étude souligne la nécessité d'améliorer l'ergonomie des outils, de prévoir une intégration progressive dans les programmes de formation, et de développer des stratégies d'accompagnement pour faciliter l'appropriation de ces technologies. Ce travail ouvre ainsi des perspectives concrètes pour renforcer l'interactivité et l'analyse critique au sein des ateliers d'architecture.

Maquette augmentée, Réalité augmentée, innovation pédagogique, Enseignement de l'architecture, Immersion numérique

Listes des abréviations

CAO	Conception assistée par ordinateur.
RA/AR	Réalité augmentée.
RM/MR	Réalité mixte.
RV/VR	Réalité Virtuelle.
SAR	Spatially-Augmented Reality
BIM	Building information Modelling
HMD	Head...

See-through	Un dispositif <i>see-through</i> est une interface de visualisation en réalité mixte qui permet à l'utilisateur de percevoir simultanément l'environnement réel et des éléments virtuels superposés, grâce à une transparence optique ou une reconstruction vidéo en temps réel.
Dataveillance	Surveillance des données personnelles ou numériques générées par les individus dans le cadre de leurs activités quotidiennes en ligne et hors ligne.
Métaveillance	Surveillance ou observation des systèmes de surveillance eux-mêmes. Cela inclut la surveillance des technologies, des méthodes et des pratiques utilisées pour collecter, stocker, analyser et utiliser des données de surveillance.
Réalité augmentée	La réalité augmentée est une interface virtuelle qui enrichit la réalité en superposant des informations complémentaires, comme des éléments 2D ou 3D, en temps réel.
Réalité mixte	La réalité mixte est un mélange de mondes physique et virtuel, où des objets réels et des éléments générés par ordinateur coexistent et interagissent en temps réel.

Réalité virtuelle	La réalité virtuelle permet à un utilisateur d'interagir dans un environnement numérique tout en ayant l'impression d'être immergé dans un environnement physique.
Workflow	Séquence organisée de tâches ou de processus automatisés permettant de structurer et d'optimiser une activité. En numérisation 3D, il représente l'ensemble des étapes nécessaires, de l'acquisition des données au traitement et à l'intégration des modèles dans des logiciels spécialisés.

Définition

Pour garantir une compréhension générale, il est essentiel de commencer par définir ces technologies et les termes techniques qui y sont liés avant d'en discuter. Au fil de votre lecture du travail de fin d'études, vous rencontrerez fréquemment les termes suivants : réalité virtuelle, réalité augmentée et réalité mixte. Certaines technologies ont des caractéristiques différentes et proposent diverses choses. Cependant, elles peuvent être étroitement interconnectées. Il est néanmoins crucial de ne pas les confondre, car leurs objectifs et les moyens techniques qu'ils impliquent diffèrent.

La réalité virtuelle

"La réalité virtuelle n'est pas seulement un outil de visualisation, c'est un espace où l'architecture peut être conçue, testée et vécue avant même d'exister."

Zaha Hadid Architects, pionnier de l'architecture numérique.

La réalité virtuelle, appelée RV ou VR, est un domaine scientifique, technique et artistique visant à immerger un utilisateur dans un environnement artificiel, généré numériquement, et à permettre une interaction en temps réel avec cet environnement. La VR repose sur deux fondements essentiels : l'immersion, qui plonge l'utilisateur dans un univers simulé via des dispositifs comme les visiocasques, et l'interaction, qui lui permet d'agir sur cet environnement par des interfaces comportementales (Fuchs, 2006, p.24-26).

La réalité virtuelle se distingue par sa capacité à générer des activités sensorimotrices et cognitives dans un monde artificiel. Ces mondes peuvent être une simulation réaliste, une représentation symbolique ou un univers totalement imaginaire. La VR trouve des applications variées, allant des domaines professionnels, tels que la formation et la santé, aux loisirs, comme les jeux vidéos immersifs et les œuvres artistiques interactives intégrant des technologies numériques (Fuchs, 2006, p.20-22).

Positionnée à l'extrémité du continuum Réalité-Virtuelle défini par Milgram et Koshino, cette technologie contraste avec la réalité augmentée et mixte, où des éléments réels et virtuels coexistent. Ce continuum illustre le passage progressif d'un environnement totalement réel à un univers entièrement numérique (Milgram, 1994, p.2-5).

Cette technologie exploite des boucles sensorimotrices dynamiques, minimisant la latence pour assurer une expérience fluide et immersive. Ce couplage étroit entre perception et action place l'utilisateur au cœur de l'expérience, non comme un simple spectateur, mais comme un acteur capable d'influencer son environnement virtuel (Fuchs, 2006, p.25-27).

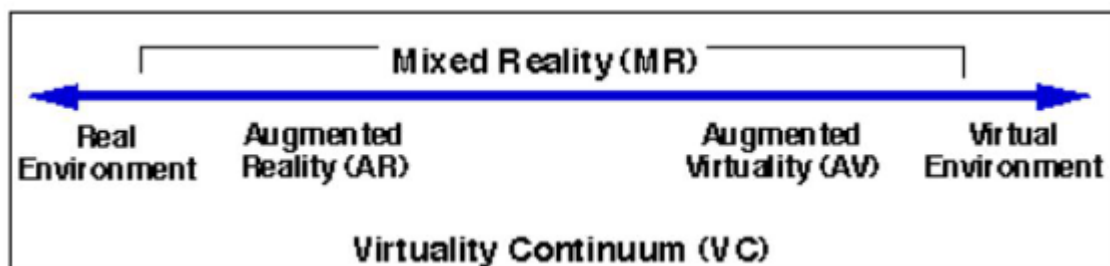


Figure 1 - Diagramme du continuum de réalité-virtualité. Source : Milgram & Kishino, 1994.

La réalité mixte

« La réalité mixte nous permet d'interagir avec le monde numérique
comme nous le faisons avec le monde physique ».

Alex Kipman, inventeur de la Microsoft HoloLens

La réalité mixte, appelée RM ou MR, est un domaine technologique visant à intégrer et à faire coexister des éléments réels et virtuels dans un même environnement interactif. Contrairement à la réalité augmentée, qui enrichit le réel avec des superpositions virtuelles, ou à la réalité virtuelle, qui plonge l'utilisateur dans un monde entièrement simulé, la RM ancre des objets virtuels dans le réel et permet des interactions complexes entre les deux dimensions. Elle repose sur deux principes fondamentaux : l'intégration spatiale et la cohérence comportementale, assurant que les objets réels et virtuels interagissent de manière naturelle et réaliste (Milgram, 1994, p. 2-5) ; (Speicher, 2019).

La réalité mixte se distingue par sa capacité à offrir des expériences où les utilisateurs peuvent manipuler des objets virtuels directement dans le monde réel ou voir des objets réels transformés dans un cadre virtuel. Par exemple, dans un scénario de formation industrielle, un opérateur peut interagir avec une machine réelle tout en voyant des instructions virtuelles superposées et ajustées en temps réel à son contexte (Speicher, 2019), (Dunston, 2005, p.1-4).

Positionnée au centre du continuum Réalité-Virtualité défini par Milgram et Kishino, la RM représente un mélange entre un environnement physique tangible et des éléments numériques immersifs. Ce continuum montre l'évolution progressive d'un milieu complètement physique à une sphère exclusivement numérique, mettant en évidence la souplesse et la richesse des possibilités offertes par la réalité augmentée. (Milgram, 1994, p. 2-5)

Enfin, la RM exploite des interfaces avancées, comme les dispositifs de « see-through » vidéos ou optiques, et des technologies de détection de mouvement pour garantir une interaction fluide et intuitive. Ce couplage entre réalité et virtualité transforme l'utilisateur en un acteur capable d'influencer à la fois son environnement physique et numérique. (Speicher, 2019)

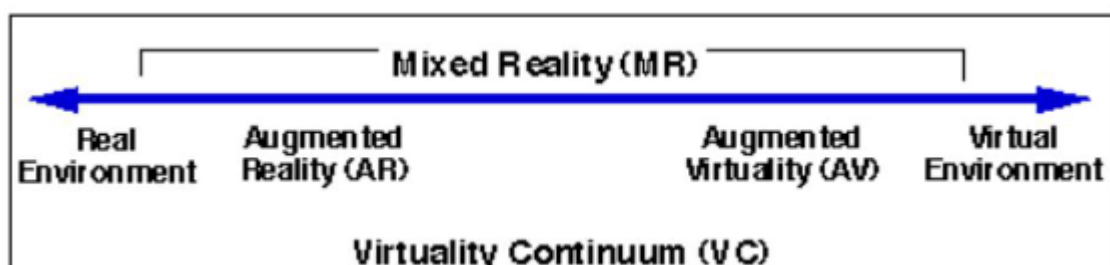


Diagramme du continuum de réalité-virtualité Source : Milgram & Kishino, 1994.

La réalité augmentée

« Je pense que la réalité augmentée est le prochain grand pas technologique. Elle nous permettra de voir le monde tel qu'il est, mais aussi d'ajouter des objets numériques sur ce monde. Imaginez pouvoir montrer une photo à vos amis en l'agrandissant à volonté avec des lunettes AR. »

Mark Zuckerberg, fondateur de Meta

La réalité augmentée, appelée RA ou AR, est une technologie qui enrichit la perception du monde réel en superposant des éléments virtuels à l'environnement physique de l'utilisateur. Contrairement à la réalité virtuelle, qui immerge l'utilisateur dans un univers totalement numérique, ou à la réalité mixte, qui fusionne objets réels et virtuels dans un même environnement interactif partagé, la RA préserve l'environnement réel comme support principal et y ajoute des informations visuelles, sonores ou haptiques en temps réel. Ces ajouts virtuels, souvent appelés « couches numériques », sont spatialement alignés avec les objets réels grâce à des systèmes de suivi précis (Azuma, 1997, p.355).

La RA repose sur trois principes fondamentaux : l'intégration du réel et du virtuel, permettant d'ajouter des objets numériques à l'environnement physique. L'interaction en temps réel, rendant possible la manipulation de ces objets par l'utilisateur ; et, l'enregistrement spatial en 3D, qui garantit que les objets virtuels restent cohérents dans l'espace observé. Ces fonctionnalités sont rendues possibles par des dispositifs comme des smartphones, des lunettes connectées ou des tablettes équipées de caméras et de capteurs (Azuma, 1997, p.355), (Milgram, 1994, p. 2-5).

Les applications de la RA sont vastes, en médecine, elle aide les chirurgiens à superposer des images anatomiques sur un patient pour guider des interventions. Dans l'architecture, elle permet aux architectes et clients de visualiser des projets de construction sous forme de modèles 3D superposés sur un site réel. Dans le commerce, elle permet aux consommateurs de visualiser virtuellement des produits comme des meubles directement dans leur espace domestique avant l'achat. Dans les loisirs, elle transforme des environnements réels en espaces de jeu interactifs, comme dans Pokémon Go. Ces exemples illustrent la diversité des usages, allant de l'assistance professionnelle à des expériences ludiques immersives (Azuma, 1997, p.355), (Speicher, 2019).

Positionnée à l'extrémité réelle du continuum Réalité-Virtualité de Milgram et Kishino, la RA contraste avec la réalité mixte, qui implique une intégration plus profonde entre réel et virtuel, et avec la réalité virtuelle, qui crée des univers totalement simulés. Ce continuum souligne que la RA conserve un lien direct avec le réel, utilisant la technologie pour enrichir sans remplacer l'environnement perçu (Milgram, 1994, p.2-5).

Enfin, la RA transforme l'utilisateur en acteur actif de son expérience. En exploitant des algorithmes de vision par ordinateur et des technologies de suivi spatial, elle garantit une synchronisation parfaite entre ses interactions et les éléments virtuels, créant ainsi une expérience immersive et fluide adaptée à divers contextes.



Diagramme du continuum de réalité-virtualité Source : Milgram & Kishino, 1994.

Introduction

Réinvention des maquettes physiques dans un cadre académique grâce à la réalité augmentée

Les maquettes physiques sont au cœur de l'apprentissage en architecture, offrant une représentation tangible et tridimensionnelle des concepts spatiaux, des formes et des matériaux. Elles permettent aux étudiants de tester leurs projets et de mieux les communiquer. Cependant, ces outils pédagogiques traditionnels présentent des limites significatives, leur nature statique limite leur capacité à représenter les variations temporelles, les flux dynamiques, ou encore les interactions complexes entre les éléments architecturaux et leur environnement.

L'intégration de la réalité augmentée dans ce domaine permet de superposer des informations numériques directement sur les maquettes physiques, transformant ces dernières en outils interactifs et immersifs (Tuzun Canadinc, 2022). Cette intégration permet d'ajouter en temps réel des éléments dynamiques, tels qu'une simulation d'ensoleillement, les flux piétonniers, les annotations contextuelles ou encore les textures numériques, augmentant ainsi les possibilités d'analyse et de communication pour les étudiants.

Les ateliers d'architecture sont des espaces d'expérimentation et de collaboration qui peuvent tirer profit de la réalité augmentée pour permettre une exploration approfondie des projets. Elle offre aux étudiants la possibilité de visualiser des transformations architecturales dynamiques, comme les variations d'éclairage au fil de la journée, de tester plusieurs scénarios de conception directement sur leur maquette physique afin de pouvoir les comparer, et de faciliter les échanges entre étudiants et professeurs grâce à des représentations plus riches et communicatives.

L'objectif de cette recherche est donc de créer des scénarios pédagogiques afin de comprendre comment la RA pourrait être adoptée dans un environnement académique. Ces expérimentations viseront à observer et comprendre comment les enseignants s'approprient ces outils, ainsi que leurs interactions avec des maquettes augmentées. Cette recherche propose donc de recueillir des retours d'expérience en milieu réel, dans un contexte académique, afin d'évaluer les bénéfices et les obstacles de l'intégration de la réalité augmentée aux maquettes physiques dans ce contexte.

Questionnement et hypothèse

La question principale qui guide cette recherche est la suivante : dans quelle mesure l'intégration de la réalité augmentée à une maquette physique permet-elle aux enseignants en architecture d'imaginer et de concevoir des scénarios pédagogiques innovants, en vue d'un déploiement dans leurs propres pratiques comme dans celles des étudiants ?

Il ne s'agit pas ici d'observer directement les effets de la réalité augmentée sur les étudiants, mais bien de comprendre comment les enseignants, en manipulant une maquette augmentée, peuvent concevoir de nouveaux scénarios pédagogiques. L'objectif est d'explorer la manière dont cet objet hybride peut être investi comme un support de réflexion pédagogique, stimulant la créativité didactique et ouvrant des perspectives d'usage renouvelées dans le contexte de l'enseignement du projet architectural.

Dès lors, plusieurs sous-questions émergent : « Comment les enseignants perçoivent-ils les apports potentiels de la réalité augmentée dans le cadre d'un dispositif pédagogique existant ? », « Quelles dimensions de cette technologie apparaissent comme des leviers ou des freins à l'émergence de nouvelles pratiques didactiques ? », « De quelle manière une maquette augmentée permet-elle de revisiter les modalités de transmission, de représentation ou de discussion du projet architectural en atelier ? », et enfin, « Dans quelles conditions matérielles, humaines et institutionnelles une telle technologie pourrait-elle être intégrée de manière durable à l'enseignement ? »

L'hypothèse principale qui sous-tend cette recherche est que la réalité augmentée, lorsqu'elle est appliquée à une maquette physique dans un cadre pédagogique réel, constitue un outil pertinent pour enrichir les pratiques d'enseignement du projet. Elle permettrait d'introduire une dimension interactive, sensible et dynamique dans l'analyse d'un site existant, facilitant ainsi la projection critique, la transmission d'informations complexes et la coconstruction d'outils pédagogiques adaptés aux enjeux contemporains de la formation architecturale.

En conclusion, cette recherche cherche à interroger le potentiel de la réalité augmentée non comme une fin en soi, mais comme un levier pédagogique susceptible de nourrir les pratiques d'enseignement du projet. En plaçant les enseignants au centre du dispositif, il s'agit de comprendre comment cet outil peut inspirer de nouvelles manières de transmettre, de représenter et de discuter l'architecture. Cette réflexion vise à ouvrir des perspectives concrètes pour enrichir les dynamiques pédagogiques dans un contexte académique en constante évolution.

Objectifs :

Cette recherche vise à explorer comment la réalité augmentée, appliquée à une maquette physique représentant un site existant, peut devenir un vecteur d'innovation pédagogique dans l'enseignement de l'architecture. L'objectif central est de proposer aux enseignants un outil hybride leur permettant d'expérimenter de nouvelles modalités de transmission, de représentation et d'analyse du projet architectural, tout en confrontant ces usages à leurs pratiques pédagogiques réelles.

En mettant à disposition une maquette enrichie d'une couche numérique interactive, cette recherche cherche à provoquer un dialogue entre outils technologiques et méthodes d'enseignement traditionnelles. Elle permettra de recueillir des retours qualitatifs de la part des enseignants sur les usages potentiels de la RA, ses apports, mais aussi ses limites. En ce sens, l'étude tente d'identifier les opportunités offertes par cet outil dans l'amélioration de la compréhension des phénomènes architecturaux complexes, tels que l'ensoleillement, ainsi que dans le développement de dispositifs de médiation spatiale plus accessibles.

Un autre objectif important consiste à analyser la capacité de la RA à favoriser une reformulation des rôles pédagogiques au sein des ateliers de projet, en stimulant par exemple la réflexivité des enseignants sur leurs propres pratiques, ou en déclenchant de nouvelles formes de narration autour du projet architectural. Il s'agira aussi d'observer les conditions concrètes nécessaires à la mise en œuvre de tels outils dans les cursus, en tenant compte des aspects techniques, institutionnels et humains.

Enfin, ce travail entend également contribuer à la structuration d'un cadre méthodologique reproductible pour de futures expérimentations pédagogiques mobilisant des outils immersifs. En croisant les retours d'usages, les analyses qualitatives et les perspectives critiques issus des entretiens menés, cette recherche ambitionne de nourrir les réflexions actuelles sur l'intégration du numérique dans l'enseignement de l'architecture et de formuler des recommandations concrètes pour une adoption à la fois pertinente, mesurée et créative de la réalité augmentée.

Chapitre 1 :

Contextualisation

Historique de l'évolution de la maquette en architecture.

Cette approche historique traitant de l'évolution historique de la maquette permet de comprendre son utilisation évolutive dans l'architecture. Cette compréhension est essentielle pour situer l'intégration de nouvelles technologies, comme la RA, dans un continuum pédagogique et conceptuel. Cette approche permet non seulement de mesurer comment ces innovations enrichissent, transforment ou complètent les pratiques séculaires de conception et d'apprentissage, mais aussi de souligner leur rôle dans le renforcement de l'interactivité, de la créativité et de la collaboration au sein des environnements éducatifs en architecture.

Origine et Antiquité

L'utilisation de la maquette remonte à des époques très anciennes. Dès l'antiquité, on trouve des exemples de maquettes servant à représenter des objets du monde réel ou imaginaire. En Égypte ancienne, les tombes contenaient des maquettes d'édifices ou d'ateliers, offrant une vision miniature des éléments de la vie quotidienne ou de l'au-delà (Estévez, 2014, p. 77). En Grèce antique, les « *paradeigmata* », prototypes d'anticipation, étaient utilisés pour préfigurer la construction de temples et d'édifices publics (Estévez, 2014, p.77-78).



Figure 2 - Maquette d'une brasserie et boulangerie de la tombe de Méketrê, montrant les activités alimentaires essentielles dans l'au-delà.

Dans ces contextes, la maquette remplissait deux fonctions principales, la reproduction d'un objet existant et l'anticipation de construction future, constituant ainsi un outil précurseur pour explorer et matérialiser des concepts architecturaux (Szuta, 2020, p.177).

Moyen Âge

Durant le Moyen Âge, l'utilisation des maquettes est restée limitée. Elles apparaissaient principalement pour des projets spécifiques, souvent sous forme de modèles en bois, utilisés pour estimer les coûts ou illustrer les projets de construction. Ces maquettes avaient pour but de pallier les limitations liées aux techniques de dessin en deux dimensions (Szuta, 2020, p.177-179). Bien qu'encore rares, elles préfiguraient l'émergence de leurs usages comme outils de planification.

Renaissance, 14^e -16^e siècle

La Renaissance marqua un tournant décisif dans l'histoire de la maquette. Les architectes, inspirés par les idéaux humanistes et la quête de la précision, développèrent l'usage de maquettes expérimentales pour vérifier la faisabilité de leurs idées. Léon Battista Alberti, dans son traité « De re Aedificatoria », insiste sur la valeur de la maquette comme outil d'expérimentation, permettant de modifier, d'innover et même de bouleverser les concepts initiaux sans danger (Estévez, 2014, p. 78-80). Cette vision expérimentale trouve un écho dans les pratiques modernes, où les architectes utilisent toujours des maquettes pour simuler des comportements structurels, explorer des formes complexes et tester des scénarios innovants (Estévez, 2014, p. 78-80).

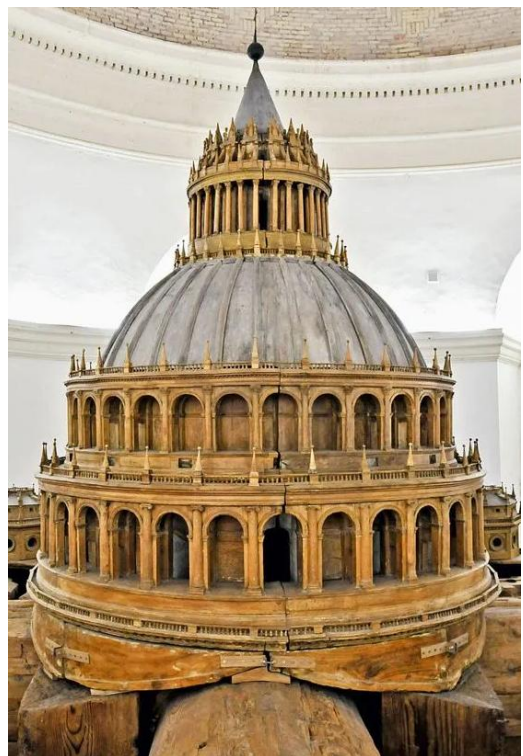


Figure 3 - Détail architectural de la maquette de la basilique Saint-Pierre (façade ou dôme). Source : Lallo, 2021.

Les matériaux utilisés incluaient le bois, le plâtre et l'argile, tandis que les maquettes se diversifiaient pour inclure non seulement des bâtiments individuels, mais aussi des représentations de districts urbains et de fortifications (Szuta, 2020, p.177-178).

18^e siècle

Lors de ce siècle, les maquettes furent intégrées dans la formation des artisans et ingénieurs, devenant des outils pédagogiques pour expliquer des concepts techniques complexes. Elles ne se limitaient plus à compléter des dessins, mais étaient utilisées comme principaux moyens de communication visuelle, illustrant leur importance croissante dans le processus de conception (Szuta, 2020, p.177-178).

19^e siècle

Le 19^e marque une période de transition dans l'utilisation des maquettes en architecture, où celles-ci, bien que moins courantes que le dessin, commencent à gagner en importance dans certains contextes spécifiques. Cette époque voit l'usage des maquettes pour des projets d'envergure, tels que les grands chantiers sous le Second Empire, période de règne de Napoléon III, où elles servent à présenter et à concevoir des projets complexes, notamment grâce à des matériaux comme le plâtre et le bois. Ces maquettes, souvent produites par des sculpteurs ou des artisans, commencent à dépasser leur fonction strictement utilitaire pour devenir des objets de démonstration lors d'expositions universelles, comme celle de 1873 à Vienne (Quantin-Biancalami, 2020, p.22-23).



Figure 4 - Maquette de la coupe longitudinale de l'Opéra Garnier, illustrant la complexité architecturale de l'édifice conçu par Charles Garnier.

Malgré leur rareté relative, certaines maquettes de cette époque témoignent d'une véritable recherche esthétique et technique, et posent les bases de leur usage intensif au siècle suivant. Ces objets servent non seulement à documenter les projets, mais deviennent également des supports de communication et d'exposition (Quantin-Biancalami, 2020, p.22-23).

20^e siècle

Le 20^e siècle représente une véritable révolution dans l'utilisation des maquettes en architecture, caractérisée par une professionnalisation accrue des maquettistes et l'apparition de nouveaux matériaux, comme les acryliques, qui permettent un meilleur réalisme et une meilleure précision (Quantin-Biancalami, 2020, p.12). Les années 20 et 30 voient également l'intégration de photographies de maquette dans les revues architecturales, un phénomène qui contribue à leur diffusion et à leur reconnaissance comme outils essentiels dans les processus de conception et de communication (Quantin-Biancalami, 2020, p.12-14).

Avec l'essor des mouvements modernistes, les maquettes deviennent un outil central pour tester des idées. Walter Gropius, fondateur du Bauhaus, illustra leur importance en les intégrant dans l'éducation et le design. Ces maquettes, parfois rudimentaires, permettaient une compréhension immédiate des idées spatiales et architecturales, favorisant la communication entre architectes, techniciens et clients (Szuta, 2020, p.177-178).

Le Corbusier et Mies van der Rohe, deux figures emblématiques du modernisme, ont joué un rôle clé dans l'élévation de la maquette comme outil central de conception et de communication architecturales. Le Corbusier utilisait des maquettes non seulement pour tester des idées architecturales, mais aussi comme des objets plastiques à part entière, combinant exploration artistique et rigueur fonctionnelle. Ces



Figure 5 - Maquette de la Neue Nationalgalerie, Berlin. Source : Staatliche Museen zu Berlin, 2023.

maquettes, souvent présentées lors d'expositions, servaient également à diffuser des visions modernistes auprès d'un public plus large. Mies van der Rohe, de son côté, a marqué l'histoire de la maquette en l'intégrant dans ses stratégies de représentation et en exploitant la photographie de maquettes pour amplifier l'impact visuel de ses projets dans les médias spécialisés, renforçant ainsi leur rôle dans la communication et l'exposition de l'architecture moderne (Quantin-Biancalami, 2020, p.22-24).

Après la Seconde Guerre mondiale, la demande croissante pour des maquettes détaillées, notamment aux États-Unis, transforme les pratiques : les maquettes deviennent des objets d'un réalisme tel qu'elles reproduisent parfois les caractéristiques constructives des bâtiments qu'elles représentent. Ce « The miniature boom », décrit par Jane Jacobs en 1958, illustre l'intégration des maquettes dans une démarche mécanisée et standardisée, tout en maintenant leur rôle clé dans la visualisation des projets (Quantin-Biancalami, 2020, p.12-15).

Enfin, à partir des années 70, la maquette acquiert un statut autonome grâce à des événements comme l'exposition « Idea as a model » de 1976. Elle cesse d'être simplement un outil de conception pour devenir un objet patrimonial et artistique, exposé dans des musées et vendu comme une œuvre d'art, consacrant ainsi son importance dans la culture architecturale contemporaine (Quantin-Biancalami, 2020, p.14).



Figure 6 - Le Corbusier - Maquette en plâtre de la chapelle Notre-Dame-Du-Haut, située à Ronchamp, en Haute-Saône (1955)

21^e siècle

Avec l'avènement de la modélisation numérique, les maquettes virtuelles (CAD, BIM) ont transformé la pratique architecturale. Ces outils permettent des visualisations hyperréalistes et des simulations complexes (Szuta, 2020, p.177-178). Cependant, les maquettes physiques conservent un rôle important, notamment dans l'éducation et les premières phases de conception, où leur manipulation directe stimule la créativité et une meilleure compréhension spatiale.

Dans le contexte éducatif, les chercheurs soulignent l'importance de conserver l'usage des maquettes physiques pour encourager l'exploration tactile et l'intuition créative, face aux limites imposées par les outils numériques (Bédouret, 2020, p.4-6). La combinaison des approches traditionnelles et numériques est perçue comme essentielle pour former des architectes complets.

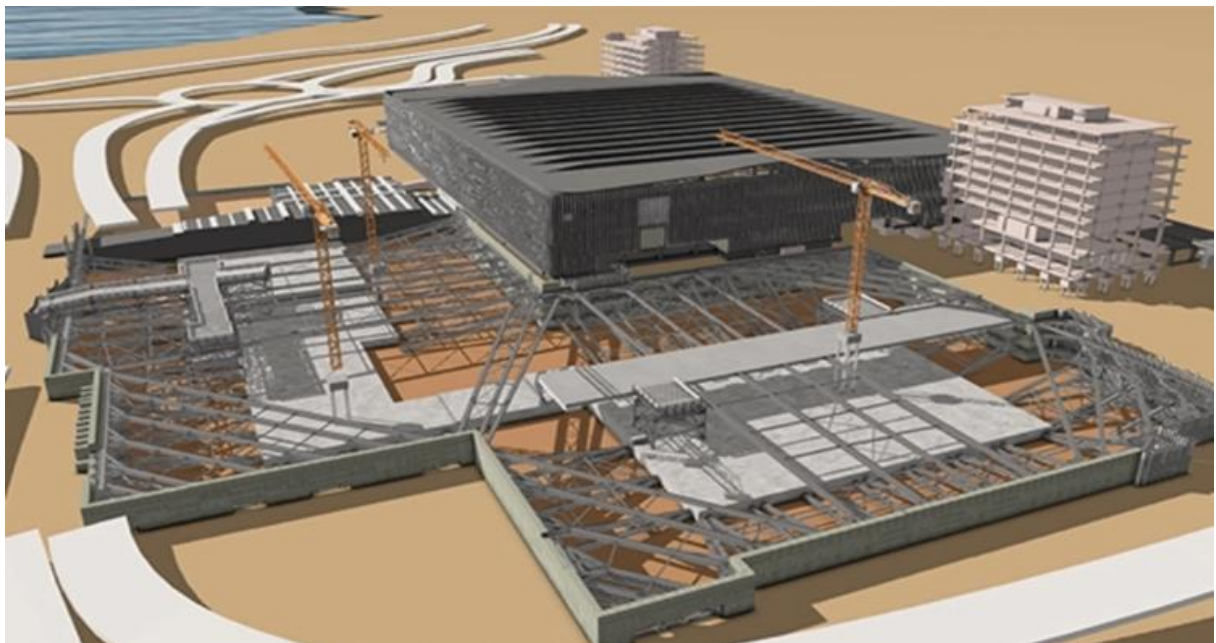


Figure 7 - Maquette numérique BIM de l'extension du Terminal 2 de l'aéroport international de Hong Kong. Source : Autodesk, 2021.

Conclusion

En conclusion, l'histoire de la maquette révèle son rôle fondamental comme outil d'expérimentation, de communication et d'éducation. De l'antiquité à l'ère numérique, elle s'est adaptée aux évolutions technologiques et aux besoins des concepteurs. Aujourd'hui, son importance persiste, tant comme outil tangible de réflexion que comme médium numérique, garantissant un dialogue entre tradition et modernité.

Dates essentielles :

2600 av. J.-C. Premières maquettes funéraires en Égypte ancienne.

420 av. J.-C. Utilisation des « paradeigmata » en Grèce Antique.

250 av. J.-C. Création de maquettes navales à Carthage.

1436 Création d'une maquette de la coupole de la cathédrale de Florence par Filippo Brunelleschi.

1514 Réalisation d'une maquette en bois de la Basilique Saint-Pierre de Rome par Antonio de Sangallo.

1598 Jacques Androuet du Cerceau réalise des maquettes pour des projets royaux français.

1668 Louis XIV commande les premiers plans-reliefs pour visualiser les fortifications militaires.

1725 Les académies d'architecture européennes, comme l'académie royale d'architecture de Paris, utilisent des maquettes pour enseigner les proportions.

1794 Création du plan-relief de Lille par l'ingénieur militaire Vauban.

1814 Premières maquettes industrielles documentées

1851 Exposition de maquettes architecturales à la première exposition universelle de Londres dans le Crystal palace.

1878 Présentation d'une maquette détaillée de la statue de la Liberté par Frédéric-Auguste Bartholdi à l'exposition universelle de Paris.

1923 Intégration de l'utilisation des maquettes dans l'enseignement du Bauhaus.

1931 Construction de maquettes pour l'Empire State à New York pour tester les proportions du gratte-ciel.

1969 Utilisation des maquettes pour concevoir et tester les modules lunaires de la mission Apollo 11

1976 L'exposition « Idea as Model » à New York met en lumière les maquettes comme objets artistiques.

2003 Introduction du BIM (Building Information Modelling).

2016 Développement de maquettes augmentées intégrant la réalité augmentée, utilisée notamment pour des projets comme le musée d'histoire de Doha.

Historique de l'évolution de la réalité augmentée

Introduction

Cette analyse chronologique de l'évolution de la réalité augmentée (RA) explore son développement à travers les décennies, offrant une perspective essentielle sur son impact croissant dans divers domaines, notamment l'architecture. Comprendre cette évolution permet de saisir comment la RA, de ses premières expérimentations dans les années 1960 à son intégration dans des secteurs comme l'éducation, est devenue un outil central de transformation et d'innovation. Cette étude met en lumière la manière dont la RA enrichit les pratiques existantes, tout en soulignant son rôle crucial dans la création d'environnements interactifs, collaboratifs et immersifs. Elle ouvre également la voie à une réflexion sur l'intégration de technologies récentes, comme l'intelligence artificielle (IA/AI), dans un continuum d'innovations pédagogiques et conceptuelles.

Cette perspective historique permet, dans le cadre de cette recherche, de mettre en lumière les transformations techniques et conceptuelles qui ont façonné l'usage de la RA dans des contextes spécifiques, comme l'éducation en architecture. En étudiant l'évolution de la RA, il est possible de saisir comment son intégration dans des maquettes traditionnelles pourrait enrichir l'apprentissage, transformer les méthodes pédagogiques et répondre aux besoins croissants d'interactivité et de visualisation dans la formation des architectes. L'histoire de cette technologie permet ainsi de situer ses applications dans une continuité d'innovation, offrant un cadre pour évaluer ses potentiels dans le domaine académique en architecture.

1960 – les prémices expérimentales

La RA trouve ses racines dans les années 1960 grâce aux travaux fondateurs d'Ivan Sutherland, qui posa les bases des environnements immersifs. Dans son ouvrage, il décrit une technologie capable de superposer des éléments virtuels sur le monde réel, engageant tous les sens de l'utilisateur et abolissant les contraintes physiques (Sutherland, 1965).

Ce concept se concrétise avec le développement du « Sword of Damocles, le premier « Head-mounted Display (HMD), un dispositif capable de projeter des graphiques filaires en 3D alignées avec l'environnement réel (Milgram, 1994, p.2-6). Cette technologie, bien que rudimentaire, pose les bases des interactions virtuelles et physiques.

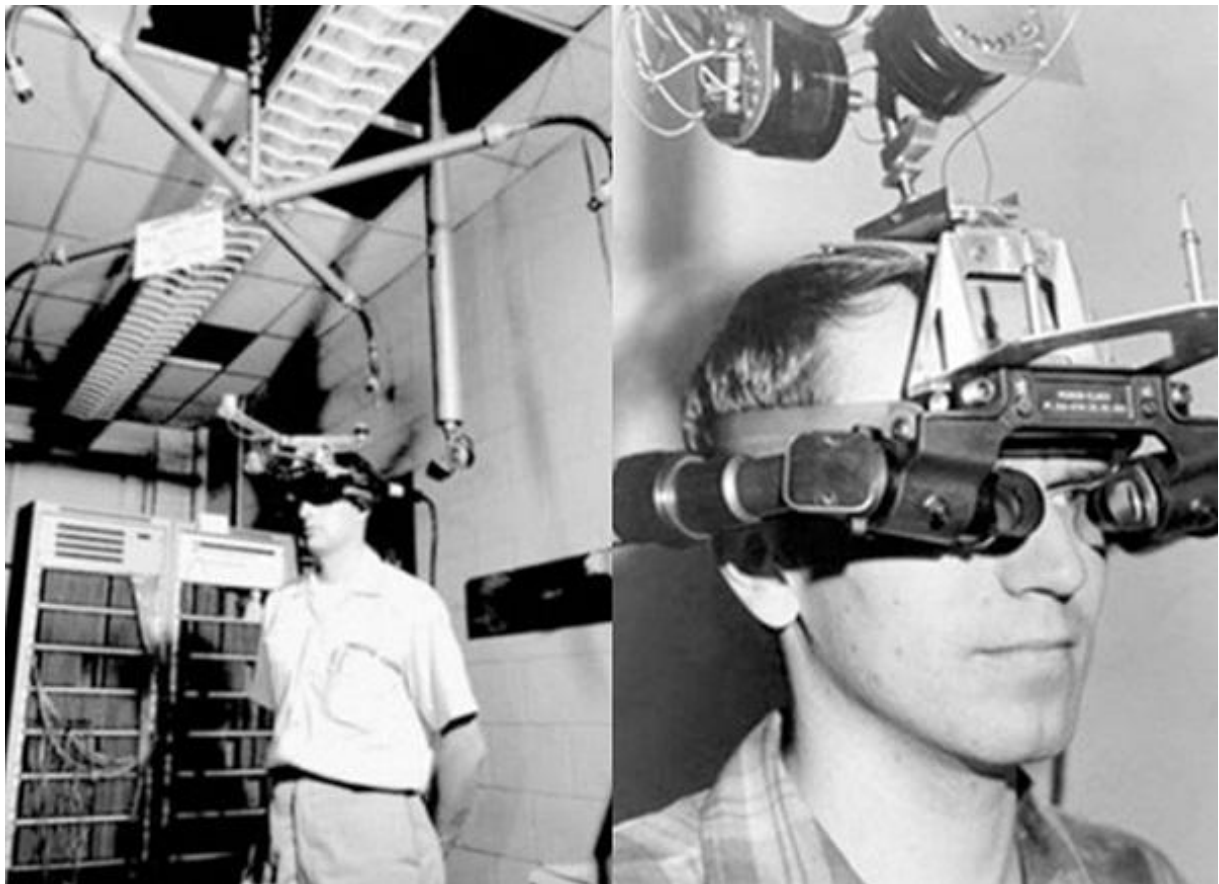


Figure 8 - Sword of Damocles, premier casque de réalité virtuelle, Ivan Sutherland, 1968. Source : The VR Shop.

1970-1980 – Progrès techniques et premières applications

Durant ces décennies, la RA reste confinée à des laboratoires de recherche et aux applications militaires. (Wang, 2009, p.310).

Les applications de la RA s'étendent à cette période principalement sur le développement dans des environnements militaires, notamment avec des simulateurs de vol. Ces systèmes intègrent des éléments augmentés dans le champ de vision des pilotes, comme des trajectoires, des indicateurs de vitesse, et des données de navigation, affichés directement sur des casques ou des écrans de cockpit. L'objectif était de renforcer la conscience situationnelle dans des environnements complexes, où les décisions devaient être prises rapidement (Azuma, 1997, p.9-10).

Les casques de visualisation tête haute (HUD) utilisés dans les avions de chasse, comme le F-16, fournissaient des données superposées au champ de vision réel des pilotes. Ces dispositifs représentaient une forme rudimentaire de RA, bien qu'ils soient limités par des capacités de calcul faibles et un manque de précision dans l'alignement des données virtuelles avec l'environnement réel (Azuma, 1997, p.9-11).



Figure 9 - Affichage tête haute (HUD) du F-14 Tomcat, années 1980. Source : Pierre Lannes, 2012

En dehors du secteur militaire, l'utilisation de systèmes de vision assistée pour détecter des anomalies dans les lignes de production et guider des robots industriels. Ces systèmes exploitaient des caméras et des logiciels rudimentaires pour projeter des informations critiques directement sur les machines ou les pièces concernées, bien qu'ils soient encore très limités par les capacités de calcul de l'époque (Cuitat, 2013, p.40-49).

1990 – Formalisation conceptuelle et adoption industrielle

Les années 90 marquent un tournant avec la conceptualisation et les premières applications concrètes de la RA.

En 1992, Tom Caudell et David Mizell introduisent le terme « réalité augmentée » (Cuitat, 2013, p.8), pour décrire un système utilisé chez Boeing afin de guider les techniciens dans l'assemblage complexe des câblages électriques. Ce dispositif projetait directement les instructions numériques sur les structures physiques (Azuma, 1997, p.34-36).

En 1994, Paul Milgram et Fumio Kishino proposent un continuum allant de la réalité physique complète à la virtualité totale, introduisant les concepts de « réalité augmentée », proche du réel, et de « Virtualité augmentée », proche du virtuel (Milgram, 1994, p.2-6).

En 1997, Ronald Azuma fixe les trois critères fondamentaux pour définir un système de RA. Le premier est la combinaison du réel et du virtuel. Le second est l'interactivité en temps réel. Et le dernier est l'alignement spatial précis en 3D. Ces éléments consolident la RA comme un domaine distinct de la réalité virtuelle (Azuma, 1997, p.34-36).

2000 – Explosion technologique et première application pratique.

Les avancées en calcul informatique, capteurs et système de vision permettent des progrès considérables dans de nombreux domaines, telles que l'architecture et la construction, la médecine, l'éducation et dans la démocratisation des outils.

En architecture, la RA révolutionne la conception en permettant la superposition de modèles 3D sur des sites réels, facilitant la collaboration et réduisant les erreurs de conception (Wang, 2009, p.310).

En médecine, des systèmes augmentés assistent les chirurgiens en fournissant des visualisations d'organes internes en temps réel, augmentant la précision des interventions (Azuma, 1997, p.41-43).

Dans le système éducatif, les environnements augmentés permettent l'apprentissage de gestes techniques complexes, notamment dans des domaines industriels et scientifiques (Cuitat, 2013, p.26-33).

Concernant les outils, des frameworks comme ARToolkit simplifient la création d'expériences RA, réduisant les barrières techniques et favorisant l'adoption par les développeurs (Wang, 2009, p.313)



Figure 10 - An augmented user is dragging a model from the toolbox into the mixed real and virtual model space.

2010 – Vulgarisation et adoption massive

Les smartphones équipés de caméras, gyroscope, lidar, GPS marquent une révolution dans l'accessibilité de la RA dans de nombreux domaines très différents.

Son introduction dans le loisir, notamment avec l'application « Pokémon Go » (2016), devient un phénomène mondial, démontrant la capacité de la RA à transformer des espaces physiques en environnements ludiques et interactifs. Cette application fut également le moment où la RA s'est fait connaître par le grand public (Perot, 2022, p.17).

Des dispositifs comme le Microsoft HoloLens introduisent des expériences immersives dans des secteurs comme l'architecture, avec la visualisation 3D en contexte réel, la médecine avec la formation chirurgicale, et l'industrie dans la maintenance prédictive (Perot, 2022, p.17).

Les environnements pédagogiques immersifs, soutenus par des lunettes connectées et des applications RA, favorisent un apprentissage actif et engageant (Cuitat, 2013, p.26-33).



Figure 11 - Interface de réalité augmentée de Pokémon GO montrant un Pokémon dans l'environnement réel. Source : iPhon.fr, 2017

2020 – Maturité technologique et convergence avec l'intelligence artificielle

La RA atteint un niveau de sophistication où elle devient un outil dans de nombreux secteurs, grâce à l'intégration de l'intelligence artificielle (IA).

L'IA améliore la capacité des systèmes RA à reconnaître les objets et à contextualiser les environnements, facilitant des interactions plus naturelles (Cuitat, 2013, p.19).

Les systèmes RA combinés à l'IA offrent des simulations complexes pour visualiser des processus biologiques ou entrainer des chirurgiens à des procédures spécifiques (Cuitat, 2013, p.33) (Perot, 2022, p.20).

Les expériences augmentées enrichissent les visites historiques et muséales en apportant des éléments immersifs et interactifs, intégrant des récits ou des reconstitutions visuelles en temps réel (Perot, 2022, p.19).



Figure 12 - Figure X – Expérience de réalité augmentée au musée Dalí Paris. Source : Toute La Culture, 2020.

Conclusion

En conclusion, l'évolution de la réalité augmentée révèle une trajectoire marquée par des avancées techniques, des applications novatrices et une adoption progressive dans des domaines variés, allant de l'industrie à l'éducation. Des expérimentations pionnières des années 1960 aux applications sophistiquées d'aujourd'hui, la RA a su s'imposer comme un outil incontournable pour l'interaction entre le réel et le virtuel. Son impact sur des domaines comme l'architecture, l'éducation et la médecine témoigne de son potentiel à transformer les pratiques, et à enrichir les processus d'apprentissage et de conception. En retraçant cette histoire, il devient évident que la RA, loin d'être une simple innovation technologique, s'intègre dans un continuum d'évolutions qui redéfinit la manière dont nous interagissons avec notre environnement. Ainsi, comprendre cette évolution est essentiel pour évaluer et intégrer la RA dans des domaines comme l'éducation en architecture, où elle offre des perspectives pour renforcer l'expérience pédagogique, stimuler l'interactivité, mais également la créativité des étudiants.

Dates essentielles :

1965 Développement du concept d'environnement immersif

1968 Invention du premier HMD, le « Sword of Damocles »

1978 Débuts des simulateurs de vol militaires

1992 Introduction du terme « Réalité augmentée » par Rom Caudell et David Mizell

1994 Taxonomie de la réalité augmentée par Paul Milgram et Fumio Kishino

1996 Système « KARMA », affiche des instructions augmentée pour faciliter la maintenance

1997 Définition canonique de la réalité augmentée

1999 Développement de « l'ARToolkit » par Wang et Dunston

2003 Intégration dans le secteur automobile

2004 Premiers essais en chirurgie augmentée

2006 Premières utilisations dans l'architecture pour visualiser des maquettes numériques 3D

2007 Lancement de Google Street View

2013 Lancement d'IKEA Place, application de visualisation de meuble dans son domicile

2014 Introduction des Google Glass

2016 Explosion de la RA mobile avec Pokémon Go

2017 Lancement des Microsoft HoloLens 2

2018 Lancement d'ARkit par Apple

2019 Intégration de Live View dans Google maps

2020 Convergence avec l'intelligence artificielle

2021 Facebook devient Meta et montre son intention d'investir massivement dans le Metaverse

2022 Adoption massive dans le secteur éducatif

Synthèse

L'évolution des maquettes en architecture et l'émergence des technologies immersives montrent une transformation profonde dans la manière dont les architectes conçoivent, analysent et communiquent leurs projets. Depuis l'Antiquité, les maquettes ont servi d'outils de représentation et d'expérimentation. D'abord rudimentaires et symboliques, elles sont devenues des instruments essentiels à l'ère de la Renaissance, où elles ont permis d'explorer de nouvelles formes et de tester des concepts structurels (Estévez, 2014, p. 77). Aux 18^{es} et au 19^e siècle, elles ont pris une place centrale dans la formation des architectes et dans la présentation des projets aux commanditaires (Szuta & Taraszkiewicz, 2020, p. 177-182).

Dès l'Antiquité, les maquettes remplissent un double rôle : celui de la représentation d'objets réels ou imaginaires et celui de l'anticipation des constructions futures. En Égypte ancienne, elles permettent de figurer la vie quotidienne et l'au-delà (Estévez, 2014, p. 77). En Grèce antique, les "paradeigmata" sont utilisés pour préfigurer la construction de temples et d'édifices publics (Estévez, 2014, p. 77-78).

Au Moyen Âge, leur usage reste restreint et utilitaire, visant principalement à estimer les couts de construction (Szuta, 2020, p. 177-179). La Renaissance marque une rupture avec cette approche limitée, puisque les maquettes deviennent des instruments de vérification expérimentale et d'innovation architecturale. Alberti, par exemple, met en avant leur potentiel dans la simulation de concepts structurels complexes (Estévez, 2014, p. 78-80). Au 18^e et au 19^e siècle, elles prennent un rôle pédagogique dans la formation des architectes et deviennent incontournables dans la communication des projets. (Szuta, 2020, p. 177-178).

L'avènement du 20^e siècle marque une nouvelle étape avec l'essor des mouvements modernistes. Des figures comme Le Corbusier et Ludwig Mies van der Rohe les utilisent comme outils de conception, mais aussi comme supports de communication et de diffusion de leurs idées architecturales (Quantin-Biancalani, 2020, p. 22-24). Avec la professionnalisation des maquetistes et l'essor des nouveaux matériaux, comme l'acrylique, les maquettes gagnent en réalisme et en précision (Quantin-Biancalani, 2020, p. 12). Après la Seconde Guerre mondiale, la demande pour des maquettes de plus en plus détaillées s'accroît, transformant ces objets en outils essentiels de communication et de démonstration (Quantin-Biancalani, 2020, p. 12-15).

Avec l'arrivée du numérique au 21^e siècle, les maquettes physiques sont complétées, voire remplacées dans certains cas, par des modèles 3D interactifs et des simulations informatiques, notamment à travers le BIM (Szuta, 2020, p. 177-182). Cependant, malgré ces avancées, la maquette physique conserve un rôle essentiel dans l'apprentissage et la compréhension des espaces architecturaux (Bédouret, 2020).

Les technologies immersives, notamment la réalité augmentée, offrent de nouvelles perspectives en matière de conception et de pédagogie. En permettant la superposition d'éléments virtuels sur des maquettes physiques, elles améliorent la compréhension des flux lumineux, des interactions spatiales et des évolutions temporelles des projets architecturaux (Szuta, 2020, p. 177-178). Dans le contexte académique, ces outils renforcent la collaboration et l'interaction, favorisant une meilleure exploration des concepts spatiaux et constructifs (Bédouret, 2020, p. 4-6).

En conclusion, l'évolution des maquettes en architecture démontre leur capacité d'adaptation aux progrès technologiques et aux exigences croissantes des concepteurs. Aujourd'hui, elles coexistent sous des formes physiques et numériques, permettant un dialogue entre tradition et modernité. L'intégration des technologies immersives enrichit l'usage pédagogique et pratique des maquettes, facilitant la transmission du savoir et la conception architecturale. Toutefois, leur complémentarité reste essentielle, garantissant une approche équilibrée entre matérialité tangible et innovation numérique.

Chapitre 2 : Maquette et technologies immersives

Pour mieux comprendre les enjeux soulevés par cette problématique, il est essentiel de revoir les travaux existants dans le domaine de la réalité augmentée. La section suivante présente une revue de la littérature pertinente.

Ce chapitre explore les connaissances actuelles sur l'utilisation de la réalité augmentée dans le domaine de l'architecture, avec une attention particulière portée à son application dans le contexte académique, et sur l'enrichissement des maquettes physiques. Il vise à analyser les spécificités technologiques de la RA, des dispositifs les plus simples, tels que les tablettes et smartphones, tout en mettant en lumière leur impact pédagogique et leurs limites. Cet état de l'art se sera structuré en quatre parties : la première décrira les bases technologiques de la RA, notamment les dispositifs utilisés et leur fonctionnement. La deuxième partie examinera les applications de la RA sur des maquettes dans divers domaines, tels que l'éducation, mais également dans le milieu professionnel. La troisième partie traitera de l'application des technologies de numérisations 3D. La quatrième partie traitera de l'étude d'ensoleillement dans la conception architecturale.

Réalité augmentée :

Un des textes fondateurs lorsque l'on parle de réalité mixte est l'ouvrage de Paul Milgram et Fumio Kishino « A taxonomy of Mixed Reality visual Display ». Dans cet écrit, les auteurs explorent la classification des environnements de réalité mixte et augmentée en différentes classes en mettant l'accent sur la manière dont ces systèmes mêlent des objets réels et virtuels (Milgram, 1994, p.4-6). Six classes principales sont proposées, décrivant comment ces technologies superposent des informations virtuelles au monde réel. Cette taxonomie a donc pour but d'évaluer et catégoriser ces technologies en constantes évolutions, permettant donc de positionner chaque dispositif de réalité sur un continuum (Milgram, 1994, p. 5-10).

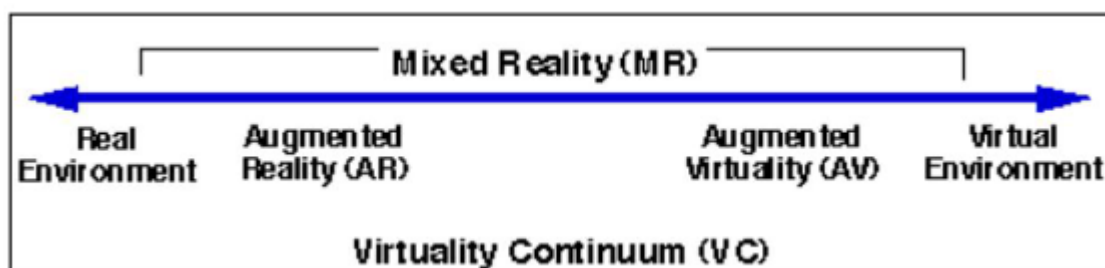


Diagramme du continuum de réalité-virtualité Source : Milgram & Kishino, 1994.

Plusieurs auteurs, tels que Steve Mann et Schnabel, viennent approfondir de manière plus récente le travail de Milgram. Les deux auteurs offrent une classification détaillée des différentes réalités. Schnabel vient définir de manière précise tous les différents types de réalités, mais également y ajouter des nouveaux (Schnabel, 2007, p.1-7). Mann, lui, vient enrichir ce travail en introduisant des réalités plus novatrices tout en apportant une perspective sur les implications techniques, philosophiques et sociétales des différents types de réalité (Mann, 2018, p.1-13). Ce dernier auteur explore également en profondeur les questions de vie privée liée à la surveillance, sous-veillance, métaveillance et dataveillance à la suite de l'utilisation des dispositifs de réalités mixte, virtuelle réalité (Mann, 2018, p.1-4).

Maquettes augmentées : Enjeux éducatifs et architecturaux

Introduction

La réalité augmentée et la réalité virtuelle transforment profondément les pratiques dans de nombreux domaines, notamment l'éducation et l'architecture. Ces technologies offrent des outils innovants pour enrichir la conception, l'apprentissage et la présentation des projets, en permettant des interactions immersives et dynamiques avec des modèles et des maquettes physiques. L'intégration de la RA et de la RV dans la conception architecturale et l'éducation favorise une meilleure compréhension des formes et de la structure, facilitant ainsi le processus d'apprentissage et de conception (Fonseca Escudero et al, 2016, p.45).

Toutefois, il existe encore des divergences sur l'efficacité et les limites de ces technologies. Certains chercheurs mettent en avant leur capacité à enrichir la compréhension spatiale et à améliorer la collaboration entre concepteurs, tandis que d'autres soulignent les défis liés à leur coût, leur accessibilité et leur intégration aux méthodes pédagogiques et professionnelles traditionnelles (Hevry et al, 2015 p.6). La question de l'intégration entre modèle physique et éléments numériques en RA est un enjeu clé, comme le démontrent les recherches de Raskar (Raskar et al, 1999, p.2) sur l'utilisation de projections lumineuses pour animer des maquettes statiques.

Réalité augmentée et virtuelle dans l'éducation architecturale.

Dans le contexte éducatif, l'intégration de la RA aux maquettes physiques permet de surmonter les limitations des outils pédagogiques traditionnels. En superposant des informations numériques sur des modèles physiques, la RA offre une visualisation interactive des concepts complexes, tels que les flux d'air, les dynamiques d'ensoleillement ou les interactions structurelles. L'utilisation de la RA dans l'apprentissage architectural a permis d'augmenter la motivation et l'engagement des étudiants ainsi que leurs résultats académiques (Fonseca Escudero et al, 2016, p.45).

Cette approche est particulièrement efficace lorsqu'elle est combinée avec des maquettes physiques, comme le démontrent les travaux de Raskar, qui utilise des projections augmentées pour enrichir ces modèles en y superposant des simulations interactives (Raskar et al, 1999). Cette méthodologie permet non seulement d'améliorer la compréhension spatiale, mais aussi d'intégrer des éléments dynamiques, telle que l'évolution des ombres au fil du temps ou les interactions avec le climat simulé.

Milovanovic démontre que l'utilisation de la réalité augmentée dans un cadre éducatif offre un outil puissant pour améliorer la compréhension et l'interaction avec les modèles architecturaux. En fournissant aux étudiants un environnement immersif où ils peuvent manipuler des maquettes numériques en temps réel, la réalité augmentée contribue à une meilleure assimilation des principes de conception. Sa recherche met en évidence que les interactions entre les étudiants et ces modèles augmentés permettent une exploration plus poussée des contraintes spatiales et structurelles, facilitant ainsi leur apprentissage et leur capacité à anticiper des solutions adaptées aux contextes de projet (Milovanovic, 2017). Toutefois, certaines limites émergent dans leur étude. L'un des défis principaux, que l'on peut également souvent retrouver avec ce type de technologies, concerne la dépendance aux infrastructures technologiques, nécessitant des équipements coûteux et un accès stable aux logiciels spécifiques. De plus, l'efficacité pédagogique de la réalité augmentée reste sujette à des variations selon les profils d'apprenants, certains éprouvant des difficultés d'adaptation à l'immersion numérique et à l'interaction avec des modèles virtuels. Enfin, l'évaluation des compétences acquises grâce à ces environnements immersifs demeure complexe, en raison du manque de cadres standardisés permettant de mesurer précisément les bénéfices pédagogiques de la RA dans l'enseignement architectural (Milovanovic, p.5-8, 2017).

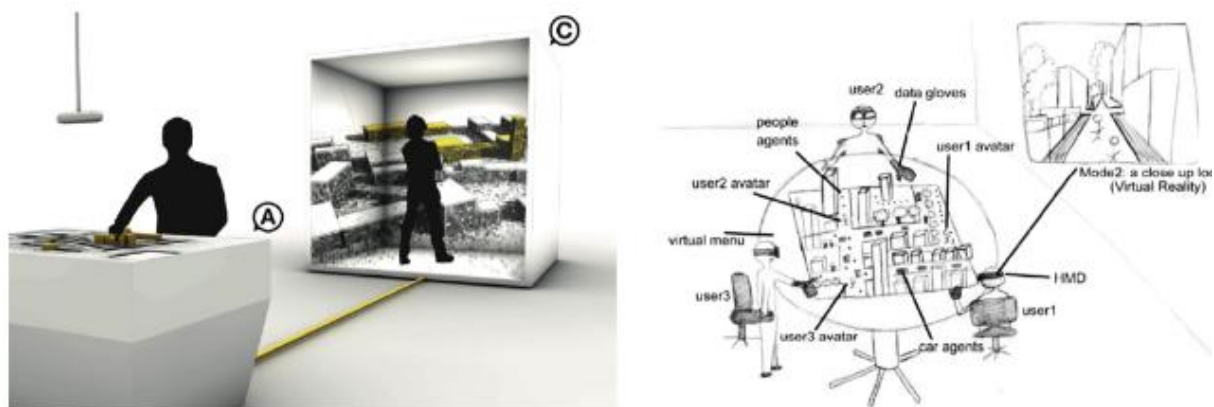


Figure 13 - - (Left) A possible CDP configuration with the augmented tabletop (A) and a CAVE (C) (source [59]) (Right) Concept of the ARU Designer project.

L'expérience immersive offerte par la RV permet aux étudiants d'interagir directement avec des environnements modélisés en trois dimensions. Contrairement aux supports traditionnels, la RV offre une perspective spatiale réaliste qui facilite la compréhension des proportions, des textures et de l'impact de la lumière (Symeonidou, 2023, p. 376). Grâce à cette technologie, les étudiants peuvent visiter des bâtiments encore en phase de conception, manipuler des éléments de design et tester différentes configurations en temps réel.

Une des principales applications de la RA et de la RV dans l'éducation architecturale est l'amélioration des compétences analytiques des étudiants. En utilisant des casques immersifs, ils peuvent, par exemple, explorer des espaces à l'échelle 1/1, ce qui permet une meilleure appréciation des relations entre les volumes et les circulations internes (Fonseca Escudero, 2016, p. 49). Cette immersion totale réduit l'écart entre la théorie et la pratique, permettant aux étudiants d'expérimenter des concepts abstraits de manière tangible.

Par ailleurs, la RV et la RA favorisent une pédagogie plus collaborative. Des plateformes telles qu'Unity Reflect et Autodesk Revit live permettent aux enseignants et aux étudiants de travailler simultanément sur un projet en temps réel, de visualiser les ajustements apportés à une maquette numérique et d'évaluer collectivement les implications de chaque modification (Calixte et Leclercq, 2017, p. 4). Cette interaction renforce la communication architecturale et améliore la capacité des étudiants à argumenter et défendre leurs choix de conception.

Dans cette dynamique, certaines recherches démontrent que ces technologies permettent de repenser l'approche pédagogique en architecture, en intégrant des simulations immersives adaptées aux scénarios d'apprentissage interactifs. Par exemple, l'utilisation de simulations basées sur la RA et la RV permet aux étudiants d'expérimenter des environnements constructifs à différentes échelles, favorisant ainsi la compréhension des interactions spatiales complexes et des contraintes de conception en temps réel (Symeonidou, 2023, p. 382).

Cependant, l'adoption de ces outils dans l'éducation présente certains défis. L'un des principaux obstacles est la nécessité d'un matériel coûteux dans le cas de la VR, et d'une infrastructure informatique puissante pour exécuter des environnements complexes en haute résolution. De plus, l'interaction avec les modèles numériques et physiques augmentés reste limitée par des contraintes ergonomiques, comme le manque de retours haptiques précis, la difficulté d'utilisation des logiciels et la fatigue cognitive induite par une immersion prolongée (Symeonidou, 2023, p. 380).

Malgré ces limitations, plusieurs études indiquent que l'intégration de ces technologies dans le cursus d'architecture améliore significativement l'apprentissage des étudiants. Elle leur permet de mieux anticiper les défis liés à la conception, d'expérimenter des approches de design innovantes, et d'interagir avec des environnements autrement inaccessibles (Fleury & Madeleine, 2007, p. 157-165). De plus, l'expérience immersive offerte par ces technologies améliore la compréhension des notions de circulation, d'échelle et de proportions, aidant les étudiants à mieux évaluer l'impact des décisions de conception avant même la construction physique des projets (Calixte et Leclercq, 2017, p. 5).

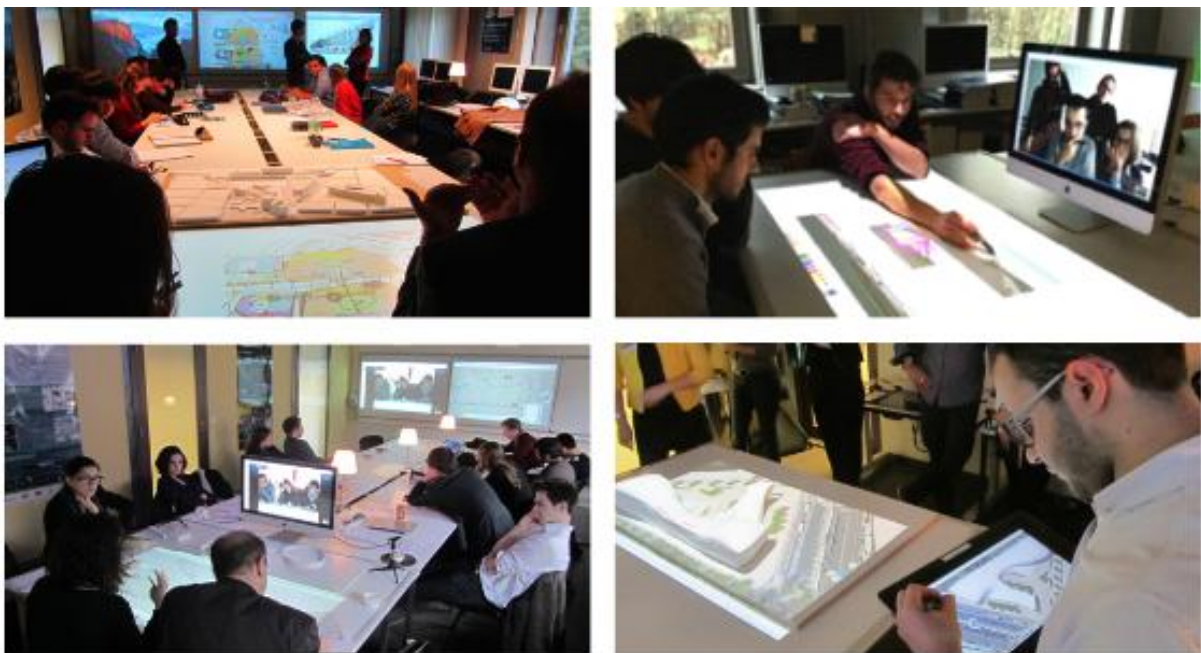


Figure 14 - Quatre configurations d'espaces collaboratifs augmentés. Source : Calixte & Leclercq, 2017.

Application de la réalité augmentée et virtuelle en architecture

L'intégration des technologies immersives, telles que la réalité augmentée et virtuelle, dans les maquettes a fait l'objet de nombreuses recherches académiques visant à optimiser la conception, la communication et la simulation de projets. Plusieurs travaux démontrent que ces technologies offrent des outils performants pour explorer des interactions complexes entre la maquette physique et les modèles numériques, améliorant ainsi la prise de décision et la collaboration entre les acteurs du projet.

L'usage de ces technologies immersives dépasse le cadre académique et se décline dans plusieurs domaines professionnels de l'architecture. La RA et la RV sont des outils puissants pour la conception, la présentation et la collaboration. La RA permet aux architectes, à leurs collaborateurs et à leurs clients de visualiser des projets de construction sous forme de modèles 3D superposés sur le site réel. Cette visualisation contextuelle améliore la compréhension des volumes et des interactions avec l'environnement existant (Wang, 2014, p. 455).

D'autre part, la RA est utilisée pour l'analyse environnementale en architecture. L'intégration de données climatiques en temps réel sur des maquettes augmentées permet d'étudier l'impact du vent, de la température et des conditions lumineuses sur une structure donnée (Kazak, 2022, p. 8). Cette approche contribue à l'optimisation des stratégies de conception bioclimatique et favorise le développement de bâtiments énergétiquement performants.

L'intégration du BIM et de la RA dans la modélisation architecturale améliore non seulement la visualisation, mais aussi la communication entre les parties prenantes d'un projet. Une étude menée par Wang montre que ces technologies permettent de réduire les erreurs de conception et d'améliorer la prise de décision en temps réel (Wang, 2014, p.457-460). Toutefois, Lornois souligne que la mise en place de ce type de technologies nécessite une formation approfondie des professionnels, ce qui peut freiner leur adoption (Lornois, 2017, p.21).

Un autre apport essentiel de la réalité augmentée concerne la communication des projets. Les maquettes augmentées permettent une visualisation plus intuitive des projets en intégrant des annotations et des simulations en temps réel. Selon Milovanovic, l'utilisation de la RA dans la conception architecturale favorise une meilleure immersion des parties prenantes en superposant des couches d'informations interactives directement sur les maquettes physiques. Cette approche permet aux architectes et aux urbanistes d'anticiper les impacts structurels et esthétiques des projets avant leur mise en œuvre effective. La réalité augmentée devient un outil pour l'interprétation des formes, des matériaux et des flux, en facilitant les ajustements nécessaires dès les premières phases de conception (Milovanovic, 2017).

L'ouvrage de Calixte vient compléter les propos de Milovanovic concernant la communication. Dans cet écrit, l'utilisation de la RA pour l'annotation de maquettes physiques est mise en avant dans cette recherche. L'étude illustre comment les annotations projetées sur des maquettes physiques facilitent la communication et la collaboration entre architectes et concepteurs. Néanmoins, ils constatent que la RA ne remplace pas totalement les supports physiques traditionnels, qui restent nécessaires pour certaines interactions tactiles et intuitives (Calixte, 2017).

Enfin, dans le domaine de la représentation urbaine et patrimoniale, des architectes comme Jean Michel Wilmotte ont démontré comment la RA peut enrichir la présentation des projets à grande échelle, en intégrant des éléments numériques dans l'environnement graphique (Carlo, 2017). D'autres chercheurs, tels que Dunstan et Wang, ont exploré l'application de la réalité mixte pour visualiser les interfaces de construction en temps réel. Leur étude révèle que l'intégration de la réalité augmentée dans les maquettes architecturales améliore la compréhension spatiale et permet une interaction plus naturelle avec les modèles tridimensionnels, ce qui facilite les prises de décisions collectives dans les projets complexes (Dunston, 2005). Certains experts, comme Greg Lynn, pointent du doigt les risques d'uniformisation des processus créatifs induits par ces outils numériques, remettant en question leur impact sur l'innovation architecturale (Lornois, 2017, p.14).

L'usage de l'AR et de la VR dépasse le cadre strict de la conception architecturale et trouve également des applications dans d'autres domaines connexes. Par exemple, dans le secteur muséographique, la réalité augmentée permet d'interagir avec des maquettes historiques en superposant des informations contextuelles et en offrant une expérience immersive aux visiteurs (Hervy, 2015, p. 6). Ces technologies présentent néanmoins des contraintes liées à une mise en œuvre des infrastructures adaptées, ce qui peut limiter leur accessibilité.



Figure 15 – L'architecte Jean-Michel Wilmotte a mêlé réalités virtuelle et augmentée pour son projet de réaménagement des vingt kilomètres séparant Paris de l'aéroport Roissy-Charles de Gaulle. WILMOTTE & ASSOCIÉS ARCHITECTES

Application de l'utilisation de maquette augmentée en architecture.

L'essor de la réalité augmentée dans le domaine de l'architecture a conduit à de nombreuses expérimentations visant à démontrer son potentiel dans la conception et la représentation des projets architecturaux. L'intégration des maquettes augmentées permet non seulement d'améliorer la perception spatiale et matérielle des structures, mais aussi de faciliter la communication entre concepteurs et parties prenantes. Ce paragraphe propose une analyse approfondie de projets ayant marqué l'évolution de l'architecture augmentée, en illustrant comment ces outils ont contribué à enrichir la compréhension des espaces bâtis et à optimiser le dialogue entre les acteurs du projet.

Coop Himmelb(l)au est un bureau d'architecture innovante qui intègre la réalité augmentée dans ses méthodologies de conception. Leur approche « Deep Himmelblau » repose sur l'exploration d'environnements interactifs où la superposition de volumes numériques sur des maquettes physiques permet une meilleure compréhension des interactions spatiales. Grâce à la réalité augmentée, les architectes peuvent tester diverses configurations et affiner leurs projets en ajustant les paramètres structurels en temps réel (Himmelb(l)au, « Method »).

De plus, ce bureau utilise la réalité augmentée pour faciliter la communication et la présentation de ses projets en impliquant activement les parties prenantes. Le recours aux maquettes augmentées permet aux clients et aux décideurs de naviguer à travers des environnements interactifs, favorisant ainsi une meilleure appréhension des choix architecturaux et urbains ([Coop Himmelblau](#), 2025).

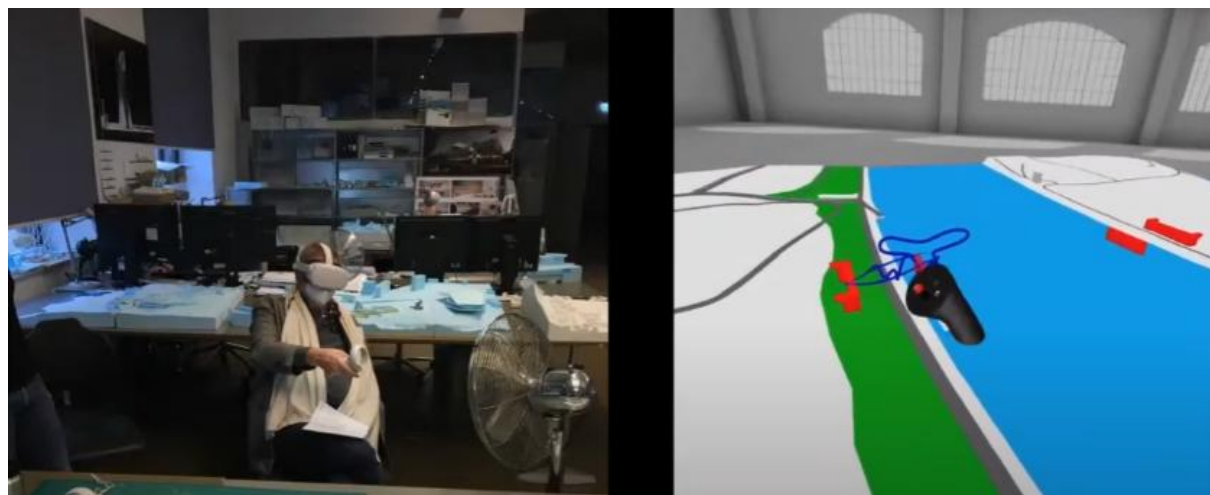


Figure 16 - Interaction immersive avec une maquette urbaine en réalité virtuelle. Source : Coop Himmelb(l)au, 2022.

Dans cette continuité, leurs expérimentations récentes montrent comment la superposition d'environnements simulés aux structures physiques améliore l'optimisation des flux et des formes architecturales. Ces techniques permettent de tester plusieurs configurations en temps réel, apportant une flexibilité aux phases de conception (Himmelblau, « Deep Himmelblau »).

Les avancées technologiques récentes permettent une intégration accrue des maquettes augmentées dans le processus architectural. L'utilisation du Microsoft HoloLens dans des environnements architecturaux immersifs améliore la visualisation des structures et des matériaux en offrant aux concepteurs une interaction en temps réel avec les modèles numériques. Leur étude montre que la réalité augmentée permet de contextualiser les projets en superposant des modèles 3D aux environnements physiques existants, facilitant ainsi l'évaluation des proportions, des textures et des impacts environnementaux (Hockett et Ingleby, 2016).

Plusieurs projets de renom ont illustré l'intérêt de la RA dans la conception et la médiation architecturale. Le projet « Augmenting the Invisible » de Jakob et MacFarlane, présenté dans le cadre d'Agora Bordeaux, démontre comment la superposition d'informations numériques invisibles à l'œil nu peut enrichir la perception architecturale. Cette technologie permet aux visiteurs et aux professionnels d'explorer des éléments structurels habituellement imperceptibles, offrant ainsi une lecture plus fine des interactions spatiales et matérielles (Agora Bordeaux, 2017).



Figure 17 - Installation "Augmenting the Invisible", Agora Bordeaux. Source : Agora Bordeaux, 2023.

Un autre exemple significatif est celui de Greg Lynn à la Biennale de Venise en 20016, où il a utilisé Microsoft HoloLens pour transformer l'expérience de la maquette physique. Grâce à la RA, les visiteurs ont pu interagir avec les modèles physiques. Grâce à la réalité augmentée, les visiteurs ont pu interagir avec les modèles architecturaux, explorer différentes perspectives et modifier certains paramètres en temps réel. Cette approche a permis une immersion complète dans l'évolution des projets et une meilleure appréhension des volumes et de leur impact dans l'espace urbain (Frearson, 2016).

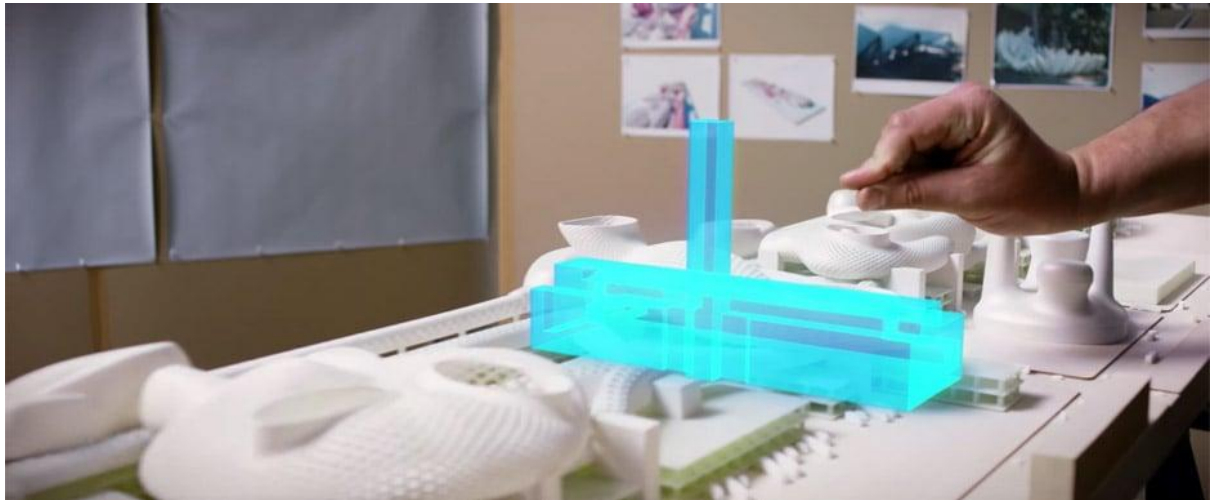


Figure 18 - Greg Lynn utilise le Microsoft HoloLens pour augmenter des maquettes architecturales dans une exposition de la Biennale de Venise.

Enfin, la maquette augmentée du Mont-Saint-Michel, bien que cela ne soit pas directement lié à l'architecture, constitue un exemple remarquable d'application de la RA dans la médiation patrimoniale. Ce projet combine une maquette physique avec des données numériques interactives, permettant aux visiteurs d'explorer les différentes étapes d'évolution du site à travers les siècles. La RA permet ainsi de comprendre les transformations architecturales et les enjeux de préservation du monument en intégrant une approche pédagogique immersive (Paule, 2019).

Ces exemples illustrent l'impact croissant de la RA et de la RV dans les pratiques architecturales contemporaines. En facilitant la visualisation et la communication des projets, ces technologies permettent une exploration plus poussée des concepts et améliorent la collaboration entre les différents acteurs du projet. Leur adoption à grande échelle pourrait ainsi transformer les méthodes de conception et de présentation en architecture.

Conclusion

L'intégration de la réalité augmentée et de la réalité virtuelle dans les pratiques architecturales et éducatives ouvre de nouvelles perspectives en matière de conception, d'apprentissage et de médiation. Ces technologies favorisent une approche plus intuitive et interactive de l'architecture, améliorant ainsi la communication et la compréhension des projets. Toutefois leur démocratisation implique des défis techniques, financiers et méthodologiques qu'il convient de résoudre pour assurer leur pleine intégration dans les pratiques actuelles. Des recherches complémentaires sont nécessaires pour évaluer leur impact à long terme et optimiser leur mise en œuvre dans le processus de conception et de formation en architecture.

L'utilisation des technologies de numérisation 3D pour la modélisation des maquettes architecturales : avancées et perspectives.

Introduction

L'intégration des technologies de numérisation 3D dans les domaines de l'architecture et de la conservation du patrimoine a profondément modifié les méthodes de documentation, d'analyse et de restitution des objets architecturaux. Grâce à des avancées significatives en matière de scan laser 3D, de photogrammétrie, et d'applications de numérisation mobile, il est désormais possible de capturer la réalité physique avec précision et rapidité. Toutefois, ces technologies posent également des défis techniques et méthodologiques, notamment en ce qui concerne l'intégration des modèles générés dans des workflows de conception numérique et leur exploitation à grande échelle. L'objectif de cette section est de comprendre les approches existantes, en mettant en évidence les atouts, les limites et les manquements de ces méthodes, ainsi que les enjeux liés à leur adoption dans la modélisation numérique de maquettes architecturales.

Approches de numérisation 3D appliquées aux maquettes architecturales.

L'étude de Lo Buglio met en lumière les enjeux liés à la transformation des relevés 3D en modèles exploitables et interprétables dans un cadre patrimonial. L'auteur souligne que la modélisation numérique interactive et évolutive repose sur des processus de segmentation et de caractérisation sémantique, permettant d'ajouter des annotations informatives aux modèles architecturaux (Lo Buglio, 2012, p.7). Cette approche complète les recherches antérieures sur la photogrammétrie et le Scan-To-BIM en insistant sur l'importance d'une structuration cohérente des modèles afin d'améliorer leur intelligibilité et leur exploitation dans divers contextes, allant de la préservation patrimoniale à la conception architecturale avancée (Macher, 2017).

Une des avancées majeures de cette transition repose sur les capacités des maquettes numériques à offrir une visualisation dynamique, facilitant ainsi l'analyse spatiale et chronologique des structures étudiées. Contrairement aux maquettes statiques traditionnelles, les modèles numériques permettent une immersion accrue et une mise à jour continue des hypothèses architecturales (Fleury, 2016). Cette numérisation ouvre également de nouvelles perspectives pour la documentation et la recherche historique, permettant la superposition de différentes phases architecturales et facilitant la transmission du savoir auprès d'un plus large public.

L'évolution des technologies de numérisation a favorisé l'émergence de techniques hybrides combinant plusieurs approches afin d'optimiser la précision et l'efficacité des relevés tridimensionnels. Le Scan-to-BIM, qui représente la transformation de nuages de points en maquette numérique, est un exemple significatif de cette évolution. Il repose sur trois étapes fondamentales : la modélisation géométrique l'assignation de propriétés et l'établissement des relations entre les différents éléments (Marcher, 2017, p.28). Ce processus, largement documenté, permet d'intégrer les modèles numériques dans des logiciels de conception assistée par ordinateur.

La recherche de Laroche enrichit ces travaux en mettant en avant l'importance de la modélisation virtuelle et de l'impression 3D dans la conservation patrimoniale. Cette étude démontre que l'intégration d'une haute-fidélité dans la reproduction des détails architecturaux est cruciale pour garantir une préservation optimale (Laroche, 2017). En outre, ces méthodes permettent de tester différentes hypothèses de reconstruction, contribuant ainsi à une approche plus scientifique et itérative dans l'étude des structures anciennes.

Comparaison des technologies de numérisation

Le scan laser 3D demeure l'une des méthodes les plus précises pour la capture géométrique des objets architecturaux. Cette technologie de télédétection active repose sur l'émission d'un faisceau laser qui balaye la surface de l'objet afin de mesurer les distances avec une précision millimétrique. Cette approche produit un nuage de points dense, facilitant la reconstruction détaillée des modèles numériques (Marcher, 2017, p.23-32).

Parallèlement, la photogrammétrie constitue une alternative largement utilisée, reposant sur l'acquisition d'un ensemble d'images sous divers angles, couplée à des algorithmes de vision par ordinateur permettant de générer un modèle tridimensionnel. Cette méthode se distingue par sa capacité à capturer les textures et les matériaux avec un degré de réalisme élevé (Jacquot, p.3-7, 2020). Toutefois, Ralph, dans sa recherche, suggère que des algorithmes d'analyse avancés pourraient être exploités dans ces processus afin d'améliorer la reconnaissance automatique des textures et matériaux, optimisant ainsi la fidélité des modèles numériques (Ralph, 2019).

L'essor des applications mobiles de numérisation 3D, telles que Scaniverse et Polycam, a permis d'élargir l'accessibilité aux technologies de modélisation tridimensionnelle. Contrairement aux scanners laser fixes et aux méthodes de photogrammétries avancées, ces applications offrent une alternative peu coûteuse et simple d'utilisation, permettant la capture rapide d'objets et de maquettes en trois dimensions à l'aide de capteurs intégrés aux smartphones. Bien que ces outils ne puissent rivaliser avec la précision millimétrique des scanners professionnels, ils offrent néanmoins une solution viable pour des applications nécessitant une reconstruction approximative et rapide (Marcher, 2017, p.23-25).

L'aspect économique de la numérisation 3D est un facteur clé à considérer dans son adoption à grande échelle. En effet, le coût des scanners professionnels reste un frein majeur pour les petites structures ou les projets à budget limité. Selon une étude, le prix des scanners 3D varie considérablement en fonction des performances et de la précision recherchées, allant de 5 000 € à plus de 70 000 € pour les modèles industriels de haute précision (Lansard, 2024). Cette contrainte budgétaire justifie l'essor des solutions mobiles de numérisation, qui offrent une alternative plus abordable, bien que leur exactitude et leur résolution restent en deçà des standards requis pour des applications exigeantes.

Par ailleurs, les coûts énergétiques liés à ces technologies sont également à prendre en compte. La puissance de calcul nécessaire pour traiter des nuages de points massifs et les modèles haute résolution représente une consommation énergétique significative. Les stations de travail dédiées à la modélisation 3D consomment en moyenne 30 à 50% d'énergie en plus que des postes informatiques classiques, un impact non négligeable dans une optique de durabilité (Darbari, 2024). Cette étude met en évidence la nécessité d'optimiser les algorithmes de traitement et de compression afin de minimiser l'empreinte énergétique de ces technologies.

Malgré ces avancées, un manque d'intégration dans la conception architecturale persiste. Les modèles numérisés sont encore principalement utilisés pour la documentation et la conservation, plutôt que pour la génération de nouvelles formes architecturales. Plusieurs freins sont identifiés : d'une part, la complexité du traitement des nuages de points, qui rend difficile leur conversion en modèles paramétriques exploitables dans les logiciels BIM ; d'autre part, l'absence d'une interopérabilité fluide entre les outils de numérisation et les plateformes de conception (Darbari, 2024).

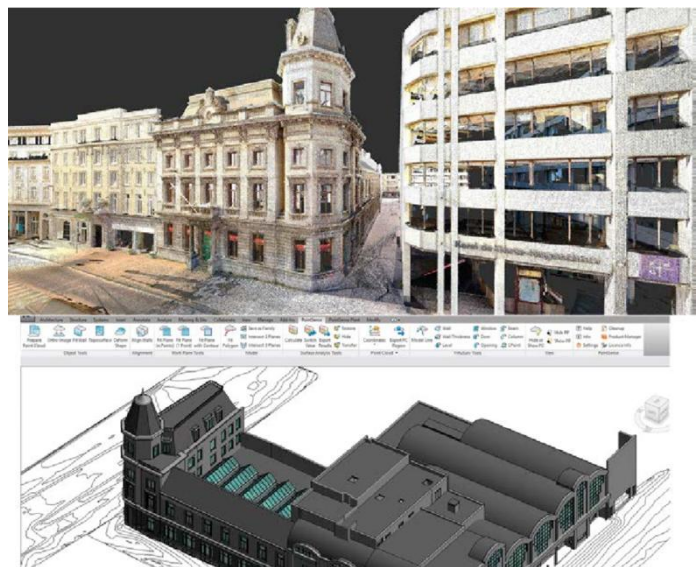


Figure 19 - Passage d'un relevé au scanner laser à une modélisation BIM. Source : Dubois, Vanhellemont & De Bouw, Buildwise.

Conclusion et perspective

Malgré les avancées, un manquement majeur persiste quant à l'utilisation de ces technologies dans la conception architecturale. Si les méthodes de numérisation 3D ont largement démontré leur efficacité dans la conservation du patrimoine et la modélisation de maquettes existantes, leur intégration en tant qu'outil de conception reste encore limitée.

L'exploitation des modèles numérisés pour générer de nouvelles formes architecturales ou optimiser les processus de conception dans un environnement BIM demeure un champ sous-exploré. Une meilleure articulation entre les outils de numérisation et les logiciels de conception paramétrique pourrait ouvrir de nouvelles perspectives pour les architectes, en facilitant une approche plus itérative du design architectural.

Néanmoins, l'intégration des technologies de numérisation 3D dans l'architecture constitue une avancée majeure pour la documentation et la valorisation des maquettes architecturales (Renaud, 2016). Toutefois, Laroche, dans son écrit, met en avant la nécessité de combiner la numérisation à des stratégies de conservation physique afin de garantir une préservation optimale des structures (Laroche, 2017).

Enfin, Iuliano compare diverses technologies de numérisation optique et met en lumière les critères essentiels pour le choix des dispositifs en fonction des exigences de précision et des contraintes budgétaires (Iuliano, 2005). L'évolution des capteurs et des algorithmes de reconstruction automatique ouvre des perspectives pour une adoption plus large de ces technologies, notamment dans le domaine de la modélisation et la conservation du patrimoine architectural.

Ces analyses montrent que l'amélioration continue des techniques de numérisation et des méthodologies de traitement des données est essentielle pour maximiser leur impact dans le domaine de l'architecture. L'intégration progressive des nouvelles technologies, telles que l'intelligence artificielle et la réalité augmentée, pourrait contribuer à une modélisation encore plus précise et accessible du patrimoine bâti.

L'étude de l'ensoleillement dans la conception architecturale.

L'ensoleillement constitue un paramètre fondamental dans l'élaboration des stratégies architecturales contemporaines, en raison de ses implications sur la perception des espaces, la performance énergétique des bâtiments et le bien-être physiologique des occupants (Leslie, 2003, p. 381-385). Une approche optimisée de la lumière naturelle permet non seulement de réduire la dépendance aux sources artificielles d'éclairage, mais également de renforcer l'interaction entre le bâti et son environnement climatique (Kwok, 2018, p.43-47). Ainsi, il est essentiel de comprendre les principes qui régissent l'ensoleillement et de les traduire en solutions architecturales adaptées, afin de garantir une conception durable qui optimise à la fois l'éclairage naturel et l'efficacité énergétique des bâtiments.

Les avancées technologiques et les recherches récentes en physique du bâtiment permettent aujourd'hui une approche plus précise de la gestion de la lumière naturelle (Steane, 2012, p.1-10). L'utilisation des logiciels de simulation, des modélisations 3D et des capteurs intelligents a considérablement amélioré la capacité des concepteurs à optimiser l'éclairage naturel tout en minimisant ses impacts négatifs (Fisher, 2011). De plus, les enjeux environnementaux et énergétiques conduisent à repenser les approches traditionnelles en matière d'éclairage naturel, favorisant ainsi l'intégration de stratégies plus efficaces et durables. Une approche systémique, associant innovation technologique et réflexion architecturale, est préconisée.

La lumière naturelle comme élément structurant de l'architecture

L'architecture a historiquement mobilisé la lumière naturelle comme vecteur de spatialité et de matérialité. Steane met en évidence la manière dont les architectes du XXe siècle ont intégré la lumière naturelle non seulement comme facteur fonctionnel, mais aussi comme un élément générateur de formes et de perception (Steane, 2012 p.1-10). De façon similaire, Fisher et Steane soulignent que l'éclairage naturel ne se limite pas à une fonction compensatoire de l'éclairage artificiel, mais qu'il participe activement à la définition de l'expérience architecturale et à la modulation des ambiances spatiales (Fisher, 2011, 377-379).

L'importance de la lumière naturelle dépasse ainsi la seule question de l'éclairement, et influence des aspects, tels que la perception de l'espace, la mise en valeur des textures et des matériaux, ainsi que la modulation de l'ambiance selon l'heure de la journée et la saison. Les travaux de Le Corbusier illustrent cette intégration consciente de la lumière



Figure 20 - Ouverture zénithale en croix, chapelle Notre-Dame-Du-Haut à Ronchamp. Source : Gough, 2011.

comme outil de composition architecturale, notamment dans des réalisations telles que la chapelle de Ronchamp, où la lumière devient un élément sculptural participant à l'expérience sensorielle du visiteur (Steane, 2012, p.1-10). Par ailleurs, les différentes traditions architecturales à travers le monde ont développé des stratégies spécifiques pour optimiser la lumière naturelle, des moucharabiés orientaux aux patios andalous, démontrant une adaptation contextuelle fine de l'ensoleillement (Fisher et Steane, 2011, p.377-379).

En outre, l'intégration de la lumière naturelle dans la conception architecturale ne se limite pas à des considérations esthétiques, mais revêt également une dimension écologique et énergétique. L'intégration de la lumière naturelle permet d'améliorer les performances thermiques des bâtiments en réduisant la consommation d'énergie liée au chauffage et à l'éclairage naturel (Leslie, 2003, p.381-385). À travers des dispositifs tels que les façades à double peau, les puits de lumière et les systèmes de réflexion passive, la lumière du jour peut être utilisée comme un outil de régulation thermique, favorisant ainsi un équilibre entre confort visuel et efficacité énergétique (Kow, 2018, p.43-47). Cette approche, de plus en plus adoptée, s'inscrit dans une perspective de développement durable et de réduction de l'empreinte carbone des constructions contemporaines (Steane, 2012, p.1-10).

Approches et stratégies d'intégration de la lumière naturelle

L'optimisation, de l'ensoleillement, repose sur des stratégies architecturales spécifiques qui visent à maximiser l'apport lumineux tout en minimisant les effets indésirables, tels que l'éblouissement ou la surchauffe. Leslie (2003) met en avant plusieurs leviers essentiels, notamment l'orientation du bâti selon un axe est-ouest, l'aménagement des espaces de travail en périphérie, l'utilisation de matériaux réfléchissants et la mise en œuvre de dispositifs de captation de la lumière tels que les puits de lumière (Leslie, 2003). Parallèlement, Kwok et Grondzik (2018) insistent sur la nécessité d'intégrer ces stratégies dès les phases initiales de la conception architecturale, afin d'assurer une adéquation optimale entre les performances énergétiques et les qualités spatiales (Kwok et Grondzik, 2018, p.43-47).



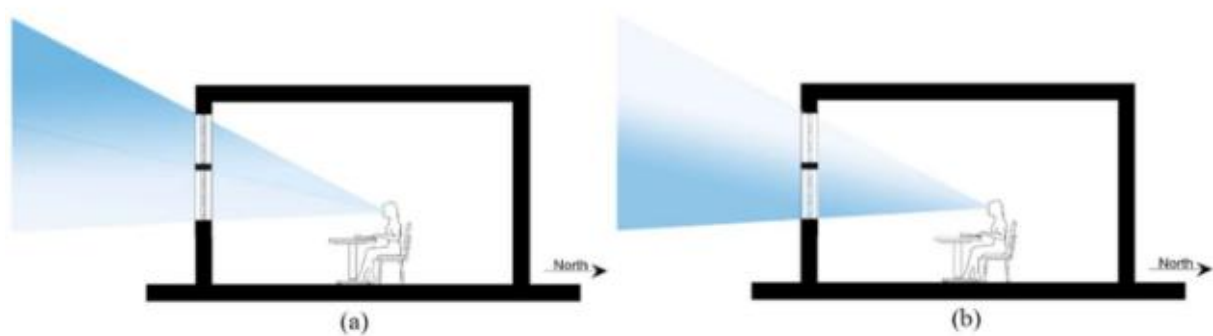
Figure 21 - Light shelves dans une salle de classe du Lillis Business Complex, Oregon. Source : Kwok & Grondzik, 2018.

Des stratégies complémentaires incluent également l'utilisation de surfaces réfléchissantes, le contrôle dynamique de la lumière à l'aide de stores et de brise-soleils orientaux, ainsi que l'optimisation de la profondeur des espaces pour maximiser la pénétration lumineuse (Kwok et Grondzik, 2018, p.43-50). Les avancées en matière de vitrages intelligents, qui permettent d'adapter la transparence en fonction des conditions lumineuses extérieures, ouvrent également de nouvelles perspectives dans la gestion de l'ensoleillement architectural (Kwok et Grondzik, 2018, p.43-50). En outre, l'intégration des toitures végétalisées et des systèmes de réflexion indirecte de la lumière naturelle offre de nouvelles opportunités pour améliorer l'éclairage des espaces tout en réduisant les gains thermiques excessifs (Leslie, 2003, p.381-385).

Ensoleillement et confort visuel : enjeux et méthodologies d'évaluation.

La lumière joue un rôle crucial dans la régulation du cycle circadien humain, influençant ainsi la qualité du sommeil, la concentration, et le bien-être général. Alkhatatbeh (2021) souligne que l'exposition à une lumière naturelle adaptée aux rythmes biologiques permet d'améliorer la synchronisation du cycle circadien, réduisant les troubles du sommeil et favorisant une meilleure productivité dans les environnements de travail (Alkhatatbeh, 2021, p.1-5). L'architecture contemporaine intègre de plus en plus cette donnée en optimisant l'orientation des ouvertures et en utilisant des dispositifs dynamiques capables d'adapter l'intensité lumineuse en fonction des moments de la journée.

L'intégration de la lumière naturelle doit répondre aux impératifs du confort visuel des usagers, sous peine d'induire des conditions d'éclairage non maîtrisées susceptibles d'affecter leur bien-être. Hazif (2015) propose différentes méthodologies d'évaluation du confort visuel, notamment à travers des outils de simulation numérique qui permettent d'anticiper les phénomènes d'éblouissement et d'ajuster les stratégies d'éclairage en conséquence (Hafiz, 2015, p.1-8). Alkhatatbeh (2021) introduit quant à lui une perspective circadienne, mettant en avant l'impact de la lumière sur les rythmes biologiques humains et suggérant une conception lumineuse favorisant une synchronisation optimale entre l'éclairage naturel et les besoins physiologiques des occupants (Alkhatatbeh et Asadi, 2021, p.12-18).



L'évaluation du confort visuel repose sur des critères quantifiables, tels que l'uniformité de l'éclairement, le contraste lumineux et l'angle d'incidence de la lumière (Hafiz, 2015, p.1-8). L'utilisation de maquettes physiques et de capteurs photométriques permet d'affiner ces analyses en conditions réelles et d'optimiser les choix architecturaux en conséquence (Cuttle, 2007, p.32-34). L'adoption de normes internationales, telles que celles développées par la Commission internationale de l'éclairage (CIE), contribue également à l'élaboration de standards rigoureux garantissant un éclairage optimal pour chaque type d'espace.

Performance énergétique et lumière naturelle

L'optimisation de la lumière naturelle en architecture s'inscrit dans une démarche de réduction de la consommation énergétique, en diminuant la dépendance à l'éclairage artificiel et en régulant les apports thermiques internes. Kaheneko (2021) met en exergue les bénéfices de ces stratégies, soulignant leur rôle dans l'amélioration du confort thermique passif et la réduction de l'empreinte carbone des bâtiments (Kaheneko, 2021, p.43-50). De plus, Negarestan (2025) montre que la lumière naturelle a un effet direct sur la santé mentale des occupants, ce qui conforte la nécessité d'intégrer une approche humaniste dans la conception des espaces architecturaux (Negarestan, 2025, p.66-76).

Dans une perspective de durabilité, l'intégration de solutions telles que les façades ventilées et les doubles peaux vitrées permettent d'optimiser l'apport en lumière tout en régulant les transferts thermiques (Kwok et Grondzik, 2018, p.43-50). Ces dispositifs offrent un compromis efficace entre apport lumineux et performance énergétique, tout en favorisant une meilleure adaptabilité aux variations climatiques. L'intégration de solutions avancées dans les enveloppes architecturales permet d'optimiser les performances thermiques et lumineuses des bâtiments. Diverses technologies et matériaux innovants sont explorés pour améliorer le confort thermique et la gestion de la lumière naturelle, notamment les doubles peaux vitrées et les vitrages intelligents (Kwok et Grondzik, 2018, p.43-50).

Outils d'analyse de l'ensoleillement : simulation et réalité augmentée

L'étude de l'ensoleillement en architecture bénéficie aujourd'hui de nombreux numériques permettant d'analyser avec précision la répartition de la lumière naturelle au sein des espaces construits. Parmi ces outils, les maquettes physiques couplées de dispositifs de simulation solaire constituent une méthode éprouvée pour évaluer l'impact des ombres portées, de la réflexion lumineuse et des variations saisonnières. En exposant une maquette à une source lumineuse mobile, il est possible d'observer dynamiquement les effets de l'ensoleillement et d'optimiser en conséquence l'orientation et la morphologie des ouvertures (Cuttle, 2007, p.32-34).

Cependant, les avancées en réalité augmentée et en simulation numérique offrent désormais des alternatives plus immersives et précises. Par exemple, des outils comme RadVR permettent d'analyser en immersion 3D l'impact de l'éclairage naturel en intégrant des paramètres physiques précis sur la diffusion et la réflexion de la lumière (Keshavarzi, 2021, p.15-20). Ces technologies permettent aux concepteurs d'explorer des scénarios d'éclairage à différentes heures et saisons, facilitant ainsi la prise de décisions informées en amont du projet. L'intégration de ces outils dans les processus de conception architecturale ouvre la voie à des stratégies d'optimisation plus flexibles et adaptées aux besoins spécifiques de chaque espace.

Un autre outil largement utilisé dans l'analyse de l'éclairage naturel est DIALux, un logiciel permettant de simuler précisément la répartition de la lumière en intérieur et en extérieur. Ce logiciel est particulièrement apprécié pour sa capacité à modéliser différents scénarios d'ensoleillement en fonction de

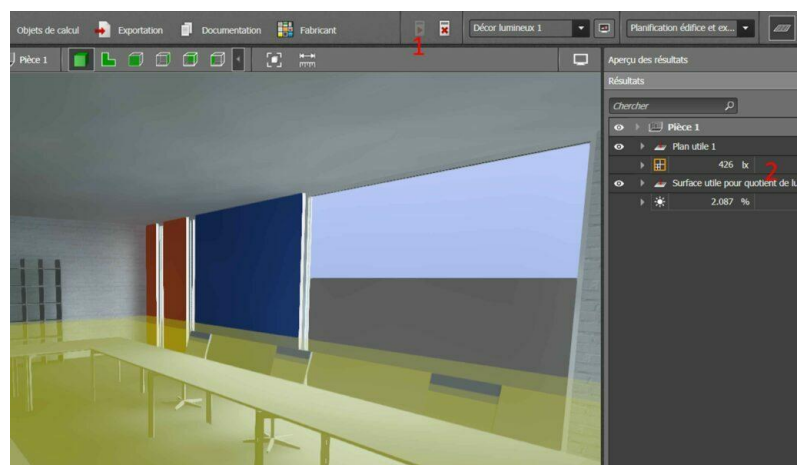


Figure 22 - Simulation d'éclairage naturel dans DIALux evo avec indicateurs d'éclairement. Source : Light ZOOM Lumière, 2019.

la localisation géographique du projet, des matériaux utilisés et de la présence éventuelle d'obstacles limitant la pénétration de la lumière (Barrachina, 2023). DIALux permet ainsi de

générer des analyses quantitatives sur l'intensité lumineuse et les ombres portées, facilitant l'optimisation des performances énergétiques et du confort visuel. En outre, il offre une compatibilité avec les normes internationales d'éclairage, garantissant ainsi une intégration efficace des exigences en matière d'ensoleillement et de qualité lumineuse dans les projets architecturaux (Barrachina, 2023).

Conclusion

L'exploitation maîtrisée de l'ensoleillement en architecture requiert une approche systémique intégrant à la fois des considérations esthétiques, techniques et physiologiques. La conception bioclimatique des bâtiments, en tenant compte des conditions climatiques locales, des caractéristiques des matériaux et des exigences en matière de confort visuel, permet d'optimiser l'apport de lumière naturelle tout en atténuant ses effets négatifs. Cette approche pluridisciplinaire suppose une collaboration étroite entre architectes, ingénieurs en environnement et spécialistes du confort lumineux, afin d'assurer l'intégration efficace et durable des stratégies d'éclairage naturel.

Les recherches futures devront approfondir l'impact psychologique et physiologique de la lumière naturelle, tout en explorant des solutions architecturales innovantes permettant une gestion plus flexible et adaptative de l'ensoleillement en milieu urbain et en contexte de densification spatiale.

Synthèse

L'intégration des technologies immersives dans l'architecture repose sur plusieurs aspects clés. Tout d'abord, la superposition d'informations dynamiques permet aux étudiants et aux professionnels d'examiner des paramètres complexes, comme l'ensoleillement, les flux piétons et les interactions spatiales en temps réel (Dunston & Wang, 2005). Ensuite, l'interactivité qu'offre la réalité augmentée permet de manipuler les modèles directement, modifiant les matériaux, ajustant les proportions et testant divers scénarios de conception (Tuzun Canadinc, 2022). Par ailleurs, ces technologies facilitent la collaboration entre les étudiants eux-mêmes et avec leurs enseignants, rendant les idées plus accessibles et compréhensibles (Chopin, 2020).

Un des textes fondateurs sur ces technologies immersives est l'ouvrage de Milgram et Kishino, qui établissent une classification des environnements de réalité augmentée et virtuelle selon leur degré d'interaction avec le monde réel (Milgram, 1994, p. 4-6). Cette taxonomie permet d'évaluer les dispositifs immersifs selon leur capacité à superposer des éléments virtuels sur des structures physiques. Les travaux de Schnabel et Mann viennent compléter cette approche en ajoutant de nouvelles catégories de réalités numériques et en explorant les implications philosophiques et sociétales de ces technologies (Schnabel, 2007, p. 1-7) ; (Mann, 2018, p. 1-13).

Les études menées par Milovanovic montrent que l'utilisation de la réalité augmentée dans les cursus d'architecture favorise une meilleure assimilation des principes de conception grâce à l'interaction avec des modèles augmentés (Milovanovic, 2017, p. 5-8). Cependant, plusieurs limites sont identifiées, notamment la dépendance aux infrastructures technologiques et la nécessité d'un matériel coûteux. De plus, la standardisation de l'évaluation des compétences acquises dans un environnement immersif reste un défi majeur (Milovanovic, 2017, p. 5-8).

L'expérience immersive offerte par la réalité virtuelle permet également une interaction en temps réel avec des environnements tridimensionnels. Symeonidou met en évidence le rôle de la RV dans l'amélioration des compétences analytiques des étudiants en architecture, en leur permettant d'explorer des espaces à l'échelle 1/1 et d'expérimenter des configurations de conception en immersion totale (Symeonidou, 2023, p. 376). Cependant, ces outils nécessitent un matériel coûteux et une infrastructure informatique avancée pour fonctionner efficacement, Symeonidou, 2023, p. 380).

Les maquettes augmentées tendent à révolutionner les pratiques architecturales en combinant les atouts des maquettes physiques avec les capacités interactives du numérique. Grâce à la réalité augmentée, elles permettent d'enrichir l'expérience visuelle et spatiale des projets en superposant des informations dynamiques aux modèles physiques existants. Cette technologie favorise la compréhension des interactions structurelles et des contraintes environnementales, tout en facilitant l'adaptation des conceptions en fonction des besoins des utilisateurs et des données en temps réel.

En milieu professionnel, certaines agences utilisent les maquettes augmentées comme élément clé dans la communication, la conception et la prise de décision. Elles permettent aux architectes d'interagir directement avec les modèles, en testant différentes configurations et matérialités avant la mise en œuvre réelle. L'agence autrichienne, Coop Himmelb(l)au a développé le concept Deep Himmelblau, où la réalité augmentée est utilisée pour superposer des volumes numériques sur des maquettes physiques. Cette approche interactive favorise une meilleure collaboration entre les équipes de conception et renforce la flexibilité du processus architectural (Himmelb(l)au, 2025).

Greg Lynn a démontré lors de la Biennale de Venise comment la RA peut enrichir l'expérience immersive d'une maquette physique. En utilisant Microsoft Hololens, les visiteurs pouvaient interagir avec des modèles architecturaux virtuels, explorer différentes perspectives et modifier certains paramètres en temps réel, permettant une immersion complète dans l'évolution des projets et une meilleure appréhension des volumes et de leurs impacts urbains.

En revanche, dans le registre patrimonial, la maquette augmentée du Mont-Saint-Michel intègre des données numériques interactives sur une maquette physique, permettant aux visiteurs d'explorer l'évolution historique du site et de comprendre ses transformations architecturales dans leur contexte historique et environnemental (Paule, 2019). Ces réalisations illustrent comment les maquettes augmentées combinent expérimentation, communication et médiation patrimoniale. Elles favorisent une meilleure compréhension des projets architecturaux et urbains en offrant une exploration interactive et immersive aux professionnels comme au grand public.

L'un des aspects les plus prometteurs de ces innovations est leur capacité à améliorer la visualisation et la simulation avancée des projets. La RA permet de projeter des maquettes physiques dans un contexte virtuel enrichi, offrant une perception plus précise des interactions entre l'architecture et son environnement (Wang, 2009, p. 310). De plus, elle favorise une prise de décision plus éclairée en intégrant des simulations de conditions réelles, comme l'éclairage naturel, la ventilation et l'impact des matériaux (Kazak, 2022). Enfin, la flexibilité qu'offre la RA permet une mise à jour constante des projets sans avoir à reconstruire physiquement les maquettes (Fleury, 2016).

Grâce aux technologies de scan laser et de photogrammétrie, il est possible de capturer avec précision des modèles réduits et de les convertir en représentations numériques exploitables. Cette démarche permet aux architectes d'affiner leurs conceptions en intégrant ces maquettes numérisées dans des outils de modélisation avancée, comme le BIM, améliorant ainsi l'analyse structurelle et les simulations de conception (Marcher, 2017, p. 28). L'utilisation de la numérisation 3D offre une meilleure interopérabilité entre les différentes phases du projet. En combinant les données scannées avec des logiciels de simulation, les professionnels peuvent tester en amont l'impact des choix architecturaux sur l'éclairage et la matérialité. Cette technologie contribue à réduire les erreurs de conception en offrant une visualisation plus détaillée. Cependant, ces procédés nécessitent des équipements spécialisés et un traitement complexe des données, ce qui représente un défi en termes de coût et d'accessibilité.

L'ensoleillement est un paramètre essentiel dans la conception architecturale, influençant à la fois les performances énergétiques des bâtiments et la qualité des espaces intérieurs. L'utilisation de la réalité augmentée et de la simulation numérique permet d'analyser précisément l'impact de la lumière naturelle sur un projet. Les outils de modélisation permettent d'anticiper les variations lumineuses selon les saisons et l'orientation des bâtiments, optimisant l'efficacité énergétique et le confort visuel (Kwok et Grondzik, 2018, p. 43-50). En superposant des données en temps réel sur les maquettes augmentées, il devient possible d'adapter la conception aux conditions climatiques spécifiques et de tester différentes stratégies d'éclairage passif pour minimiser la consommation d'énergie (Cuttle, 2007, p. 32-34).

En conclusion, l'intégration des technologies immersives dans l'architecture marque une évolution dans les pratiques de conception et d'apprentissage (Milovanovic, 2017, p. 5-8). Si les maquettes physiques conservent un rôle central dans la pédagogie et la communication des projets, leur complémentarité avec la réalité augmentée ouvre de nouvelles perspectives d'exploration spatiale et d'analyse interactive (Symeonidou, 2023, p. 376). Cette synergie entre le numérique et le tangible transforme les approches traditionnelles, améliorant la précision des simulations et la compréhension des interactions entre les volumes, les matériaux et l'environnement (Wang, 2014, p. 455). Toutefois, pour que ces technologies atteignent leur plein potentiel, il est nécessaire d'adresser les défis liés à leur accessibilité, à leur coût et à leur intégration dans les méthodes pédagogiques et professionnelles existantes (Lornois, 2017, p. 21).

Chapitre 3 : Méthodologie de recherche et mise en œuvre du dispositif de maquette augmentée

Définition

Tout d'abord, il convient de clarifier la signification de l'expression « maquette augmentée », car elle peut encore sembler floue quant à la finalité de l'exercice. Ce chapitre se concentrera donc sur la compréhension de cette notion et sur son rôle potentiel dans l'évolution des pratiques pédagogiques en architecture. Par « maquette augmentée », il convient d'entendre un dispositif hybride articulant un support matériel tridimensionnel, la maquette physique, et des contenus numériques dynamiques, activés par le biais de la réalité augmentée.

Ces couches virtuelles, superposées à l'objet tangible, introduisent des informations visuelles, superposées à l'objet tangible, introduisent des informations visuelles, interactives ou analytiques qui viennent enrichir, complexifier et parfois transformer la lecture architecturale du projet modélisé (Azuma, 1997 ; Milgram, 1994). L'expression même de « maquette augmentée » convoque un paradigme où le numérique ne se substitue pas au physique, mais s'y greffe stratégiquement pour ouvrir de nouvelles modalités de représentation, d'analyse et de transmission de savoir spatial (Szuta, 2020) ; (Fonseca Escudero, 2016).

Ce mode de représentation repose sur une dialectique entre matérialité et virtualité : la maquette physique conserve son rôle de médiation sensorielle directe, tandis que les ajouts numériques permettent d'introduire des paramètres évolutifs, des phénomènes invisibles ou des scénarios prospectifs (Raskar, 1999). L'objet devient alors à la fois l'interface cognitive et le support critique, favorisant une lecture augmentée du projet. La maquette augmentée permet ainsi d'articuler le visible et le simulé, la statique et la dynamique, le construit et le spéculatif, dans une logique de projection expérimentale (Milovanovic, 2017).

Dans le cadre d'un dispositif d'apprentissage architectural, la maquette augmentée s'inscrit comme outil euristique pertinent sur le plan pédagogique. En facilitant la compréhension de phénomènes complexes, tels que les ambiances lumineuses, les contraintes contextuelles, elle permet une saisie sensible et rationnelle des enjeux de conception (Symeonidou, 2023). Par ailleurs, son caractère interactif engage les étudiants dans des processus de coconstruction du savoir, renouvelant les modalités de transmissions académiques. Elle suscite de nouvelles formes d'interactions pédagogiques, en particulier dans les ateliers de projets, et questionne le rôle de l'enseignant comme médiateur, facilitateur et acteur critique de l'expérience immersive (Calixte, 2017).

Ce chapitre s'attardera sur plusieurs axes : les conditions de production de la maquette augmentée (outils, processus, contraintes techniques), les perceptions recueillies auprès des encadrants pédagogiques, les opportunités identifiées en matière de transmission de savoir et enfin les limites constatées dans l'usage réel du dispositif. En mobilisant une grille d'analyse croisant les apports des sciences de l'éducation, des théories de la représentation et des pratiques immersives. Ce travail visera à interroger la place que pourrait occuper la maquette augmentée dans une configuration plus large des modalités d'apprentissage en architecture, à l'heure de la transition numérique.

Méthodologie

Ce travail repose sur une méthodologie articulant deux dimensions complémentaires : d'une part, une analyse théorique fondée sur une revue de la littérature traitant des fondements de la réalité augmentée et de ses implications pédagogiques en architecture ; d'autre part, une démarche expérimentale visant à éprouver ces concepts dans un cadre pédagogique réel. L'étude s'est particulièrement intéressée aux fonctions critiques et médiatrices de la maquette physique, aux effets de l'hybridation entre modèles matériels et environnements numériques, ainsi qu'à la représentation de l'ensoleillement comme donnée contextuelle dans le processus de conception. L'objectif est d'interroger les conditions concrètes d'intégration de la RA dans l'enseignement de l'architecture, d'en identifier les apports et les limites, et de comprendre les formes d'interaction pédagogique qu'elle permet ou transforme.

Sur cette base, un dispositif expérimental a été mis en place. Plusieurs tests préliminaires ont été conduits sur des maquettes personnelles afin de valider les outils techniques retenus : numérisation 3D avec Scaniverse, intégration interactive via Unity et Needle Engine. Ces essais ont permis d'ajuster les formats, les conditions de visualisation et la compatibilité entre plateformes.

Le cœur de la démarche repose sur une série d'entretiens semi-directifs menés auprès de quatre enseignants impliqués dans un atelier de projet de Master 2 à l'Université de Liège. Plutôt que d'évaluer les usages étudiants, il s'est agi ici d'interroger les enseignants sur leur réception de la maquette augmentée et les scénarios pédagogiques qu'ils pourraient envisager. À partir de la manipulation du dispositif, ils ont été invités à réagir librement sur son intérêt, ses limites, et son intégration possible dans les ateliers de projet. Cette expérimentation a ainsi ouvert la voie à un protocole d'enquête ciblé auprès des enseignants, dont les modalités sont présentées dans la section suivante.

Dispositif d'enquête par entretiens semi-directifs.

Objectifs de la démarche

Dans le prolongement de l'expérimentation amorcée, cette section s'attache à interroger, de manière située, les modalités d'appropriation d'un dispositif pédagogique composite, la maquette physique augmentée, par un corps enseignant impliqué dans l'enseignement du projet architectural. Il ne s'agit pas ici de procéder à une évaluation fonctionnelle du dispositif, mais bien d'engager une lecture critique des dynamiques pédagogiques que sa mobilisation rend possibles, suscite ou reconfigure. Cette analyse s'inscrit dans une posture épistémologiquement réflexive, attentive aux cadres de transmission du savoir en architecture, et aux reconfigurations que peuvent opérer les artefacts numériques dans les rapports aux savoirs, aux outils, et aux postures enseignantes.

Cadre méthodologique

La méthodologie adoptée relève d'une démarche qualitative, mobilisant des entretiens semi-directifs comme outil principal de production de données. Ce choix se justifie par le besoin d'accéder à des récits situés, denses et articulés, permettant d'éclairer les logiques d'usage, les cadres de signification et les résistances symboliques qui entourent l'intégration de la RA dans les pratiques pédagogiques. L'approche vise également à comprendre les représentations institutionnelles de l'innovation technopédagogique dans un contexte académique historiquement marqué par une forte culture de l'outil matériel.

Constitution de l'échantillon

Le terrain d'enquête s'est concentré sur quatre enseignants intervenant dans l'atelier de Projet « Relecture », un atelier de Master 2 rattaché à la Faculté d'Architecture de l'Université de Liège. Cet atelier, qui se distingue par une approche pédagogique réflexive, une attention portée à la dimension critique du projet architectural et un ancrage fort dans des situations pédagogiques concrètes, constitue un espace pertinent pour observer les tensions entre innovation technologique et tradition pédagogique. Les profils des participants ont été sélectionnés selon une logique de diversification des postures professionnelles et générationnelles (Dodion, 2020, p.16-17).

Dispositif de recueil des données

Chaque participant a été invité à expérimenter une maquette augmentée via des outils numériques, tels qu'Unity et Needle Engine, intégrant notamment une couche de simulation d'ensoleillement. Cette mise en situation servira de support déclenché pour engager un dialogue critique autour des usages et potentialités pédagogiques du dispositif. Les entretiens, d'une durée moyenne de 30 minutes, seront enregistrés avec le consentement des participants (Dodion, 2020, p.13).

Les échanges ont été structurés selon une grille thématique articulée autour des dimensions suivantes, dont le détail est présenté en annexes de ce travail :

- 1) Posture pédagogique et rapport aux dispositifs de représentation
- 2) Expérience perceptive et évaluation critique de la maquette augmentée
- 3) Perspectives de scénario pédagogique et condition d'intégration

Stratégie d'analyse

Les corpus d'entretiens ont été soumis à une analyse thématique inductive, relevant d'une approche qualitative. Pour cela, une relecture intégrale des retranscriptions, au cours desquelles les fragments de discours faisant écho à des thématiques récurrentes, ont été mis en surbrillance. Ces thèmes ont été définis de manière émergente, selon les points de convergence observés entre les différents entretiens, par exemple : le caractère encore imprécis de la maquette malgré un rendu d'ensoleillement jugé plus réaliste, des suggestions de fonctionnalités à ajouter, les enjeux liés à la conception, la possibilité d'immersion à l'échelle humaine, ou encore la création de coupes élargies et l'intégration des analyses de contexte préalable. La notion d'outil de médiation sera également observée comme un axe d'interprétation. Un codage itératif a permis de structurer progressivement les catégories, dans une logique constructiviste attentive aux spécificités contextuelles. Ce traitement n'a pas pour vocation de produire une généralisation, mais bien une compréhension qui a été approfondie, située et interprétative des dynamiques exprimées par les enseignants interrogés.

Présentation du projet et des acteurs pédagogiques

Le projet prend place dans un cadre académique concret auquel je participe : l'atelier de projet de master 2 intitulé « Atelier Relectures », organisé à la Faculté d'Architecture de l'Université de Liège. Cet atelier est encadré par une équipe pédagogique pluridisciplinaire composée de deux enseignants praticiens, Madame Frisenna et Monsieur Noé, et de deux assistants, Monsieur Coq (assistant et doctorant) et Monsieur Gena. Ensemble, ils développent une pédagogie critique et transversale qui articule les savoirs pratiques, théoriques et historiques autour des enjeux contemporains du projet architectural.

L'atelier constitue un espace de réflexion collective et d'expérimentation, centré dans un premier temps sur les problématiques de reconversion du patrimoine bâti, puis plus largement sur la transformation des territoires urbains. Pour l'année académique 2024-2025, les étudiants sont invités à repenser l'avenir de l'école Don Bosco, située dans le quartier du Laveu à Liège. Ce site, confronté à une baisse progressive de sa population scolaire, libère désormais une partie de ses espaces inutilisés. Le projet vise à imaginer des formes de reconversion architecturale et programmatique, en explorant notamment la création d'un tiers-lieu, hybride et évolutif, capable d'intégrer des usages partagés à l'échelle du quartier et de la ville.

Cette réflexion s'inscrit dans le cadre d'un concours international réunissant plusieurs écoles d'architecture, incluant une école française, belge, espagnole et arménienne. Pour soutenir et structurer leur démarche, les étudiants de Liège ont réalisé collectivement une maquette physique à l'échelle du quartier, support tangible de leur future démarche de projet.

Ce travail collaboratif donne lieu à un objet fédérateur, représentant une lecture commune de l'existant sur le site du Laveu. La maquette produite ne vise pas à projeter des hypothèses de transformation, mais à documenter de manière rigoureuse l'état actuel du quartier, servant ainsi de socle partagé pour toute future réflexion de projet. C'est sur la base de cette maquette que s'articule l'expérimentation proposée dans le cadre de ce mémoire. Le choix de ce projet s'explique par la richesse du support produit, sa qualité de fabrication, et la volonté de l'équipe pédagogique d'expérimenter des outils innovants dans l'enseignement du projet architectural.

Procédure de modélisation

Scan de la maquette physique et numérisation

La première phase du protocole expérimental a consisté à produire une maquette physique par découpe laser, assurant ainsi une représentation physique fidèle du contexte. Cette approche préliminaire permet de disposer d'un support matériel de référence indispensable pour la capture numérique 3D ultérieure.

La numérisation 3D a été effectuée à l'aide de l'application Scaniverse, dont les capacités de reconstruction dense sont adaptées aux objets de grande taille. Pour initier le scan, il faut sélectionner l'option « + », ensuite « Mesh » puis opter pour le mode « Large Object », assurant ainsi une acquisition optimale pour des objets de grande taille. Avant de procéder à la capture, il est essentiel de contrôler l'environnement : installation de la maquette sur un socle neutre, fond épuré, et éclairage homogène afin d'éviter toute perturbation.

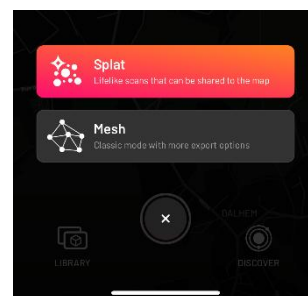


Figure 23 - interface Scaniverse avec "Mesh"

La numérisation s'est déroulée en déplaçant un smartphone, de manière lente et régulière autour de la maquette, en effectuant un premier tout général pour capturer l'ensemble du contexte, suivi d'un rapprochement ciblé sur les éléments principaux et plus complexes afin d'accroître la précision du maillage.

Après la phase d'acquisition, le mode de traitement « Detail » a été choisi afin d'obtenir un maillage final plus précis. Le fichier 3D a ensuite été sauvegardé au format .glb reconnu pour sa compatibilité avec les moteurs 3D comme Unity et optimiser pour les plateformes web.

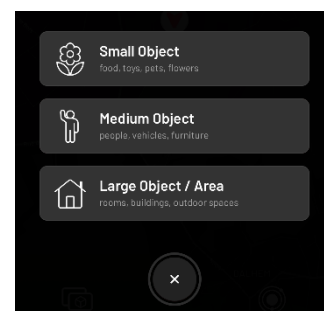


Figure 24 - interface Scaniverse avec "Large Object"

Configuration du projet Unity et intégration de Needle Engine.

Suite à la numérisation, l'étape suivante a été la création d'un environnement Unity adapté à l'intégration de la maquette numérisée et du logiciel Needle Engine. Pour cela il a fallu télécharger le package Needle Engine depuis le site officiel : <https://engine.needle.tools/docs/unity/?dl=true>.

Ensuite, un projet Unity de type « Universal 3D » a été créé en utilisant une version compatible avec Needle. Avant l'importation du module, plusieurs paramètres du projet doivent être ajustés. Dans « Project Setting », sous la section « Player », il faut changer le « Color Space » de « Gamma » en « Linear », une configuration indispensable pour obtenir un rendu photoréaliste et assurer la compatibilité avec Needle Engine.

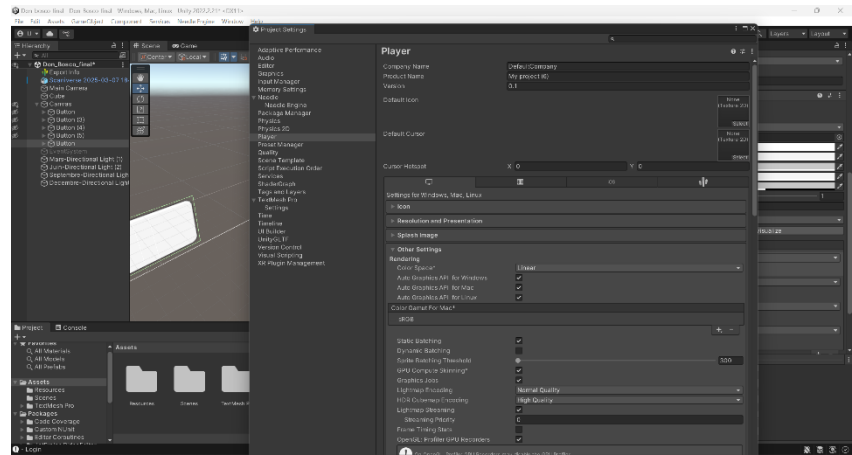


Figure 25 - Configuration du "Color Space" en "Linear" dans unity

Après l'importation du package Needle, Unity a généré une fenêtre proposant l'ajout de l'option « Web Exporter ». Il a fallu valider cette intégration pour activer les fonctionnalités d'exportation web, essentielles à la diffusion du projet.

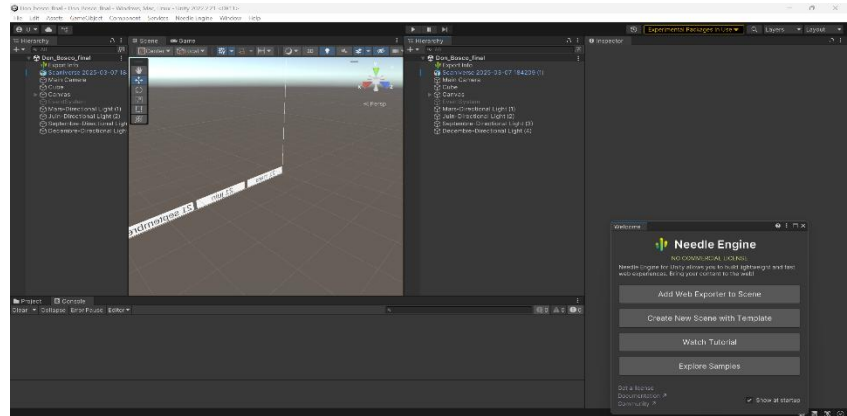


Figure 26 - Fenêtre d'ajout " Add Web Exporter »

La préparation minutieuse de cette infrastructure garantit une intégration fluide des modèles 3D, leur mise en scène dans Unity, puis leur exportation sur une page web interactive.

Pour compléter cette procédure, le tutoriel officiel fourni par Needle est disponible à l'adresse suivante : https://www.youtube.com/watch?v=3dB-d1Jo_Mk&t=119s.

Intégration de la maquette numérisée et création de l'environnement interactif.

L'étape suivante consiste à importer la maquette numérisée au format .glb dans Unity. Le fichier doit être déposé dans le dossier « Asset ». Une fois importé, la maquette doit être glissée dans la « scène » et positionnée avec les coordonnées X:0, Y:0, Z:0 pour assurer un placement centralisé.

Pour éviter que la maquette ne flotte dans l'espace, il est possible de créer un socle. Pour cela, il suffit de faire un clic droit dans « Hierarchy », sélectionner « 3D object » puis « Cube », et ajuster les dimensions du cube pour qu'il serve de base solide à la maquette.

La mise en place de l'éclairage est ensuite essentielle pour simuler l'ensoleillement. Cette opération se réalise en faisant clic droit dans « Hierarchy », puis en allant dans « Light », et en choisissant « Directional Light ». Pour positionner correctement ces lumières en fonction de la géolocalisation du projet, l'utilisation d'outils d'intelligence artificielle est recommandée pour assurer un géoréférencement précis.

Pour dynamiser l'interaction et permettre d'allumer ou d'éteindre les sources lumineuses en fonction des saisons, il est nécessaire de créer des boutons d'interface utilisateur. Un clic droit dans « Hierarchy », suivi de « UI », puis « Button – TextMeshPro », permet de créer un bouton. Cette opération doit être répétée quatre fois, afin de créer un bouton pour chaque saison et contrôler quatre sources lumineuses distinctes.

Pour configurer les boutons, il faut sélectionner le bouton dans la « Scene » ou double-cliquer sur le bouton dans « Hierarchy », accéder à l'onglet « Inspector », et dans la section « On click », cliquer sur le bouton « + » à quatre reprises pour créer des évènements, puis modifier « Runtime Only » en « Editor and Runtime ». Chaque « Directional Light » préalablement créée est ensuite glissée dans la case nommée « None ». Dans la liste des fonctions, il faut choisir « Game Object > SetActive (bool) ». Il est important de cocher une seule case différente pour chaque bouton afin d'activer la bonne « Directional Light » et de désactiver les autres.

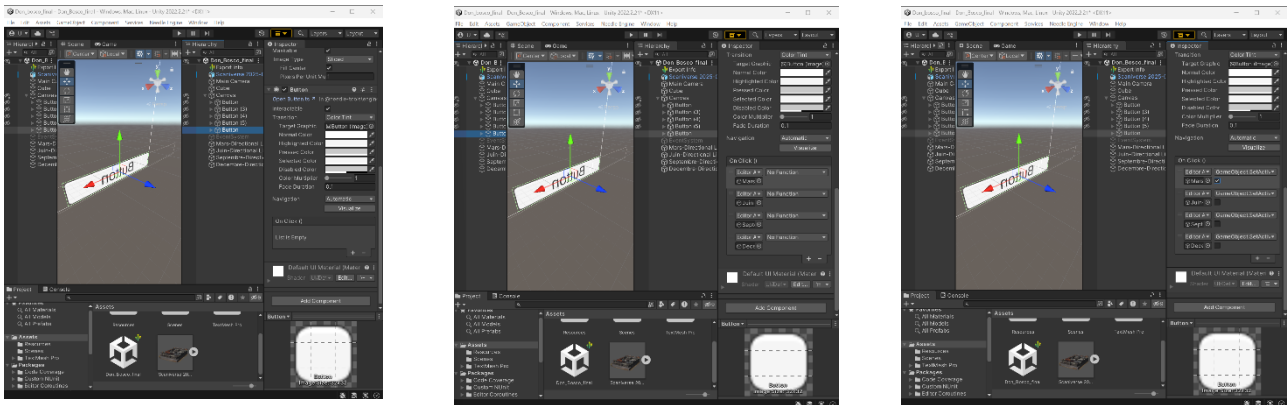


Figure 27 - Configuration des boutons dans Unity

Enfin, pour importer la maquette augmentée sur une page web interactive, il faut cliquer sur « Export Info » de Needle dans l'onglet « Hierarchy », puis sélectionner « Start Server ».

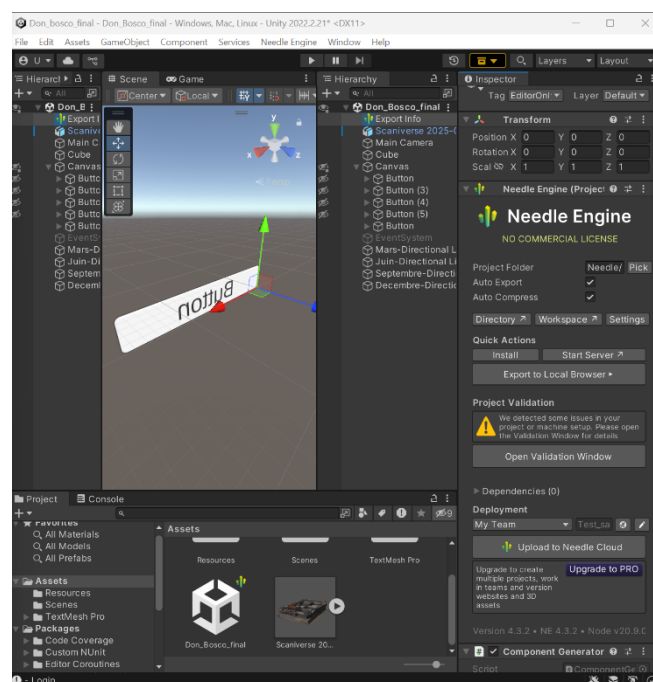


Figure 28 - interface Export Info de Needle

Conclusion

Ce chapitre a permis de poser les fondations théoriques, techniques et méthodologiques de cette recherche, en articulant une analyse conceptuelle de la maquette augmentée à une expérimentation concrète dans un contexte pédagogique réel. À travers la mise en œuvre d'un dispositif d'enquête fondé sur des entretiens semi-directifs avec des enseignants impliqués dans un atelier de projet, il a également permis de définir les conditions d'appropriation d'un outil hybride mêlant matérialité physique et interactivité numérique.

La phase suivante de ce travail consistera à mettre en perspective les résultats obtenus à travers une analyse critique structurée. Celle-ci se déclinera en trois volets complémentaires. Le premier consistera en une évaluation synthétique des points forts et des limites identifiés au cours des entretiens, tant sur le plan de l'outil que sur celui de son usage pédagogique. Le deuxième volet proposera une discussion sur les applications plus larges de l'introduction de la RA dans l'enseignement de l'architecture, en termes d'évolutions pédagogiques, de reconfiguration des rôles enseignants-étudiants, ou encore d'influences sur la culture du projet. Enfin, le troisième volet s'attachera à examiner la pertinence des dispositifs techniques mobilisés (Scaniverse, Unity, Needle Engine) en fonction de différents contextes d'usage, en vue de leur amélioration ou de leur adaptation future.

Des recommandations concrètes seront formulées en conclusion, à destination des acteurs pédagogiques et institutionnels, afin de favoriser une intégration progressive, critique et pertinente de la réalité augmentée dans les cursus en architecture. Ces recommandations porteront à la fois sur les modalités d'implémentation, les conditions de formation, et les enjeux organisationnels liés à l'usage de la maquette augmentée.

En somme, la méthodologie déployée dans ce travail articule une base théorique rigoureuse, issue des deux premiers chapitres, à une démarche expérimentale qualitative fondée sur une enquête en situation réelle. Elle vise à évaluer, par l'expérience concrète de manipulation et d'échange critique, les potentialités pédagogiques de la maquette augmentée, ainsi que les conditions nécessaires à son intégration durable. En mobilisant à la fois des dimensions techniques, pédagogiques et critiques, cette recherche propose d'accompagner la transition numérique dans l'enseignement de l'architecture, en s'appuyant sur des outils interactifs capables d'enrichir les dispositifs d'apprentissage traditionnels.

Chapitre 4 : Appropriation pédagogique de la maquette augmentée

Analyse croisée des entretiens : perspectives critiques sur l'usage d'une maquette augmentée dans l'enseignement de l'architecture.

Introduction

Cette recherche s'inscrit dans une perspective d'analyse critique de l'intégration des technologies immersives dans des dispositifs pédagogiques en architecture. À travers quatre entretiens semi-directifs menés avec des enseignants engagés dans l'atelier Relecture à la faculté d'architecture de Liège et participant au concours international Iacobus. Ce travail interroge la réception, l'appropriation et la résistance liées à l'usage d'une maquette physique augmentée par une simulation d'ensoleillement. L'objectif est double : d'une part, identifier les dynamiques pédagogiques et cognitives à l'œuvre lors de l'introduction de ce dispositif dans l'atelier de projet ; d'autre part, comprendre comment cet outil technologique modifie les logiques de conception et de transmission en architecture, en réinterrogeant la relation entre intuition, matérialité et simulation.

L'analyse repose sur une approche qualitative, structurée autour d'un codage thématique transversal. Elle met en évidence non seulement les convergences et divergences d'usage et d'interprétation, mais également les tensions méthodologiques, épistémologiques et générationnelles qui sous-tendent ces discours. Ce travail s'inscrit dans une posture réflexive sur la place des technologies immersives dans l'espace pédagogique, et sur les formes émergentes de médiation et de conception qu'ils induisent.

Avant de s'interroger sur les perceptions et approbations de la maquette augmentée, il est pertinent de contextualiser le rapport, que chacun des quatre enseignants interrogés entretient avec les technologies immersives et, plus spécifiquement, avec la réalité augmentée.

Marina Frisenna a eu un contact ponctuel avec ces technologies, ayant expérimenté une seule fois un dispositif immersif dans un cadre personnel lors d'un souper. Cette expérience reste marginale, ce qui peut expliquer en partie son approche prudente et expérimentale face à la maquette augmentée. Elle se montre curieuse, mais attentive aux risques de déstabilisation pédagogique ou d'illusion de maîtrise.

François Gena, de son côté, a surtout été exposé aux technologies immersives dans des expositions muséales, qu'il critique pour leur caractère trop détaché du fond. Son rapport est davantage lié à une posture d'observation que de pratique pédagogique ou professionnelle directe. Il se montre tout de même favorable à l'innovation, tout en maintenant une exigence quant à sa lisibilité et sa pertinence didactique.

Maxime Coq est le plus familier des quatre avec les outils immersifs. Il ne les a toutefois jamais intégrés dans son enseignement. Son expérience se limite à un cadre professionnel, dans lequel il a testé ponctuellement ce type de dispositif avec des clients. Il défend néanmoins une pédagogie ouverte aux formes d'exploration numérique, à condition que celles-ci conservent une fonction critique.

Enfin, Pascal Noé adopte une position de distance critique. Il n'a jamais utilisé d'outil de réalité augmentée, et n'envisage pas d'en intégrer dans sa pratique. Sa posture est fondée sur une méfiance vis-à-vis de la technologie, perçue comme facteur d'appauvrissement de la pensée projectuelle et de la perte de complexité dans la transmission architecturale. Il affirme : « Jamais, ça me fait peur. Et pour un dire vrai, je trouve que c'est outrageusement vulgaire. Et que ça manque de propos. »

La maquette augmentée comme outil de médiation

La maquette augmentée est perçue de manière ambivalente. Pour trois des quatre enseignants interrogés, elle constitue un outil potentiellement pertinent pour rendre visibles et manipulables des phénomènes immatériels, comme l'ensoleillement, les ombres portées et les rapports physiques et perceptifs entre le projet architectural et la configuration du terrain. Maxime Coq, Marina Frisenna et François Gena reconnaissent que la maquette peut agir comme un dispositif de médiation visuelle. Maxime affirme : « Je crois que ce serait intéressant si on mettait le projet dedans, on pourrait voir l'impact du projet, de la projection dans l'espace, de la conception, directement dans le site. Et là, j'ai l'impression que l'outil devient vraiment utile. ».

Cependant, cette convergence apparente est nuancée par des postures pédagogiques différenciées. Marina Frisenna se montre curieuse, mais prudente, évoquant ses limites personnelles face à l'outil et les potentiels pédagogiques qu'elle y entrevoit. François exprime des réserves quant à la lisibilité et la précision graphique : « C'est un document qui est assez brouillon ». Quant à Maxime, il regrette l'ergonomie limitée de l'interface, estimant qu'« en termes intuitifs, j'ai l'impression que ce n'est pas très intuitif l'interface qui est présentée. »

Postures pédagogiques et philosophie d'enseignement

Chacun adopte une approche pédagogique singulière, qui éclaire sa réception de l'outil. François Gena revendique une pédagogie non autoritaire qui laisse l'étudiant développer ses intuitions. Marina Frisenna insiste sur une pédagogie praticopratique, visant à confronter l'étudiant à la faisabilité du projet. Maxime Coq développe une pédagogie horizontale et active : « Ce que je peux apporter à l'étudiant est tout autant de valeur que ce que l'étudiant peut apporter au projet. »

À l'opposé, Pascal Noé défend une posture critique fondée sur le propos et la construction du sens par le discours. Pour lui, l'expérimentation concrète n'est pertinente que si elle sert une pensée articulée. Il valorise la parole et l'intellectualisation du projet, et reste méfiant face à des outils susceptibles de court-circuiter la réflexion : « Mon approche pédagogique, c'est d'essayer de partir du propos de l'étudiant, pour autant qu'il y en ait un, et de le mettre en garde vis-à-vis de sa propre production. C'est à partir de ce que je vois que je construis un dialogue, en développant avec lui le pour et le contre, avec pour finalité de le guider vers son jury final. »

La simulation d'ensoleillement : potentiel et limites

L'ensoleillement apparaît comme une fonction unanimement reconnue comme pertinente, mais les enseignants divergent quant à ses usages. Marina Frisenna considère l'outil comme une version plus précise d'un exercice habituellement fait avec la lampe de poche, mais regrette son manque de fidélité graphique : « Il faudrait l'améliorer parce qu'autrement, c'est encore un peu flou à ce stade. ».

Maxime Coq évoque quant à lui l'absence de représentations végétales et la faiblesse des données manipulables. Il regrette par ailleurs l'absence d'une fonctionnalité permettant d'afficher les heures précises de la journée dans l'outil, ce qui aurait permis de mieux analyser l'évolution de l'ensoleillement à des moments clés comme le matin ou le soir, des périodes importantes pour apprécier l'impact de la lumière sur les usages, les ambiances et le confort spatial. « On pourrait avoir, par exemple, l'ouest et l'est aussi. Je pense que ce serait intéressant. Ce qui est toujours intéressant, c'est de voir l'impact des volumes à des moments qui sont plus clés. » Il poursuit : « Quand le soleil se couche, c'est là qu'il y a les plus grandes ombres. Donc, c'est de voir ces impacts-là. ».

François Gena, quant à lui, apporte une appréciation nuancée : « La première impression, c'est que ça paraît assez imprécis, mais c'est sans doute lié à la question. Je veux dire en termes de définition. Maintenant, à la fois, on reconnaît le site et le fait d'avoir ce rapport à la lumière donne un certain réalisme aussi, contextualise un peu la maquette qui est au départ un outil un peu hors contexte. ». Il souligne ainsi que, malgré des défauts de précision, la simulation de l'ensoleillement contribue à ancrer la maquette dans une lecture plus contextualisée du site.

La maquette augmentée comme outil d'analyse

Si l'outil est considéré comme une aide à la compréhension contextuelle, plusieurs enseignants en soulignent l'intérêt comme support d'analyse. Maxime Coq imagine l'ajout de couches d'analyse à des fins de diagnostic, comme le montre la proposition : « Ce qui serait intéressant, ce serait d'intégrer les données historiques du contexte. ». Il évoque également des extensions, comme l'ajout de la végétation, d'élévations, ou encore de données socioéconomiques : une analyse socioéconomique du quartier, ça pourrait être intéressant, parce que la maquette est assez ciblée, mais si on imaginait qu'on prenait la maquette complète que vous avez faite, on pourrait voir effectivement les points de repère, les ASBL qui existent déjà. ». Ces enrichissements relèvent avant tout d'une volonté de croiser les données contextuelles pour affiner l'analyse préalable au projet.

François Gena, plus prudent, envisage lui aussi l'usage de la maquette augmentée dans la phase d'analyse du site, sans toutefois le considérer comme un outil d'élaboration conceptuelle : « Je trouve qu'un outil d'information, de collecte de données, pourquoi pas. Mais en tant qu'outil de conception, j'ai un peu de mal à l'imaginer. »

Marina Frisenna partage cet intérêt pour une utilisation en amont, suggérant que la maquette pourrait être mobilisée « dans les études préalables. À un moment donné, pour avoir une vision un peu globale du quartier et dans tes études. ». Elle imagine que cet outil pourrait permettre de superposer plusieurs couches d'analyse, comme les pleins et les vides, les circulations, la densité construite ou l'ensoleillement, issus directement de la volumétrie de la maquette. Elle précise : « À un moment donné, tu arrives à travailler des couches d'analyse qui tiennent plein vide, circulation, tu vois, les densités, l'ensoleillement, clac, clac, clac, arriver à des calques d'analyse qui seraient issue de ta maquette rien que par les volumétries de ta maquette, par exemple. » Elle insiste notamment sur l'intérêt de visualiser les hauteurs des bâtiments environnements le site (R+2, R+3, etc.) pour des études règlementaires et contextuelles, comme les autorisations de bâtir, à travers un système de calques multicouches intégré dans l'outil.

Une transition vers la conception ?

En revanche, l'usage de la maquette augmentée reste plus débattu comme outil de conception. Maxime Coq est celui qui en défend le plus explicitement l'usage dans cette phase d'élaboration du projet. Il explique : « Une fois qu'on a bien étudié le site, on se servirait de cette maquette pour vérifier des rapports de gabarit, des rapports de forme, de hauteur et de lumière par rapport au site et à son implantation. » Il ajoute : « Ce n'est pas qu'un outil de représentation, mais c'est aussi un outil de conception et de vérification de ce qu'on a conçu. » Il précise également que cet usage est particulièrement pertinent lorsqu'un projet est intégré à la maquette : « Surtout. Pour le cas d'une maquette de contexte, peut-être moins. Mais par contre, si effectivement il y a un projet qui est développé, on peut tout de suite mesurer l'implication de l'ombrage du projet, de l'ombre portée du projet sur le site. » Il souligne cependant les limites actuelles du processus technique : « Je trouve que là, c'est à la limite mieux d'aller chercher un Google, parce que c'est plus efficace, plus rapide. [...] Toute cette énergie quand même assez lourde [...] alors que si c'est un projet qui est intégré dedans, effectivement, on n'a pas d'autre moyen de le faire. »

Marina Frisenna, quant à elle, adopte une posture plus mesurée. Elle envisage la maquette augmentée comme un outil complémentaire à la maquette physique, notamment pour visualiser certains aspects, telle que l'ensoleillement difficilement perceptible autrement : « Peut-être qu'en fait, l'outil ne serait pas là pour remplacer nécessairement la maquette, mais pour l'augmenter. Sur la maquette, par exemple, pour l'ensoleillement, quand on construit, on ne sait pas vraiment voir. Ici, si on met notre projet dedans, je pense que ça peut permettre peut-être de compléter. C'est ça. Oui, oui, c'est peut-être complémentaire. »

François Gena exprime une certaine réserve, tout en reconnaissant l'intérêt potentiel d'un usage de la maquette augmentée comme outil de conception : « Je trouve que ça pourrait être chouette de se dire qu'on peut aussi la transformer et de se dire que j'y ajoute un bâtiment où je transforme le toit. Mais j'ai l'impression que ça va être fait de manière très primaire en l'état. C'est vrai que ça dépend, c'est encore tributaire d'autres outils d'utilisation. »

L'immersion : changer d'échelle pour mieux percevoir

Une dimension importante évoquée par François Gena, Maxime Coq et Marina Frisenna est celle de l'expérience immersive. La possibilité de se projeter à l'échelle humaine à l'intérieur de la maquette ouvre selon eux une voie nouvelle pour percevoir l'espace. « Là, tu es à la place d'un usager. » affirme François Gena. Il ajoute également : « C'est comme si tu mettais ta tête dans la cour, ce que tu ne sais pas faire en fait, en vrai. ». Cette idée est complétée par une observation sur le caractère souvent surplombant du regard porté sur la maquette physique « quand tu regardes une maquette, tu as tendance à la regarder d'en haut [...], ici, tu peux aller presque au plus proche, presque d'entrer dans les rues ».

Maxime Coq renchérit : « En fait, c'est quelque chose de très compliqué dans la maquette parce qu'on ne sait pas aller mettre son œil dans la maquette, alors que là, tu peux le faire. ». Il évoque également une capacité de déambulation libre et une accessibilité démultipliée des points de vue. François Gena y voit, au-delà de la simple immersion, un outil potentiellement pédagogique permettant à l'étudiant de confronter plus directement son projet aux réalités du site : « ça donne peut-être un regard qui est différent que celui à vol d'oiseau qu'on a quand on regarde une maquette en atelier ».

Marina Frisenna, de son côté, insiste sur l'importance de maintenir une lecture continue et globale de la spatialité. Selon elle, l'intérêt de la maquette augmentée réside dans la capacité à évoluer librement dans le modèle, à zoomer ou dézoomer, tout en conservant un rapport fidèle à l'échelle réelle. Elle souligne : « Tu es tout le temps dans la globalité de ta spatialité. Puisque tu es dans la maquette et qu'avec ta souris tu pourras toi-même reculer, il faut que tu sois dans la réalité. ». Pour elle, la maquette augmentée garantirait une meilleure visualisation de l'espace réel que les modèles numériques 3D : « Là tu garantis qu'on est toujours dans la réalité... tu ne vends pas du vent. » Cette fidélité serait selon elle renforcée par le maintien d'une matérialité perceptible, difficilement falsifiable par des artifices visuels numériques.

Communication et mise en récit du projet

L'usage de la maquette augmentée dans des contextes de jury ou de restitution publique est défendu par Maxime Coq, qui y voit un atout pour la médiation et la participation des parties prenantes du territoire, telles que les habitants ou les maitres d'ouvrage. Il évoque notamment sa capacité à être partagée en ligne : « C'est un outil qu'on peut envoyer à tous, on leur donne le lien, et puis ils peuvent [...] faire l'évaluation patrimoniale à partir de l'outil maquette scannée. » Il envisage également des usages en concours, permettant de présenter un projet à distance, en contournant les contraintes matérielles de transport de maquettes physiques.

Maxime Coq insiste surtout sur un usage stratégique dans le cadre des jurys pédagogiques : il imagine que les maquettes augmentées puissent être scannées en amont et partagées avec les membres du jury avant la séance, permettant ainsi une préparation individuelle, une première lecture spatiale autonome, et donc un dialogue plus approfondi pendant la présentation. Il précise : « Je crois qu'avec les enseignants qui suivent le projet, ça ne serait utile, encore une fois, que dans l'étude du projet lui-même et de sa conception. » En revanche, il voit un véritable intérêt pour les jurys externes, moins familiers du site : « Pour un jury, avoir une vision très claire du site qui pourrait lui être envoyée en amont, donc il aurait accès à cette maquette 3D et pourrait très vite comprendre le site avec toutes les analyses qui ont été faites, ça pourrait faire gagner beaucoup de temps et faire en sorte que les jurys comprennent beaucoup mieux le site. » Il distingue ainsi deux modalités d'usage : une maquette augmentée comme outil d'étude partagée dans le développement du projet avec les enseignants, et comme support préparatoire pour une lecture anticipée et informée par le jury.

François Gena, quant à lui, insiste sur la nécessité de pouvoir extraire des documents lisibles à partir de l'outil pour qu'il soit réellement communicable : « Si après tu arrives à en sortir des documents de qualité qui te permettent de discuter avec tes enseignants, ou même de présenter à un jury, ou avec des usagers, des maitres d'ouvrage, ce genre de choses, c'est intéressant. » Pour lui, l'outil prend toute sa valeur lorsqu'il permet une mise en forme exploitable et partageable : une forme de figement temporaire du rendu qui rende possible une analyse contextualisée. Il souligne les limites d'un outil qui resterait enfermé dans une interface numérique, sans possibilité de produire une synthèse graphique exploitable : « Peut-être que ça demanderait à la fois que la numérisation soit précise, mais aussi que toutes les informations qu'on y ajoute puissent être mises en page et être extraites sous forme d'un layout donné. »

Marina Frisenna, de manière plus allusive, évoque que l'outil pourrait permettre de faire le constat de l'existant, et puis du projeté, suggérant une articulation possible entre diagnostic et narration du projet : « Oui, peut-être, peut-être, mais elle fait le constat de l'existant et puis elle fera le constat de la projection. »

Divergences pédagogiques et positionnements critiques

Enfin, les critiques les plus radicales sont formulées par Pascal Noé. Il refuse catégoriquement l'intégration de l'outil en début de processus. Il précise que s'il devait être utilisé, ce serait uniquement à la toute fin pour vérifier certaines hypothèses ou données du projet, dans une logique de vérification finale. « Si ça arrive à la toute fin, je ne suis absolument pas contre. [...] Sers-toi de cet outil, bien évidemment. Alors là, oui, mais pas en amont, surement pas en amont. » Cependant, il contredit cette position en fin d'entretien en affirmant : « Jetez tout. Ne le faites plus jamais. Reprenez le chemin de la bibliothèque. Regardez des vidéos qui sont en location à la bibliothèque sur des monographies d'architectes. » Cette posture radicale marque un rejet frontal d'une conception pédagogique trop technologisée. Il insiste par ailleurs sur la nécessité de préserver l'autonomie réflexive de l'étudiant, à l'opposé d'un dispositif qui prémâcherait le travail de l'étudiant : « Je veux que ce soit eux qui soient acteurs. »

Ces divergences mettent en lumière une fracture à la fois méthodologique et philosophique dans les rapports à la technologie. Maxime Coq adopte une posture fluide et exploratoire, voyant dans les outils immersifs un prolongement naturel de l'expérimentation architecturale. François Gena, bien que partageant un socle générationnel proche, incarne une attitude plus mesurée, attachée à la clarté des représentations et à leur capacité à servir le raisonnement critique. Pascal Noé s'inscrit dans une tradition de transmission fondée sur le discours et le jugement autonome. Sa méfiance envers la technologie se traduit par une critique tranchée d'un outil perçu comme potentiellement réificateur. Marina Frisenna développe quant à elle une position intermédiaire, nourrie par l'expérience, combinant une ouverture potentielle technique de la maquette augmentée avec un souci constant de matérialité, de contextualisation et de précision pédagogique.

Conclusion

En conclusion, les entretiens révèlent que la maquette augmentée ne constitue pas un simple outil technique, mais bien un objet épistémique, révélateur de visions pédagogiques contrastées. Elle engage des choix de transmission et de représentation, et met en tension différentes conceptions de l'enseignement du projet architectural. Perçue tour à tour comme un instrument de médiation, un vecteur d'analyse contextuelle ou une opportunité d'immersion spatiale, elle suscite également des réserves critiques profondes, parfois radicales, concernant sa place dans le processus d'apprentissage. Ces divergences ne relèvent pas uniquement d'un rapport à la technologie, mais traduisent des visions plus larges de la pédagogie, du rôle de l'étudiant et de la manière de concevoir en architecture.

Ce spectre de positions révèle la complexité d'une intégration harmonieuse de la maquette augmentée dans l'atelier de projet. Si certains y voient un levier potentiel de compréhension et de communication, d'autres pointent un risque d'appauvrissement du raisonnement ou de dépendance à une forme d'objectivité visuelle trompeuse. Dans tous les cas, sa mise en œuvre ne saurait être neutre, elle engage des arbitrages pédagogiques et appelle à une posture réflexive constante. Cette diversité de regards dessine en creux les conditions nécessaires à une appropriation critique de l'outil, à la fois sur le plan technique, cognitif et culturel.

Ce travail d'analyse constitue ainsi une base pour envisager, dans le chapitre suivant, les pistes d'évolution possibles de la maquette augmentée en contexte pédagogique : quels ajustements techniques, quels accompagnements didactiques et quelles formes de coconstruction pourraient permettre d'amplifier son potentiel tout en limitant les effets réducteurs ?

Thème	Marina Frisenna	François Gena	Maxime Coq	Pascal Noé
Rapport à la technologie immersive	Curieuse, mais prudente, peu expérimentée	Curieux, critique envers le manque de fond	Positif, usage professionnel ponctuel	Rejet fort, perçu comme un outil de formatage.
Positionnement pédagogique global	Réaliste, centrée sur la faisabilité concrète	Non directive, tournée vers le raisonnement critique	Exploratoire, horizontale, coconstruction étudiante	Centrée sur le propos et l'échange
Usage en phase d'analyse	Oui, pour études préalables (pleins/vide, densité)	Utile si rendu figé, pour lecture du contexte	Oui, outil multicouche pour lectures croisées	Non, outil prémâchant la pensée
Usage en fonction de conception	Complémentaire à la maquette physique, surtout en lien avec l'ensoleillement	Pas contre, mais pas en l'état.	Oui, outil de vérification des intentions projetées	Non, sauf peut-être pour vérification
Fonction de médiation et de communication	Possible, mais attention à la fidélité visuelle	Oui, si possibilité de produire des rendus visuels	Oui, fort potentiel pour la médiation, la diffusion et la vérification	Non, outil prémâchant la pensée
Intégration dans les jurys	Projection possible, articulation existant/projet	Oui, si on peut extraire des documents graphiques de qualité	Très pertinent, surtout pour une préparation en amont	Non, inacceptable dans une logique pédagogique
Expérience immersive	Utile si cela garantit une spatialité fidèle	Permet d'entrer « à hauteur d'utilisateur », appréciée	Souligne l'intérêt de pouvoir adopter une vue à l'échelle de l'utilisateur à l'intérieur de la maquette, ce que ne permet pas la maquette physique	Rejet, prône la matérialité et l'expression directe

Chapitre 5 : Conclusion et perspectives

Une réception critique et située de la maquette augmentée

Relecture de la problématique à l'aune des données empiriques

La présente recherche s'est articulée autour de la question suivante : dans quelle mesure l'intégration de la réalité augmentée à une maquette physique permet-elle aux enseignants en architecture d'imaginer et de concevoir des scénarios pédagogiques innovants, en vue d'un déploiement dans leurs propres pratiques comme dans celle des étudiants ? Il ne s'agissait pas d'observer directement les effets de la réalité augmentée sur les étudiants, mais de comprendre comment les enseignants, en manipulant une maquette augmentée, peuvent concevoir de nouveaux scénarios pédagogiques. L'objectif était d'explorer la manière dont cet objet hybride pouvait être investi comme un support de réflexion pédagogique, stimulant la créativité didactique et ouvrant des perspectives d'usages renouvelées dans le contexte de l'enseignement du projet architectural.

Cette recherche a aussi tenté de dépasser une lecture strictement instrumentale de la réalité augmentée en maquette, pour en explorer les implications pédagogiques profondes. Elle ne visait pas à évaluer une performance technique, mais à comprendre comment cette hybridation entre matérialité et numérique est reçue, interprétée, voire réappropriée par les enseignants, tant dans leur manière de transmettre le projet architectural que dans leur projection sur les modalités d'appropriation et d'usage que les étudiants pourraient développer à travers ce type d'outil. L'hypothèse initiale postulait qu'un tel outil, à la croisée du tangible et du numérique, pouvait catalyser des pratiques pédagogiques renouvelées en renforçant l'interactivité, la réflexivité et la capacité à articuler analyse et narration du projet.

Les résultats issus des entretiens semi-directifs témoignent d'une réception plurielle et contrastée de la maquette augmentée, révélatrices de postures pédagogiques différenciées et de conception plus ou moins critiques de l'innovation technologique en milieu académique. Au-delà de simples préférences, ces retours permettent de situer les discours dans des paradigmes pédagogiques distincts, allant de l'expérimentation technophile à la défense d'une tradition artisanale de l'enseignement du projet.

La technologie comme révélateur des conceptions pédagogiques

Cette section montre que la réponse à la question de recherche est différenciée selon les profils pédagogiques : la réalité augmentée permet effectivement d'inspirer des scénarios pédagogiques pour certains enseignants, tandis que d'autres y opposent des résistances fortes. L'hypothèse selon laquelle « la réalité augmentée, lorsqu'elle est appliquée à une maquette physique dans un cadre pédagogique réel, constitue un outil pertinent pour enrichir les pratiques d'enseignement du projet » est donc validée, mais dans une perspective critique qui souligne la nécessité d'une appropriation consciente et contextualisée.

À travers l'analyse des entretiens, il apparaît que la capacité de la réalité augmentée de catalyser l'imagination pédagogique varie fortement selon les enseignants. Le dispositif est perçu comme une opportunité par certains, mais aussi comme un risque par d'autres, ce qui montre que son potentiel n'est pas universel et nécessite une appropriation contextualisée.

Certains enseignants, à l'instar de Maxime Coq et François Gena, reconnaissent l'intérêt du dispositif, notamment dans sa capacité à enrichir la perception spatiale et à simuler des phénomènes contextuels dynamiques. Ils décrivent notamment le potentiel immersif du dispositif, en ce qu'il permet d'approfondir les rapports d'échelle, la possibilité de se projeter à l'échelle humaine, de simuler des études d'ensoleillement ou de proposer des modalités alternatives de narration architecturale. Cette valorisation, toutefois, est tempérée par une conscience aigüe des limites techniques et ergonomiques du prototype, qui modulent leur enthousiasme initial. Leurs propos ne relèvent donc pas d'une adhésion naïve à l'innovation, mais d'une exploration critique de ses conditions effectives de mise en œuvre.

En contrepoint, la position exprimée par Pascal Noé s'inscrit dans une posture critique assumée vis-à-vis de la sur-technologisation de l'enseignement. Pour lui, la maquette physique conserve une supériorité formative fondamentale, car elle engage le corps et la pensée dans un processus d'élaboration active, ancré dans le réel. L'usage d'outils numériques préconfigurés risquerait, selon lui, de court-circuiter l'apprentissage. Cette vision trouve un écho partiel chez Marina Frisenna, qui, tout en reconnaissant les vertus immersives du dispositif, insiste sur la nécessité de maintenir une approche critique et contextualisée de tout outil de représentation.

Temporalité pédagogique et place de la maquette augmentée

Les résultats confortent l'idée que la réalité augmentée enrichit les pratiques d'enseignement, mais principalement dans certaines phases pédagogiques spécifiques. Cela répond positivement à la question de recherche tout en nuancant l'hypothèse initiale, le dispositif se révèle pertinent pour ces usages ciblés, notamment en phase d'analyse ou de médiation, mais moins lors de la genèse créative du projet où il se révèle utile comme outil de vérification. En tant qu'outil de médiation spatiale, elle favorise une compréhension élargie du projet en permettant des lectures immersives, à l'échelle de l'utilisateur, et en facilitant la communication d'intentions complexes.

Son intégration dans un contexte pédagogique suppose néanmoins des conditions structurelles. La qualité technique, la compatibilité interlogicielle, ainsi que la formation des étudiants à l'usage de ces dispositifs apparaissent comme des prérequis à leur mise en œuvre effective.

Vers une configuration critique de l'hypothèse initiale

La réflexion critique issue de cette recherche permet d'affirmer que l'hypothèse de départ est globalement validée, mais dans une acceptation plus complexe que prévu. La maquette augmentée agit comme un révélateur de tensions pédagogiques, et son potentiel ne peut se déployer qu'au prix d'une intégration critique, située et accompagnée d'une véritable réflexion sur les pratiques contemporaines de transmission du projet. Elle ne remplace pas les outils traditionnels, mais les réinterroge dans leur usage et leur temporalité. Elle invite à réarticuler représentation, récit et expérimentation, dans un mouvement dialectique entre le tangible et le virtuel.

Ainsi, loin d'être une solution universelle ou un gadget spectaculaire, la réalité augmentée constitue un révélateur des tensions qui traversent aujourd'hui l'enseignement du projet : entre tradition et innovation, entre transmission artisanale et médiation numérique, entre expérimentation sensible et démonstration technique. Elle n'est pas, en soi, porteuse de réforme pédagogique ; elle devient signifiante lorsqu'elle s'inscrit dans une dynamique réflexive qui interroge l'apprentissage et la capacité à se projeter dans un contexte académique en mutation. En ce sens, cette recherche permet d'affirmer que l'intérêt de tels dispositifs ne réside pas dans leur effet de nouveauté, mais dans la capacité des pédagogues à en faire simultanément un levier critique situé et un catalyseur de réflexion sur les modalités contemporaines de l'enseignement du projet. Son potentiel ne réside pas dans sa seule technicité, mais dans la manière dont elle est appropriée, détournée, et ancrée dans des pratiques pédagogiques attentives aux enjeux épistémologiques et critique de la formation architecturale. C'est dans cet usage critique, situé et potentiellement collaboratif que réside sa plus grande promesse : non pas transformer l'enseignement par une sur-technologisation, mais élargir les façons de penser, représenter et de transmettre l'architecture.

Perspectives

Prolongeant les réflexions précédentes, cette section explore les pistes ouvertes par l'intégration de la réalité augmentée dans les dispositifs pédagogiques. Loin de se limiter à une preuve de concept, les enseignements tirés valident l'idée que cette hybridation entre maquette physique et technologie immersive constitue un levier fertile pour reconfigurer les pratiques d'enseignement en architecture.

Toutefois, il est important de préciser que l'expérimentation présentée repose sur une démonstration ponctuelle, réalisée à un moment donné de l'état d'avancement du projet. Cette approche a permis de capter un instantané du site et de sa représentation, offrant un outil figé, mais pertinent. Par ailleurs, il convient de souligner que la mise en œuvre de telle démarche sur un modèle entièrement conçu sous un logiciel tel que SketchUp s'avèrerait plus aisée, notamment en termes de précision, de flexibilité d'intervention et de manipulation ultérieure des données.

Cela dit, bien que cette méthode facilite certains aspects techniques, il est important de rappeler que la réalisation d'une maquette physique reste une étape indispensable dans le processus pédagogique. En ce sens, augmenter une maquette existante prend généralement moins de temps que de modéliser entièrement un site sous SketchUp, une tâche longue et exigeante en termes de précision et de détail. Ainsi, bien que SketchUp offre des avantages de flexibilité, l'augmentation d'une maquette réelle demeure une solution plus rapide et directement connectée à l'expérience matérielle et contextuelle du projet.

Amélioration technique et ergonomique de l'outil

L'outil, dans son état actuel, présente des failles techniques notables, notamment en termes de résolution graphique et d'ergonomie. Les entretiens convergent sur la nécessité de renforcer la qualité des captures numériques pour garantir la lisibilité des modèles. Dans l'optique de rester sur des outils accessibles à tous, il serait pertinent de continuer à utiliser les fonctions de scan Lidar disponibles sur certains smartphones récents. Toutefois, pour optimiser les résultats, il est indispensable d'assurer une grande qualité initiale de la maquette physique, en veillant à sa précision, sa propreté et son niveau de détail.

Le processus de numérisation devrait être réalisé dans des conditions lumineuses idéales : un éclairage homogène, évitant les ombres portées et les reflets, ainsi qu'un fond neutre permettant de bien détacher la maquette de son environnement. Cette attention portée à la maquette initiale et aux conditions de numérisation est une condition essentielle pour assurer la qualité et la pertinence de l'expérience de réalité augmentée.

Par ailleurs, il conviendrait d'envisager une réflexion plus large sur l'interface utilisateur et la navigation au sein des modèles augmentés. Une ergonomie repensée, intégrant des gestes intuitifs, une hiérarchisation claire des calques d'information et des options de personnalisation selon les usages (analyse, présentation, documentation), permettrait de décupler la fluidité de l'expérience. Une telle amélioration technique, bien que discrète, pourrait transformer l'outil en véritable environnement d'exploration, facilitant l'appropriation critique du projet par ses utilisateurs.

Multiplication des usages pédagogiques et communicationnels

Dans une perspective d'émancipation pédagogique, il est primordial que l'étudiant reste acteur de son apprentissage. Comme le rappelle Pascal Noé, la maquette augmentée doit être ne doit pas être un simple outil de visualisation passive, mais un support d'exploration et d'expérimentation critique. Pour favoriser cette dynamique, il serait pertinent de mettre en place des ateliers où les étudiants construiraient eux-mêmes leurs scénarios d'analyse contextuelle : simulation d'ensoleillement, test d'insertion à l'échelle du quartier, etc.

En parallèle, la réalité augmentée pourrait accompagner l'évolution des projets tout au long du quadrimestre. Chaque étudiant enrichirait progressivement ses analyses du site et du contexte, documentant les ajustements apportés en réponse aux critiques intermédiaires ou aux évolutions programmatiques. Cette documentation dynamique offrirait non seulement un support de réflexion active pendant la phase de conception, mais deviendrait également un outil précieux pour la communication lors des jurys.

Comme le suggèrent monsieur Gena et madame Frisenna, une présentation immersive du projet, jalonnée de versions augmentées du projet à différents stades de développement, favoriserait une meilleure compréhension spatiale et contextuelle. De plus, il serait pertinent, comme le propose François Gena, d'extraire à des moments clés du processus de conception des rendus finaux figés, de haute qualité graphique. Cette approche combinée, articulant exploration immersive, suivi critique et rendu qualitatif, permettrait de valoriser l'ensemble du travail conçu par les étudiants et d'enrichir la portée médiatique de leurs projets.

Préparation du jury grâce aux maquettes numérisées

La suggestion formulée par Maxime Coq d'offrir aux jurys un accès anticipé à une version numérisée et augmentée de la maquette de contexte constitue une avancée prometteuse, à la fois sur le plan logistique, critique et pédagogique. En permettant aux membres du jury de découvrir virtuellement le site, ses caractéristiques, et les analyses choisies par les étudiants en amont de la présentation, cette médiation anticipée réduit le temps d'appropriation du contexte le jour du jury. Elle crée ainsi les conditions d'un dialogue plus exigeant, où les questions peuvent se concentrer sur l'essentiel : la pertinence du propos architectural de l'étudiant, et donc de l'analyse critique des propositions architecturales.

Au-delà de l'efficacité pédagogique, cette proposition ouvre également une autre perspective, celle d'une mémoire vivante des projets. Le développement d'un protocole de captation et d'archivage des présentations augmentées permettrait de constituer une base documentaire interactive et durable, à même de valoriser les travaux des étudiants et de témoigner de la vitalité pédagogique de l'institution. Chaque projet présenté deviendrait ainsi une expérience immersive consultable, un vecteur de transmission et une vitrine des compétences à la fois conceptuelles et techniques développées dans le cadre de la formation architecturale.

Au fond, cette proposition s'inscrit dans une logique de modernisation des dispositifs de présentation, où l'image figée cède le pas à une forme de narration dynamique continue. Elle anticipe une évolution de la posture du jury lui-même, appelé non plus seulement à juger, mais à entrer dans un processus de compréhension partagée du projet. En cela, la maquette augmentée agit comme un intercesseur spatial et critique, capable de soutenir le débat architectural tout en revalorisant le travail de l'étudiant dans sa durée, sa densité et sa complexité contextuelle.

Accompagnement institutionnel et formation

L'intégration effective de ces technologies dans l'enseignement architectural nécessite un soutien institutionnel fort. Afin de garantir une acculturation technique homogène, des modules de formation pratique et des certifications internes pourraient être proposés aux étudiants et enseignants. Un dispositif de suivi d'évaluation de ces nouvelles pratiques pourrait également être mis en place, s'appuyant sur des retours d'expériences pour ajuster les outils pédagogiques.

Dans cette dynamique, il serait également judicieux de créer un pôle de compétences dédié à la médiation numérique, composé d'enseignants référents et de techniciens spécialisés. Ce pôle pourrait jouer un rôle de relais entre les avancées technologiques et les réalités pédagogiques du terrain, en accompagnant les ateliers dans l'intégration progressive d'outils immersifs. Il pourrait également favoriser l'émergence de nouvelles recherches doctorales, développer des guides méthodologiques, et organiser des temps d'échange inter-ateliers pour mutualiser les retours d'expérience. Ainsi, l'institution se doterait non seulement d'une structure d'appui à l'innovation, mais également d'un espace de réflexion collective sur les transformations en cours dans l'enseignement du projet architectural.

Bien entendu, une telle organisation relève d'une vision résolument utopique de l'institution universitaire, où les moyens humains, techniques et temporels seraient pleinement alignés avec les ambitions pédagogiques. Mais c'est précisément en esquisant ces horizons désirables que l'on nourrit une pensée critique de l'existant et que l'on ouvre la voie à des évolutions structurelles. L'utopie, ici, n'est pas une fin en soi, mais une méthode pour penser le changement, pour imaginer des dispositifs capables de réconcilier l'innovation technologique avec la mission émancipatrice de l'enseignement supérieur.

En conclusion, la réalité augmentée constitue un vecteur d'innovation pédagogique majeur pour l'enseignement de l'architecture. Toutefois, pour en exploiter pleinement les potentialités, il est nécessaire d'envisager son développement dans une logique critique, exigeante et adaptée aux enjeux contemporains de la formation architecturale, en articulant innovation technologique, exploration créative et rigueur didactique. Elle ne doit pas être perçue comme une fin en soi, mais comme un levier parmi d'autres pour enrichir les pratiques existantes, à condition qu'elle soit pensée dans un cadre pédagogique réfléchi. C'est à cette condition qu'elle pourra véritablement transformer l'expérience d'apprentissage, sans en effacer la dimension sensible, collective et contextuelle primordiale en architecture.

Table des illustrations

- Figure 1. **Milgram, P., & Kishino, F.** (1994). *A taxonomy of mixed reality visual displays*. IEICE Transactions on Information and Systems, E77-D(12), 1321–1329. The Metropolitan Museum of Art. (n.d.). *Model bakery and brewery from the tomb of Meketre* [Photographie]. <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/544258>
- Figure 2. **Lallo, A.** (2021, 18 janvier). “Il modello in legno della Basilica di San Pietro del Sangallo” [Photographie]. AntonellaLalloLife. <https://antonellalolife.wordpress.com/2021/01/18/il-modello-in-legno-della-basilica-di-san-pietro-del-sangallo/>
- Figure 3. Musée d'Orsay. (n.d.). *Opéra de Paris, maquette de la coupe longitudinale* [Maquette]. <https://www.musee-orsay.fr/fr/oeuvres/opera-de-paris-maquette-de-la-coupe-longitudinale-89419>
- Figure 4. Staatliche Museen zu Berlin. (2023, 9 octobre). *1963 – Mies van der Rohe präsentiert den Vorentwurf für die Neue Nationalgalerie* [Photographie de maquette]. Blog der Staatlichen Museen zu Berlin. <https://blog.smb.museum/1963-mies-van-der-rohe-praesentiert-den-vorentwurf-fuer-die-neue-nationalgalerie/>
- Figure 5. Centre Pompidou. (2015). *Maquette de la chapelle Notre-Dame-Du-Haut* [Photographie]. Journal des Femmes. <https://deco.journaldesfemmes.fr/architecture/1318027-le-corbusier-expo-centre-pompidou/1318736-chapelle-notre-dame-du-haut-le-corbusier>
- Figure 6. Autodesk. (2021, 13 octobre). *Inside the Leighton Asia Hong Kong Airport expansion project*. <https://www.autodesk.com/design-make/articles/leighton-asia-hong-kong-airport>
- Figure 7. The VR Shop. (2021, 21 décembre). *The Sword of Damocles (1968)* [Photographie]. <https://www.virtual-reality-shop.co.uk/the-sword-of-damocles-1968/The VR Shop>
- Figure 8. **Lannes, P.** (2012, 22 février). *Les défis de la réalité augmentée dans les prochaines générations d'interfaces utilisateur* [Photographie]. <https://www.pierre-lannes.fr/les-defis-de-la-realite-augmentee-dans-les-prochaines-generations-dinterfaces-utilisateur/>
- Figure 9. iPhon.fr. (2017, 20 décembre). *La Réalité Augmentée ARkit améliorée se dévoile dans Pokémon GO sur iPhone* [Photographie]. <https://www.iphon.fr/post/realite-augmentee-amelioree-pokemon-go-jeu-iphone-894737iPhon.fr>
- Figure 10. **Toute La Culture.** (2020, 24 juillet). *La réalité augmentée pour le surréalisme au musée Dalí Paris* [Photographie]. <https://toutelaculture.com/arts/galerie-arts/la-realite-augmentee-pour-le-surrealisme-au-musee-dali-paris/>
- Figure 11. **H. Seichter**, Sketchand+ collaborative Augmented Reality sketching, Proceedings of the Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2003), in A. Choutgrajank, E. Charoensilp, K. Keatruangkamala and W. Nakapan (eds), 18-20 October, Bangkok, Thailand, 209-219. (2003).
- Figure 12. https://www.researchgate.net/publication/231514051_A_Taxonomy_of_Mixed_Reality_Visual_Displays
- Figure 13. (Gauche) **Schubert, G., Anthes, C., Kranzlmüller, D. and Petzold, F.**: From Physical to Virtual: RealTime Immersive Visualisations from an Architect's Working Model. In CONVR Proceedings, Taipei, Taiwan, 417–426 (2012).
(Droite) **Wang, X.**: Agent-based Augmented Reality System For Urban Design: Framework And Experimentation. In Proceedings Of The 12th International Conference On Computer-Aided Architectural Design Research In Asia. Nanjing, China, 561–568 (2007)

- Figure 14. **Calixte, X., & Leclercq, P.** (2017). *Nouvelles pratiques communicationnelles en co-conception synchrone. Discussion sur 4 situations d'usage d'espaces de réalité augmentée*. LUCID, Université de Liège. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/213663>
- Figure 15. **Carlo, A.-L.** (2017, 27 mai). *La réalité augmentée séduit aussi les architectes*. Le Monde. https://www.lemonde.fr/m-styles/article/2017/05/27/la-realite-augmentee-seduit-aussi-les-architectes_5134870_4497319.html
- Figure 16. **Coop Himmelb(l)au.** (2021, 10 octobre). *Design Studio – Virtual and Augmented Reality in Architectural Practice* [Vidéo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=gN0WrpYFUjc>
- Figure 17. **Agora Bordeaux.** (2023). *Augmenting the Invisible* [Installation photographique]. <https://www.agorabordeaux.fr/programmes/augmenting-the-invisible/>
- Figure 18. **Dezeen.** (2016, 3 août). *Greg Lynn uses Microsoft HoloLens to augment architecture models in Venice Biennale exhibition*. <https://www.dezeen.com/2016/08/03/microsoft-hololens-greg-lynn-augmented-realityarchitecture-us-pavilion-venice-architecture-biennale-2016/>
- Figure 19. **Dubois, S., Vanhellemont, Y., & De Bouw, M.** (s.d.). *Modèle d'une maquette BIM à partir d'un relevé au scanner laser* [Capture d'écran]. Buildwise. https://www.researchgate.net/publication/328382991_Le_releve_3D_a_l'heure_du_BIM_-_Capturer_la_realite_en_haute_definition
- Figure 20. **Gough, K. M.** (2011, 28 juillet). *Ronchamp - Notre Dame du Haut* [Photographie]. Flickr. <https://www.flickr.com/photos/kmgough/5985880094/>
- Figure 21. **Kwok, A. G., & Grondzik, W. T.** (2018). *The Green Studio Handbook: Environmental Strategies for Schematic Design* (2e éd.). Routledge.
- Figure 22. **Light ZOOM Lumière.** (2019, 26 juin). *Tutoriel DIALux evo : simulation d'éclairage naturel* [Capture d'écran]. <https://www.lightzoomlumiere.fr/article/tutoriel-dialux-evo-simulation-eclairage-naturel/>
- Figure 23. Interface Scaniverse avec "Mesh"
- Figure 24. Interface Scaniverse avec "Large Object"
- Figure 25. Configuration du "Color Space" en "Linear dans Unity
- Figure 26. Fenêtre d'ajout " Add Web Exporter »
- Figure 27. Configuration des boutons dans Unity
- Figure 28. Interface Export Info de Needle

Bibliographie

Article de revue :

- Alkhatatbeh, B. J., & Asadi, S. (2021, janvier). Role of architectural design in creating circadian-effective interior settings. *Energies*, 14(20), 6731. <https://doi.org/10.3390/en14206731>
- Bédouret, D., Chalmeau, R., Vergnolle-Mainar, C., Julien, M. P., Léna, J.-Y., & Calvet, A. (2020, 10 novembre). La maquette, un outil au service d'une éducation aux risques. *Mappemonde. Revue trimestrielle sur l'image géographique et les formes du territoire*, (129). <https://doi.org/10.4000/mappemonde.4572>
- Darbari Kaul, R., Duong, C., Ma, J., Sayyar, S., Wallace, G., Dunn, M., Cheng, K., & al. (2024, 27 décembre). A comparison of the accuracy and feasibility of a low-cost mobile application versus higher-cost handheld 3D scanner for digital ear prosthetics. *ANZ Journal of Surgery*. <https://doi.org/10.1111/ans.19374>
- Dunston, P. S., & Wang, X. (2005). Mixed reality-based visualization interfaces for architecture, engineering, and construction industry. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(12), 1301–1309. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2005\)131:12\(1301\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2005)131:12(1301))
- Fisher, P., & Steane, M. A. (2011). The architecture of light: Recent approaches to designing with natural light. *Architectural Research Quarterly*, 15(4), 377–379. <https://doi.org/10.1017/S135913551200019X>
- Fleury, P., & Madeleine, S. (2007). Réalité virtuelle et restitution de la Rome antique du I^{er} siècle après J.-C. *Histoire urbaine*, 18(1), 157–165. <https://doi.org/10.3917/rhu.018.0157>
- Fleury, P. (2010). La réalité virtuelle et son intégration dans un projet. *Nouvelles de l'archéologie*, 122(122), 29–33. <https://doi.org/10.4000/nda.1257>
- Fonseca Escudero, D., Redondo Domínguez, E., & Valls, F. (2016, 15 janvier). Motivación y mejora académica utilizando realidad aumentada para el estudio de modelos tridimensionales arquitectónicos. *Education in the Knowledge Society (EKS)*, 17(1), 45–64. <https://doi.org/10.14201/eks20161714564>
- Hervy, B., Laroche, F., Kerouanton, J.-L., Bernard, A., Courtin, C., Guillet, B., D'haene, L., & Waels, A. (2015, 1^{er} janvier). Museum augmented interface for historical scale models: Towards a new way for cultural heritage promotion. *International Journal of Virtual Reality*, 15(1), 3–9. <https://doi.org/10.20870/IJVR.2015.15.1.2863>
- Hopkins, O. (2023). Shifting contexts: Liam Young's prototypes of architectural futures. *Architectural Design*, 93(6), 122–127. <https://doi.org/10.1002/ad.3002>
- Jacobs, J. (1958, mai). The miniature boom: The growing demand for precision models has propelled the architectural modelmaker into the machine age. *The Architectural Forum*, 108(5), 106–111.
- Jacquot, K., Halin, G., & Chevrier, C. (2020, 12 juin). Numérisation et valorisation de maquettes anciennes de villes. *In Situ. Revue des patrimoines*, (42). <https://doi.org/10.4000/insitu.27738>
- Kaheneko, O., (2021, 1^{er} janvier). Research on application of natural light in modern architecture design. *The International Journal of Science & Technology*. https://www.academia.edu/79325607/Research_on_Application_of_Natural_Light_in_Modern_Architecture_Design
- Leslie, R. P. (2003, 1^{er} février). Capturing the daylight divided in buildings: Why and how? *Building and Environment*, 38(2), 381–385. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00118-X](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00118-X)
- Mantegna, M., & Rinesi, M. (2023). The anti-metaverse: Multispace and the intersections of reality. *Architectural Design*, 93(6), 104–111. <https://doi.org/10.1002/ad.3000>
- Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Transactions on Information and Systems*, E77-D(12), 1321–1329.
- Negarestan, A. (2025). Natural light in interior architecture: Enhancing mental health. *Management Strategies and Engineering Sciences*, 7(3), 66–76. <https://doi.org/10.61838/msesj.7.3.7>
- Quantin-Biancalani, S. (2020, 15 juin). Pour une historiographie de la maquette d'architecture (XIX^e–XX^e siècles). *Livraisons de l'histoire de l'architecture*, (39). <https://doi.org/10.4000/lha.1541>
- Szuta, A., & Taraszkiewicz, A. (2020). The role of traditional architectural models in the first stages of education. *World Transactions on Engineering and Technology Education*, 18(2), 177–182.
- Tahan, L. (2023). The home as an infinite screen. *Architectural Design*, 93(6), 22–29. <https://doi.org/10.1002/ad.2990>

- **Wang, X.** (2009). Augmented reality in architecture and design: Potentials and challenges for application. *International Journal of Architectural Computing*, 7(2), 309–326.
<https://doi.org/10.1260/147807709788921985>

Actes de colloque et conférence :

- **Milovanovic, J., Moreau, G., Siret, D., & Miguet, F.** (2017). Virtual and augmented reality in architectural design and education. In G. Çağdaş, M. Özkar, L. F. Gül, & E. Güner (Eds.), *CAAD Futures 2017: 17th International Conference, Istanbul, Turkey* (Communication déposée). HAL. <https://hal.science/hal-01586746>
- **Schnabel, M. A., Wang, X., Seichter, H., & Kvan, T.** (2007). From virtuality to reality and back [Communication orale]. *International Association of Societies of Design Research Conference*, Hong Kong.
<https://www.researchgate.net/publication/30874791> [From Virtuality to Reality and Back](https://www.researchgate.net/publication/30874791)
- **Speicher, M., Hall, B. D., & Nebeling, M.** (2019). What is mixed reality? In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1–15). Association for Computing Machinery.
<https://doi.org/10.1145/3290605.3300767>
- **Tuzun Canadinc, S., & Yan, W.** (2022). 3D-model-based augmented reality for enhancing physical architectural models. Dans *eCAADe 2022: Co-creating the Future – Inclusion in and through Design* (pp. 495–504). eCAADe.
<https://www.researchgate.net/publication/364309370> [Wind Comfort Analysis and Design of Small Scale Elements for Improving Urban Space Livability A case study in Tallinn Estonia](https://www.researchgate.net/publication/364309370)

Littérature grise (prépublications, archives ouvertes) :

- **Calixte, X., & Leclercq, P.** (2017). *Nouvelles pratiques communicationnelles en co-conception synchrone* [Communication déposée]. ORBi – Université de Liège.
<https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/222134/1/20170717%20Calixte-Leclercq.pdf>
- **Chopin, F., Serero, D., & Vicarini, E.** (2020). *Conception en réalité virtuelle d'un projet d'architecture*. HAL. <https://hal.science/hal-02915604>
- **Dodion, H., & Parotte, C.** (2020–2021). *Préparer et mener un entretien compréhensif*. Dans C. Parotte & C. Fallon (Éds.), *Cours méthodologie en science politique* (chap. 4). Université de Liège.
- **Estévez, D.** (2014). Chapitre 5. Dialogue entre maquette et modèle en architecture. In F. Lévy (Dir.), *Les modèles, possibilités et limites* (pp. 77–86). Éditions Matériologiques.
<https://doi.org/10.3917/edmat.levy.2014.01.0077>
- **Fleury, P., & Madeleine, S.** (2016). De la maquette de Paul Bigot à la maquette virtuelle de la Rome antique. In *Figurations de la cité, actes de la Journée d'étude du 23 novembre 2016* (pp. 29–34). Paris, France : Académie d'Architecture. <https://hal.science/hal-01717717>
- **Keshavarzi, M., Caldas, L., & Santos, L.** (2021, 6 février). *RadVR: A 6DOF virtual reality daylighting analysis tool*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.01652>
- **Laroche, F., & Quantin, M.** (s. d.). *Numérisation 3D, modélisation virtuelle et impression 3D de la salle à manger de Néron à Rome*. ResearchGate.
<https://www.researchgate.net/publication/316232895> [Numerisation 3D modelisation virtuelle et impression 3D de la salle a manger de Neron a Rome](https://www.researchgate.net/publication/316232895)
- **Lo Buglio, D., & De Luca, L.** (2012). Caractérisation sémantique de numérisations 3D d'objets architecturaux : une piste de recherche entre “complexité” et “intelligibilité”. In *Complexité(s) des modèles de l'architecture numérique* (pp. 129–140). Presses Universitaires de Nancy.
<https://www.researchgate.net/publication/321075442> [Caracterisation semantique de numerisations 3D d'objets architecturaux Une piste de recherche entre complexite et intelligibilite](https://www.researchgate.net/publication/321075442)
- **Iuliano, L., & Minetola, P.** (s. d.). *Rapid manufacturing of sculptures replicas: A comparison between 3D optical scanners*. ResearchGate.
<https://www.researchgate.net/publication/228906890> [Rapid manufacturing of sculptures replicas a comparison between 3D optical scanners](https://www.researchgate.net/publication/228906890)
- **Macher, H.** (2017). *Du nuage de points à la maquette numérique de bâtiment : reconstruction 3D semi-automatique de bâtiments existants* [Thèse de doctorat, Université de Strasbourg]. HAL.
<https://theses.hal.science/tel-01557523>
- **Mann, S., Furness, T., Yu, Y., Iorio, J., & Wang, Z.** (2018). *All reality: Virtual, augmented, mixed (X), mediated (X,Y), and multimeditated reality*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arxiv.1804.08386>

- **Symeonidou, I., Kalaouzis, G., & Efstathiadis, A.** (2023). *Massing and skin: A pedagogical experiment with physical and digital design media*. In P. Lizancos Mora, D. L. Viana, F. Morais, & J. V. Vaz (Eds.), *Formal methods in architecture* (pp. 375–387). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2217-8_21

Livre :

- **Cuttle, C.** (2007). *Lighting by design* (2e éd.). Oxford, Royaume-Uni : Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780080496122>
- **Fuchs, P.** (2016, 24 novembre). *Le traité de la réalité virtuelle – Volume 4*. World Federation of Science Journalists – Issuu. https://issuu.com/wfsj/docs/fuchs_le_traite_dela_realite_virtue
- **Kwok, A. G., & Grondzik, W.** (2018). *The green studio handbook: Environmental strategies for schematic design* (3e éd.). New York : Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315624327>
- **Steane, M. A.** (2012). *The architecture of light: Recent approaches to designing with natural light*. London : Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203715505>

Article de presse

- **Frearson, A.** (2016, 3 août). *Augmented reality will change the way architects work says Greg Lynn*. Dezeen. <https://www.dezeen.com/2016/08/03/microsoft-hololens-greg-lynn-augmented-realityarchitecture-us-pavilion-venice-architecture-biennale-2016/>

Média vidéo

- **Lingdotfbx.** (2020, 4 août). *Augmented reality for ARCHITECTS* [Vidéo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=heqD5X29tJs>
- **Tahan, L.** (2022). *Ciclo BLABLANIGHTS - Lucia Tahan, diseñadora de software VR* [Vidéo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=C-f7x1IS5Vo>
- **Vega, J.** (2023, 31 janvier). *How to 3D scan using Polycam tutorial* [Vidéo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=w4LSScFM1FM>
- **CHBL x THAD.** (2021, 8 janvier). *In only two days tomorrow will be yesterday. From AI to Decon* [Vidéo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=a45x6G3K8Tc>

Site internet :

- **Agora, biennale de Bordeaux Métropole.** (s. d.). *Augmenting the invisible | Agora, biennale de Bordeaux Métropole*. Consulté le 17 février 2025, sur <https://www.agorabordeaux.fr/programmes/augmenting-the-invisible/>
- **Barrachina, F.** (2023, 3 janvier). *Les 5 principes de base de l'étude de la lumière chez Dialux*. Consulté le 18 mars 2025, sur <https://faro.es/fr/blog/etude-lumiere-dialux/>
- **Carlo, A.-L.** (2017, 27 mai). *La réalité augmentée séduit aussi les architectes*. Le Monde. https://www.lemonde.fr/m-styles/article/2017/05/27/la-realite-augmentee-seduit-aussi-les-architectes_5134870_4497319.html
- **Coop Himmelb(l)au.** (s. d.). *Deep Himmelblau*. Consulté le 24 février 2025, sur <https://coop-himmelblau.at/method/deep-himmelblau/>
- **Coop Himmelb(l)au.** (s. d.). *Method*. Consulté le 24 février 2025, sur <https://coop-himmelblau.at/method/>
- **Lansard, M.** (2024, 15 mai). *Les meilleurs scanneurs 3D en 2024 pour chaque application*. Aniwa. Consulté le 14 avril 2025, sur <https://www.aniwaa.com/fr/guide-achat/scanners-3d/meilleur-scanner-3d/>

Intelligences artificielles

Cochez-la ou les cases des IA que vous avez mobilisés dans le cadre de ce travail, et explicitez-en l'usage que vous en avez-vous fait.

Typologie		Usage(s)
Aucune		
ChatGPT	X	Aide à la reformulation de phrase, aide à la synthétisation de texte, aide au codage dans Unity.
Deepl	X	Traduction des textes internationale
Google Translate	X	Traduction des textes internationale
Autres (à préciser) :	X	TurboScribe, aide à la retranscription d'audio dans le cadre des entretiens.