



Mémoire de Master en Architecture

Contribution de la réalité augmentée (RA) dans la prise de décision, dans le cas de réhabilitation d'un patrimoine historique dans le contexte HBIM

Par

JOMNI Ilyess

ENSA Paris-La Villette
144 Avenue de Flandre
75019 Paris, France

Décembre 2023

Résumé.

Au cœur de notre investigation réside l'énigme complexe portant sur l'apport substantiel de la Réalité Augmentée (RA) au processus de décision, en particulier dans le contexte délicat de la réhabilitation des édifices historiques à travers le prisme du Building Information Modeling historique (HBIM). Malgré des avancées notables, des lacunes essentielles perdurent, suscitant des interrogations substantielles qui imprègnent chaque étape de cette quête scientifique.

L'intégration de données authentiques dans les modèles BIM, jalon inaugural, requiert une attention méticuleuse. Comment instaurer un processus fluide et efficient visant à intégrer des données tangibles, telles que des photographies historiques ou des scans laser, dans un modèle BIM, afin de détecter des anomalies et d'orienter judicieusement le processus décisionnel ? L'établissement de normes et de procédures précises se profile comme impératif pour garantir cette intégration réussie.

L'exploration de techniques avancées pour la détection d'anomalies dans les édifices historiques, défi coriace, nécessite une réflexion approfondie. Comment développer des outils d'analyse automatisée, capitalisant sur la RA et le BIM, pour identifier avec efficacité les anomalies structurelles, architecturales ou historiques, tout en optimisant le temps et les ressources ? L'automatisation se dessine comme l'épicentre de cette recherche à la croisée des disciplines.

Enfin, la question cardinale demeure : comment les données émanant de la RA et du BIM influencent-elles véritablement le processus décisionnel lors de la restauration du patrimoine historique ? La mesure de l'impact de ces données sur la qualité des décisions et sur la préservation du patrimoine revêt une importance cruciale. L'élaboration de méthodologies rigoureuses pour évaluer l'efficacité de la RA et du BIM dans ce processus émerge comme une nécessité impérieuse.

Ainsi, l'intégration de la RA dans le contexte de la restauration du patrimoine historique au sein d'un environnement HBIM offre un potentiel considérable pour améliorer substantiellement le processus décisionnel. Toutefois, la résolution des lacunes persistantes et la réponse aux questions substantielles, telles que l'intégration de données authentiques, la détection d'anomalies et l'évaluation de l'impact sur le processus décisionnel, demeurent des axes de recherche primordiaux. Cette quête continue revêt une importance capitale pour garantir la préservation du patrimoine historique de manière précise et authentique, s'inscrivant ainsi dans une démarche scientifique cruciale dédiée à la compréhension et à la préservation méticuleuse de notre héritage culturel.

Mots clefs.

Réalité Augmentée (RA), Building Information Modeling (BIM), Building Information Modeling historique (HBIM), Aide à la décision, Réhabilitation de bâtiment historique,

Table des matières

Introduction Générale

1. Contexte Générale de l'étude
2. Problématique

Chapitre 1 : Contexte et enjeux de la restauration du patrimoine historique

1. Introduction au patrimoine historique et son importance culturelle
2. Les défis de la réhabilitation du patrimoine architectural
3. L'importance de la technologie dans la préservation du patrimoine

Chapitre 2 : La réalité augmentée comme outil d'aide à la décision en réhabilitation

1. Définition et concepts clés de la réalité augmentée
2. La RA dans le domaine de l'architecture
3. Les avantages de l'utilisation de la RA pour la prise de décision en réhabilitation

Chapitre 3 : L'intégration de la réalité augmentée dans le Building Information

Modeling historique (HBIM)

1. Compréhension du HBIM et son rôle dans la réhabilitation du patrimoine
2. Les synergies entre la RA et le HBIM
3. Cas d'étude illustrant l'intégration réussie de la RA dans le HBIM

Chapitre 4 : La prise de décision dans les projets architecturaux

1. Processus de décision en architecture
2. L'importance des décisions architecturales
3. Les défis de la prise de décision
4. La RA dans le Processus de décision en architecture :
5. Contribution de la RA dans la prise de décision dans les projets architecturaux :
6. Schéma global du Processus de Décision en Architecture avec la Contribution de la Réalité Augmentée (RA) dans la Réhabilitation des Bâtiments Historiques

Chapitre 5 : Applications de la réalité augmentée dans la réhabilitation du patrimoine

1. Visualisation des résultats potentiels de la réhabilitation
2. Historique des transformations
3. Simulation des matériaux et textures
4. Tests de conception en temps réel
5. Guides d'assemblage et d'installation
6. Documentation et suivi en temps réel
7. Formation et sensibilisation

Chapitre 6 : Études de cas et retours d'expérience

1. Présentation de cas concrets de réhabilitation utilisant la RA
2. Retours d'expérience des professionnels et des acteurs impliqués
3. Analyse des avantages et des limites de l'utilisation de la RA

Chapitre 7 : Perspectives futures et recommandations

1. Les avancées technologiques à venir dans le domaine de la RA
 2. Recommandations pour une utilisation optimale de la RA dans la restauration du patrimoine
 3. Les avantages à long terme de l'intégration de la RA dans le processus de restauration
-

Introduction Générale

Contexte général de l'étude

Le patrimoine historique, reflet palpable de nos racines culturelles, historiques et architecturales, représente une richesse inestimable pour les générations présentes et futures. Sa préservation et sa restauration sont des impératifs essentiels, demandant une approche respectueuse et éclairée, s'appuyant sur les avancées technologiques contemporaines.

La réhabilitation et la préservation du patrimoine historique sont des tâches complexes qui exigent une grande précision, un respect de l'authenticité et une prise de décision éclairée.

Dans ce contexte, la réalité augmentée (RA) a émergé comme une technologie prometteuse qui peut jouer un rôle essentiel dans la prise de décision, en particulier lorsqu'elle est associée à l'environnement Building Information Modeling (HBIM).

En effet, La réalité augmentée (RA) se profile comme un outil révolutionnaire dans le domaine de l'architecture, offrant un moyen innovant d'améliorer la prise de décision lors de la restauration des patrimoines historiques. En intégrant des éléments virtuels dans le monde réel, elle permet aux acteurs impliqués d'appréhender le projet de restauration sous des angles multiples et précis, contribuant ainsi à une compréhension approfondie et éclairée.

Dans le contexte du Building Information Modeling historique (HBIM), la RA joue un rôle crucial en facilitant la visualisation et l'interaction avec les modèles virtuels des structures historiques. En combinant les données historiques et les modèles 3D générés par HBIM avec la RA, les professionnels peuvent superposer des maquettes virtuelles sur les structures existantes, permettant une évaluation en temps réel des ajustements proposés.

Par exemple, lors de la restauration d'une cathédrale gothique, la RA peut être utilisée pour projeter virtuellement des éléments architecturaux tels que des arcs-boutants ou des vitraux, offrant ainsi une vision précise de leur apparence et de leur placement avant leur mise en œuvre. Cela permet aux restaurateurs et aux architectes de prendre des décisions éclairées sur les modifications à apporter, tout en respectant l'intégrité architecturale originale.

Autres exemples d'utilisation de la RA à cet effet :

1. Visualisation des résultats potentiels de la restauration :

- Les spécialistes de la restauration peuvent utiliser la RA pour visualiser virtuellement les différentes options de restauration.
- Ils peuvent superposer des modèles 3D représentant diverses approches de restauration sur la structure réelle, permettant ainsi une évaluation visuelle des résultats potentiels.

2. Historique des transformations :

- La RA peut afficher des calques virtuels représentant les différentes époques de l'histoire d'un bâtiment ou d'un monument.

- Cela permet aux décideurs de voir l'évolution du site au fil du temps et d'identifier les éléments d'origine à préserver ou à restaurer.

3. Simulation des matériaux et textures :

- En utilisant la RA, il est possible de simuler différents matériaux et textures sur les surfaces du bâtiment, aidant ainsi les décideurs à choisir les matériaux de restauration appropriés qui respectent l'authenticité et l'esthétique d'origine.

4. Tests de conception en temps réel :

- Les équipes de restauration peuvent tester différentes conceptions en temps réel en utilisant des maquettes virtuelles superposées à la structure réelle.
- Cela permet d'ajuster et de perfectionner les designs avant de les mettre en œuvre physiquement.

5. Guides d'assemblage et d'installation :

- La RA peut servir à fournir des guides visuels en temps réel pour l'assemblage et l'installation de pièces complexes lors de la restauration.
- Cela assure une mise en place précise et minimise les erreurs potentielles.

6. Documentation et suivi en temps réel :

- En utilisant des applications de RA, les équipes de restauration peuvent documenter leur travail en temps réel, en superposant des annotations, des photos et des notes virtuelles sur la structure.
- Cela facilite le suivi de l'avancement et assure la cohérence des travaux.

7. Formation et sensibilisation :

- La RA peut être utilisée pour former les équipes de restauration en simulant des scénarios de travail spécifiques, renforçant ainsi les compétences et la compréhension des protocoles de restauration.

Problématique

Malgré les avancées significatives, plusieurs lacunes et questions non résolues subsistent.

Intégration de données réelles dans les modèles BIM¹ : L'une des premières étapes cruciales dans la restauration du patrimoine historique est l'intégration de données réelles, telles que des photographies historiques ou des scans laser, dans les modèles BIM. Cette intégration est essentielle pour assurer la précision des modèles. Cependant, les méthodes pour effectuer cette intégration de manière efficace sont encore insuffisamment explorées. La question non résolue est de savoir comment créer un processus fluide d'intégration de données réelles dans

¹ "Fusion of BIM and Point Cloud Data for Building As-Built Modeling" (2015) par O. Turker et al. (Article sur l'intégration de données réelles dans les modèles BIM).

un modèle BIM, permettant de détecter des anomalies et d'orienter la prise de décision. Des normes et des procédures bien définies sont nécessaires pour garantir cette intégration réussie.

Analyse et détection des anomalies dans les bâtiments historiques² : Les bâtiments historiques présentent des caractéristiques uniques et des défis particuliers en matière de restauration. L'utilisation de la RA et du BIM pour la détection d'anomalies structurelles, architecturales ou historiques peut grandement faciliter le processus de prise de décision. Cependant, les techniques avancées de détection d'anomalies dans ce contexte spécifique sont encore peu explorées. La question non résolue est la suivante : comment développer des outils d'analyse automatisée qui permettent d'identifier ces anomalies de manière efficace, tout en économisant du temps et des ressources ? L'automatisation devrait être au cœur de cette recherche.

Prise de décision basée sur les données de RA-BIM³ : La RA et le BIM fournissent une abondance d'informations visuelles et structurelles, mais il y a un manque d'études approfondies sur la manière dont ces données influencent réellement les décisions prises lors de la restauration du patrimoine historique. Mesurer l'impact des données de RA-BIM sur la qualité des décisions et sur la préservation du patrimoine est essentiel. Il est impératif de développer des méthodologies pour évaluer l'efficacité de ces technologies dans le processus de prise de décision.

Par conséquent, l'intégration de la RA dans le contexte de la restauration du patrimoine historique dans un environnement HBIM offre un potentiel considérable pour améliorer la prise de décision. Cependant, pour exploiter pleinement cette technologie, il est essentiel de résoudre les lacunes existantes et de répondre aux questions non résolues, notamment celles liées à l'intégration de données réelles, à la détection d'anomalies, et à l'évaluation de l'impact sur la prise de décision. Cette recherche continue est cruciale pour garantir la préservation du patrimoine historique de manière précise et authentique.

Dans ce mémoire, nous explorerons ces applications de la RA dans le contexte du HBIM, en examinant de près comment cette technologie novatrice contribue et influence la prise de décision tout au long du processus de réhabilitation, en essayant dans la mesure du possible d'apporter une réponse aux lacunes et questions non résolues dans ce domaine :

- **Lacune** : Il y a un manque d'études sur la manière dont les informations fournies par la RA et le BIM influencent réellement les décisions prises lors de la réhabilitation du patrimoine historique.

² "Integration of augmented reality and BIM for facility management" (2014) de A. Barreto et al. (Article traitant de l'intégration de la RA et du BIM pour la gestion des installations - Analyse et détection des anomalies dans les bâtiments historiques).

³ "A Review of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations" (2014) de J. Y. Lee examine les technologies de réalité augmentée dans divers domaines et en particulier dans la prise de décision basée sur les données de RA-BIM.

- ***Question non résolue :*** Comment évaluer l'impact des données de RA-BIM sur la qualité des décisions de réhabilitation et sur la préservation du patrimoine ? Il faut mesurer l'efficacité de ces technologies.



Chapitre 1 : Contexte et enjeux de la restauration du patrimoine historique

1) Introduction au patrimoine historique et son importance culturelle

Le patrimoine historique, défini par l'UNESCO comme « *un héritage transmis de génération en génération, prend la forme de monuments, de sites, de traditions et d'expressions artistiques* ».

En tant que témoin concret du passé, il contribue à la compréhension de notre histoire collective.

Prenons par exemple la cathédrale Notre-Dame de Paris, dont l'incendie en 2019 a suscité une prise de conscience mondiale de l'importance de la préservation du patrimoine architectural. Sa structure gothique et ses éléments architecturaux uniques représentent un legs culturel irremplaçable.



La cathédrale Notre-Dame de Paris, en France. Images prises en juin/juillet 2019 des dommages causés à la cathédrale Notre-Dame, suite à l'incendie du 15 avril 2019. Paris, rives de la Seine

(Source : https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Cath%C3%A9drale_de_Reims_en_1914.jpg)

2) Les défis de la réhabilitation du patrimoine architectural

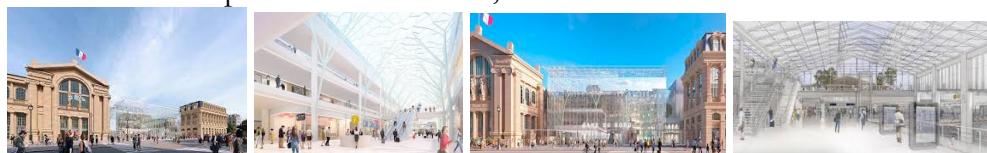
La réhabilitation du patrimoine architectural est confrontée à des défis multifacettes, dont beaucoup sont illustrés par le projet de restauration du Palais de Westminster à Londres.

Ce site emblématique, abritant le Parlement britannique, fait face à des problèmes structurels complexes, résultant à la fois de l'usure naturelle et de dommages causés par des événements historiques.

Les interventions précédentes, telles que les modifications apportées au XIX^e siècle par l'architecte Charles Barry, ajoutent une couche de complexité à la restauration.

Le défi financier associé à de tels projets est évident. La restauration du Palais de Westminster est estimée à des milliards de livres sterling, soulignant la nécessité d'un financement substantiel pour préserver ces monuments historiques.

Autre exemple : la rénovation de la Gare du Nord illustre les défis complexes liés à la modernisation des sites historiques majeurs au cœur des grandes villes, nécessitant une gestion habile des aspects architecturaux, financiers et sociétaux.



Projet de rénovation de la Gare du nord

Sources: <https://www.businessimmo.com/tag/jeux-olympiques-et-paralympiques-2024>
<https://www.lettreducheminot.fr/gares/projet-metamorphose-de-gare-nord/>

En effet, La rénovation de la Gare du Nord à Paris représente un projet ambitieux avec des défis architecturaux et financiers significatifs. Sur le plan architectural, l'équilibre entre la modernisation nécessaire pour répondre à l'augmentation du trafic et la préservation du caractère historique du site a été délicat. Les contraintes liées à la capacité et aux flux de passagers ainsi que la nécessité de respecter les normes de préservation du patrimoine ont également été des défis importants.

Du point de vue financier, le projet impliquait des investissements considérables, suscitant des négociations complexes entre les acteurs publics et privés. Le budget prévisionnel était estimé au départ à 600 millions d'euros. Son budget final est beaucoup moins ambitieux (50 millions euros).

Les discussions sur le partage des coûts, les responsabilités et les avantages potentiels ont été au cœur des enjeux financiers. De plus, le projet a rencontré des controverses et une opposition publique, alimentées par des préoccupations concernant l'impact sur le paysage urbain, la préservation du patrimoine, et les implications potentielles de l'implication du secteur privé.

De plus, la conformité aux normes modernes, notamment en matière de sécurité et d'accessibilité, tout en préservant l'authenticité architecturale, est une tâche délicate.

Ces défis mettent en lumière la nécessité de solutions novatrices, où ***la technologie peut jouer un rôle crucial***

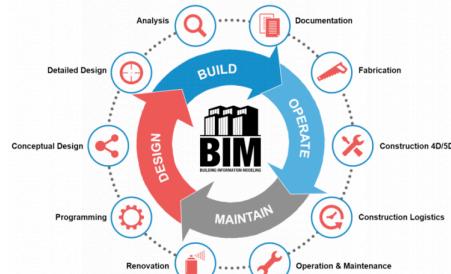
3) L'importance de la technologie dans la préservation du patrimoine

La technologie est devenue une alliée essentielle dans la préservation du patrimoine, comme en témoigne le projet de conservation du site archéologique de Pompéi en Italie.

La combinaison de la **modélisation 3D**, de la **télédétection** et de la **réalité augmentée** permet une documentation exhaustive des ruines tout en respectant l'intégrité du site.

La modélisation 3D de structures vulnérables, comme les fresques murales, offre une alternative précieuse aux méthodes traditionnelles de conservation.

Le Building Information Modeling (BIM) a également été largement utilisé dans la restauration du patrimoine.



Building Information Modeling (BIM)

Source : <https://www.villiers94.fr/actualite/le-bim-en-10-questions/>

Par exemple, dans la rénovation du Musée d'Art Moderne de New York (MoMA), le BIM a facilité la coordination entre les équipes de conception et de construction, contribuant ainsi à la préservation de l'intégrité architecturale du bâtiment.

Cependant, c'est **la réalité augmentée** (RA) qui émerge comme une technologie transformative, intégrant le virtuel au réel pour fournir des expériences immersives.



Application de la RA - Art graphique et Patrimoine

Source : <https://www.artgp.fr/-applications-realite-augmentee-.html?lang=fr>

À titre d'exemple, l'application « Wonders of the 1893 World's Fair » utilise la réalité augmentée pour ramener à la vie des bâtiments disparus de l'Exposition universelle de Chicago. Cette application offre une vision tangible de l'histoire, démontrant le **potentiel de la RA dans la préservation du patrimoine**.

En résumé, ces exemples concrets illustrent comment la technologie, qu'il s'agisse de modélisation 3D, de BIM ou de réalité augmentée, joue un rôle déterminant dans la préservation du patrimoine historique.

Ces outils fournissent des moyens novateurs de documenter, de restaurer et de communiquer l'importance culturelle des structures anciennes.

La prochaine section de ce chapitre se concentrera spécifiquement sur la contribution de la réalité augmentée dans le contexte particulier de la réhabilitation de la façade d'entrée principale de l'Hôpital du Kremlin-Bicêtre



État de l'art - Méthodologie d'exploration de la réalité augmentée dans la réhabilitation architecturale

□ Introduction :

Dans le domaine de la réhabilitation architecturale, l'intégration de la réalité augmentée (RA) offre des perspectives novatrices pour améliorer les processus de prise de décision et de préservation du patrimoine bâti. Afin d'explorer en profondeur cette thématique, nous avons structuré notre étude en deux chapitres principaux.

D'abord Le **Chapitre 2** qui se concentre sur « La réalité augmentée comme outil d'aide à la décision en réhabilitation ».

Ensuite le **Chapitre 3**, qui se focalise sur « L'intégration de la réalité augmentée dans le Building Information Modeling historique (HBIM) ».

La réalité augmentée (RA) est une technologie en constante évolution qui suscite un intérêt croissant dans de nombreux domaines, y compris l'architecture et la réhabilitation des bâtiments historiques. Pour éclairer ce sujet complexe et dynamique, nous avons entrepris une démarche académique rigoureuse, structurée selon neuf étapes clés.

Faire le lien entre la démarche et les chapitres.

□ Démarche

1. Définir le champs de la RA :

Nous commençons par définir clairement le champ de la réalité augmentée, en examinant ses fondements théoriques, ses principes de fonctionnement et ses applications dans le domaine de la réhabilitation architecturale.

2. Revue de la littérature :

Nous procédons ensuite à une revue approfondie de la littérature existante sur la réalité augmentée, en explorant les travaux antérieurs, les études de cas et les recherches académiques pertinentes.



3. Analyse des publications clés :

Nous identifions et analysons les publications clés dans le domaine de la réalité augmentée appliquée à la réhabilitation des bâtiments historiques, en mettant en lumière les avancées significatives, les tendances émergentes et les défis à relever.

4. Synthèse des informations :

Nous synthétisons les informations recueillies à partir de la revue de la littérature et de l'analyse des publications clés, en identifiant les thèmes récurrents, les approches méthodologiques et les résultats significatifs.

5. Identification des acteurs clés :

Nous identifions les acteurs clés dans le domaine de la réalité augmentée pour la réhabilitation des bâtiments historiques, notamment les chercheurs, les développeurs de technologies et les praticiens de l'architecture.

6. Analyse comparative :

Nous procémons à une analyse comparative des différentes approches, technologies et applications de la réalité augmentée dans le contexte de la réhabilitation architecturale, en mettant en évidence les forces et les faiblesses de chaque méthode.

7. Évaluation des applications et des cas d'utilisation :

Nous évaluons les applications existantes et les cas d'utilisation de la réalité augmentée dans la réhabilitation des bâtiments historiques, en examinant les bénéfices, les défis et les leçons apprises.

8. Examen des implications sociales, éthiques et juridiques :

Nous examinons les implications sociales, éthiques et juridiques de l'utilisation de la réalité augmentée dans le contexte de la réhabilitation architecturale, en abordant des questions telles que l'accessibilité, la vie privée et la préservation du patrimoine.

9. Synthèse et conclusions :

Enfin, nous synthétisons les résultats de notre étude et formulons des conclusions clés sur le rôle de la réalité augmentée comme outil d'aide à la décision en réhabilitation architecturale, en mettant en évidence ses avantages, ses limites et ses implications pour l'avenir.

En suivant cette démarche méthodique, notre objectif est de fournir une compréhension approfondie du contexte, du développement, des applications et des implications de la réalité augmentée dans le domaine de l'architecture et sa contribution dans la prise de décision, dans le cas de réhabilitation d'un patrimoine historique dans le contexte HBIM



Chapitre 2 : La réalité augmentée comme outil d'aide à la décision en réhabilitation

1. Définir le champ de la réalité augmentée :

La réalité augmentée (RA) s'est progressivement imposée comme une technologie révolutionnaire dans le domaine de l'architecture, offrant de nouvelles perspectives pour la conception, la visualisation et la réhabilitation des bâtiments historiques. Pour comprendre pleinement son impact et ses applications dans ce contexte, il est essentiel de se pencher sur les définitions et les concepts clés de la RA, ainsi que sur les recherches et les études de cas qui mettent en évidence ses avantages et ses limitations.

L'ouvrage de [Caenen et Brémond \(2018\)](#) offre une perspective approfondie sur la réalité augmentée, décrivant ses fondements théoriques, ses principes de fonctionnement et ses applications pratiques dans divers domaines, y compris l'architecture.

En se basant sur cette référence, il est possible de comprendre la RA comme un système interactif qui superpose des éléments virtuels, tels que des modèles 3D ou des informations contextuelles, sur le monde réel, créant ainsi une expérience enrichie pour l'utilisateur.

La réalité augmentée (RA) est une technologie qui superpose des éléments virtuels sur le monde réel, offrant ainsi une perception enrichie de l'environnement physique.

Définition et concepts clés de la réalité augmentée

La réalité augmentée (RA) est une technologie immersive qui superpose des éléments virtuels, tels que des images, des informations ou des modèles 3D, sur le monde réel en temps réel.

Elle se distingue de la réalité virtuelle (RV) en intégrant des éléments virtuels dans l'environnement physique existant plutôt que de créer un monde virtuel isolé. Les principaux concepts clés de la RA incluent :

a. Superposition d'informations :

La RA permet de superposer des informations virtuelles sur des éléments physiques, créant ainsi une expérience enrichie.

Exemple : Utiliser une tablette équipée de RA pour superposer des plans 3D d'une nouvelle structure directement sur le site en construction, permettant aux architectes de visualiser l'intégration avant même le début des travaux.

b. Fusion du virtuel et du réel :

La RA intègre des éléments virtuels dans le monde réel, créant une fusion harmonieuse entre la conception numérique et l'environnement physique.

Exemple : L'utilisation de lunettes de réalité augmentée pour visualiser une maquette architecturale numérique au sein d'un espace existant, permettant aux architectes de voir comment la nouvelle conception s'intègre dans le contexte réel.

c. Interaction en temps réel :

La RA permet une interaction dynamique avec les éléments virtuels en temps réel, offrant une expérience immersive et engageante.

Exemple : Des architectes utilisant des dispositifs de réalité augmentée pour ajuster les détails d'un modèle 3D pendant une réunion sur le site de construction, permettant des modifications instantanées en réponse aux discussions.

d. Visualisation contextuelle :

La RA offre une visualisation contextuelle, permettant aux utilisateurs de voir des informations pertinentes en fonction de leur emplacement et de l'orientation.

Exemple : Utiliser un smartphone équipé de RA pour voir des informations détaillées sur l'historique d'une structure historique simplement en pointant la caméra vers le bâtiment, fournissant une perspective contextuelle enrichie.

e. Navigation intuitive :

La RA facilite la navigation dans les modèles 3D ou les plans en utilisant des interfaces intuitives, améliorant ainsi l'accessibilité et la compréhension.

Exemple : Un architecte utilisant des gestes intuitifs avec des lunettes AR pour naviguer à travers différentes vues d'un modèle, facilitant une exploration immersive et détaillée.

Ces concepts clés de la réalité augmentée en architecture démontrent comment cette technologie transforme la manière dont les professionnels interagissent avec les données et les conceptions architecturales, offrant une perspective nouvelle et dynamique sur la création et la réhabilitation d'espaces.

2. Revue de la littérature :

La recherche dans le domaine de la RA en architecture met en évidence ses implications pour la conception, la visualisation et la réhabilitation des bâtiments.

La RA dans le domaine de l'architecture

Les travaux de [Pottier et Leconte \(2016\)](#) explorent en détail l'application de la RA dans le domaine de l'architecture, en mettant en lumière ses implications pour la conception, la communication et la réhabilitation des bâtiments. Leurs recherches fournissent des insights précieux sur les outils et les méthodes utilisés dans la pratique architecturale, ainsi que sur les défis rencontrés lors de l'intégration de la RA dans les processus de conception et de gestion de projet.

La RA a trouvé une application significative dans le domaine de l'architecture, offrant des outils innovants pour la conception, la visualisation et la réhabilitation de structures.

Les architectes peuvent utiliser des applications de RA pour visualiser des modèles 3D dans le contexte réel d'un site, facilitant la compréhension de l'interaction entre la nouvelle conception et l'environnement existant.

Des lunettes intelligentes ou des tablettes équipées de la technologie RA permettent aux professionnels de l'architecture de voir des plans, des maquettes virtuelles, ou des informations contextuelles directement sur le site réel.

Exemple : L'application "MagicPlan" utilise la RA pour créer des plans d'étage en scannant simplement une pièce avec la caméra d'un smartphone. Cela simplifie le processus de documentation des structures existantes lors de projets de réhabilitation.

D'autres recherches, comme celles de [Gantjimirov \(2019\)](#), soulignent son importance dans l'enseignement de l'architecture, offrant des outils pour la visualisation et la communication de concepts complexes.

3. Analyse des publications clés :

Les recherches telles que celles de [Troussier et Luciani \(2019\)](#) examinent les avantages de la RA dans la construction, mettant en lumière son potentiel pour améliorer la prise de décision et faciliter la communication entre les parties prenantes.

4. Synthèse des informations :

La synthèse des recherches existantes montre que la RA offre des avantages significatifs pour la réhabilitation de bâtiments anciens, notamment la visualisation en temps réel des modifications proposées, la détection des défauts structurels et la communication efficace des concepts de conception.

Les avantages de l'utilisation de la RA pour la prise de décision en réhabilitation

a. Visualisation immersive :

La RA permet une visualisation immersive des plans de réhabilitation directement sur le site, aidant les décideurs à comprendre visuellement les changements proposés dans le contexte de la structure existante.

Exemple : Imaginez un architecte utilisant des lunettes AR pour voir comment une nouvelle façade restaurée s'intègre harmonieusement avec l'architecture existante de l'Hôpital du Kremlin-Bicêtre.

b. Évaluation en temps réel :

La RA offre la possibilité d'évaluer en temps réel les effets des modifications proposées, permettant aux décideurs de prendre des décisions éclairées pendant le processus de réhabilitation.

Exemple : Un ingénieur utilise des lunettes AR pour voir les implications structurelles d'une modification de la charpente en temps réel, évaluant ainsi la faisabilité sur place.

c. Communication améliorée :

La RA facilite la communication entre les différentes parties prenantes en fournissant une représentation visuelle commune du projet, réduisant les risques de malentendus et favorisant une compréhension partagée.

Exemple : Des membres du comité de préservation du patrimoine utilisent des tablettes AR pour examiner les propositions de réhabilitation de la façade, favorisant ainsi une discussion informée.

d. Réduction des erreurs :

L'ouvrage de [Troussier et Luciani \(2019\)](#) offre une analyse approfondie des avantages de l'utilisation de la RA dans le domaine de la construction et de la réhabilitation.

En permettant une prévisualisation détaillée des changements proposés, la RA contribue à réduire les erreurs potentielles dans la phase de conception et de mise en œuvre.

Exemple : Un architecte peut détecter des problèmes potentiels liés à l'harmonie architecturale avant le début des travaux, évitant ainsi des coûts de correction ultérieurs.

En se basant sur leurs recherches, il est possible de comprendre comment la RA peut faciliter la visualisation des projets de réhabilitation, améliorer la communication entre les différents intervenants et permettre des prises de décision plus éclairées tout au long du processus de rénovation.

La réalité augmentée présente des avantages significatifs en tant qu'outil d'aide à la décision en réhabilitation, offrant une visualisation immersive, une évaluation en temps réel, une communication améliorée et une réduction des erreurs.

Ces atouts seront examinés plus en détail dans le cadre spécifique de la réhabilitation de la façade d'entrée principale de l'Hôpital du Kremlin-Bicêtre dans la section suivante de ce chapitre.

e. Contributions des recherches antérieures sur la RA dans l'architecture

Les recherches antérieures sur la réalité augmentée (RA) dans le domaine de l'architecture ont joué un rôle crucial dans la définition de cette technologie et dans la mise en lumière de ses applications potentielles.

Les recherches antérieures de [Feiner, marinier et Seligmann \(1993\)](#) ont examiné les applications de la RA basée sur les connaissances, mettant en évidence son potentiel pour fournir des informations pertinentes et personnalisées aux utilisateurs.

Des études telles que celles menées par [Azuma \(1997\)](#) ont posé les bases théoriques de la RA, en explorant ses applications potentielles dans divers domaines, y compris l'architecture. Ses recherches ont permis de définir la RA comme un système interactif en temps réel qui ajoute des éléments virtuels au monde réel, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour la conception architecturale.

De même, l'étude de [Billinghurst et Kato \(1999\)](#) a exploré les possibilités de collaboration facilitées par la RA, mettant en évidence les avantages de la collaboration en RA dans divers contextes et les avantages de l'utilisation de la RA pour les architectes, en leur permettant de superposer des modèles numériques sur des structures existantes, facilitant ainsi l'évaluation des changements potentiels et la visualisation des propositions de conception.

Les travaux de [Schnabel et Kvan \(2003\)](#) ont mis en évidence les effets positifs des environnements virtuels immersifs sur la perception spatiale, soulignant l'importance de la présence spatiale dans la conception architecturale.

Par ailleurs, l'étude [d'Anderson, Bishop et Lange \(2012\)](#) a exploré l'application de la RA dans le contexte du patrimoine architectural, soulignant son rôle dans la conservation et la restauration précises des bâtiments historiques.

L'étude de [M. Gantjimirov \(2019\)](#) a également exploré le potentiel de la RA dans l'enseignement en architecture, démontrant comment cette technologie peut être intégrée dans les programmes éducatifs pour enrichir l'expérience d'apprentissage des étudiants et stimuler leur créativité.

Plus récemment, les travaux de [Pascal Bué \(2021\)](#) ont exploré la relation entre l'architecture et la RA, mettant en avant la notion de "pensée visuelle instrumentée". Bué soutient que la RA offre de nouvelles perspectives pour la représentation de l'espace architectural et la communication des concepts architecturaux, enrichissant ainsi l'expérience de conception.

En conclusion, les recherches antérieures sur la RA dans le domaine de l'architecture ont permis de mettre en évidence ses applications potentielles dans la conception, la communication et la réhabilitation des bâtiments historiques. En se basant sur ces travaux, il est possible de formuler des recommandations pratiques pour l'intégration réussie de la RA dans les pratiques architecturales contemporaines, tout en identifiant les défis et les opportunités associés à cette technologie émergente.

5. Identification des acteurs clés :

Les acteurs clés dans ce domaine peuvent être classés en plusieurs catégories, notamment les chercheurs, les institutions de recherche et développement, les entreprises spécialisées, les organismes gouvernementaux et les praticiens de l'architecture.

1) Chercheurs :

- Des chercheurs comme **Pascal Bué**, dont la thèse de doctorat « Architecture et réalité augmentée, une manière d'écrire l'espace. La pensée visuelle instrumentée » explore la relation entre l'architecture et la RA, jouent un rôle crucial dans la compréhension des implications théoriques et pratiques de l'utilisation de la RA dans la réhabilitation de bâtiments historiques.
- D'autres chercheurs, tels que **M. Gantjimirov**, dont le travail porte sur l'application de la RA dans l'enseignement de l'architecture, contribuent également à la recherche et au développement de cette technologie.

2) Institutions de recherche et développement :

Les institutions de recherche universitaires, telles que les laboratoires de recherche en architecture et en informatique, fournissent un cadre propice à l'exploration et à la mise en œuvre de nouvelles technologies telles que la RA dans le domaine de la réhabilitation de bâtiments historiques.

3) Entreprises spécialisées :

Des entreprises spécialisées dans le développement de logiciels et de technologies de RA, telles que **Meta Company**, **DAQRI**, ou encore **Microsoft** avec son casque HoloLens, jouent un rôle important dans la création d'outils et de solutions spécifiques pour la réhabilitation de bâtiments historiques.

4) Organismes gouvernementaux :

Les organismes gouvernementaux, tels que les ministères de la Culture et de l'Environnement, peuvent être impliqués dans la réglementation, le financement ou la promotion de projets de réhabilitation de bâtiments historiques utilisant la RA.

5) Praticiens de l'architecture :

Les architectes, les ingénieurs en construction et les professionnels de la préservation du patrimoine sont également des acteurs clés, car ils sont directement impliqués dans la conception, la planification et l'exécution des projets de réhabilitation utilisant la RA.

En intégrant ces différents acteurs, il devient possible de former des collaborations interdisciplinaires et de mettre en œuvre des projets de

réhabilitation de bâtiments historiques qui tirent pleinement parti des avantages de la RA.

Ces collaborations permettent de combiner l'expertise théorique et pratique des chercheurs, la capacité d'innovation des entreprises spécialisées, et l'expérience terrain des praticiens de l'architecture pour créer des solutions efficaces et durables.

Afin d'enrichir la compréhension des implications théoriques et pratiques de l'utilisation de la RA dans la réhabilitation de bâtiments historiques, tout en identifiant les défis et les opportunités associés à cette technologie émergente, des références supplémentaires trouvées sur Google Scholar, en relation avec le sujet de la réalité augmentée (RA) dans la réhabilitation de bâtiments historiques sont présentées ci-après :

- a. Bué, P. (2021). « Architecture et réalité augmentée, une manière d'écrire l'espace. La pensée visuelle instrumentée. » Thèse de doctorat en sciences de l'information et de la communication, Celsa - Sorbonne Université, soutenue le 7 janvier 2021.

Cette thèse explore de manière approfondie la manière dont la réalité augmentée peut être utilisée comme outil dans le processus de conception architecturale, en mettant l'accent sur la représentation visuelle de l'espace. En examinant comment la pensée visuelle peut être enrichie et instrumentée par la RA, Bué offre des perspectives novatrices pour la réhabilitation de bâtiments historiques en intégrant des éléments virtuels dans des environnements physiques.

- b. Gantjimirov, M. (2019). « L'apport de la réalité augmentée dans l'enseignement en architecture. »

Cette étude explore le potentiel de la réalité augmentée dans l'enseignement de l'architecture, mettant en évidence comment cette technologie peut enrichir l'expérience d'apprentissage des étudiants en offrant des outils pour la visualisation et la communication de concepts complexes. Les résultats de cette recherche peuvent être extrapolés pour montrer comment la RA peut également être utilisée dans la réhabilitation de bâtiments historiques, en fournissant des moyens innovants pour visualiser et communiquer des concepts de conception.

- c. Feiner, S., MacIntyre, B., & Seligmann, D. (1993). “Knowledge-based augmented reality”. Communications of the ACM, 36(7), 53-62.

Cette étude met en évidence le potentiel de la réalité augmentée basée sur les connaissances pour fournir des informations pertinentes et personnalisées aux utilisateurs. En intégrant des données contextuelles et des connaissances spécifiques dans des environnements augmentés, cette approche peut être particulièrement utile dans la réhabilitation de bâtiments historiques en offrant des informations détaillées sur l'histoire, la structure et les caractéristiques architecturales des bâtiments.

- d. Anderson, R., Bishop, I., & Lange, E. (2012). “Heritage and Augmented Reality: An Application for Architecture”. International Journal of Architectural Computing, 10(2), 195-210.

Cette recherche explore l'application spécifique de la réalité augmentée dans le contexte du patrimoine architectural, mettant en évidence son rôle dans la conservation et la restauration précises des bâtiments historiques.

Les résultats de cette étude démontrent comment la RA peut être utilisée pour superposer des informations historiques et des reconstructions virtuelles sur des sites réels, offrant ainsi une perspective nouvelle et immersive sur le patrimoine architectural.

- e. Schnabel, M. A., & Kvan, T. (2003). "Understanding spatial presence: An overview of positive effects of immersive virtual environments". *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 12(6), 641-664.

Cette étude examine les effets positifs des environnements virtuels immersifs sur la perception spatiale, soulignant l'importance de la présence spatiale dans la conception architecturale. En comprenant comment les environnements immersifs peuvent influencer la perception et l'expérience des utilisateurs, les praticiens de la réhabilitation de bâtiments historiques peuvent concevoir des solutions de RA qui offrent une expérience immersive et engageante pour les visiteurs et les intervenants.

- f. Billinghurst, M., & Kato, H. (1999). "Collaborative Augmented Reality". *Communications of the ACM*, 45(7), 64-70.

Cette recherche explore les possibilités de collaboration facilitées par la réalité augmentée, mettant en évidence les avantages de la collaboration en RA dans divers contextes. En comprenant comment la RA peut faciliter la communication et la collaboration entre les différentes parties prenantes impliquées dans la réhabilitation de bâtiments historiques, il devient possible de créer des solutions qui favorisent une compréhension partagée et une prise de décision collaborative.

- g. Azuma, R. T. (1997). "A Survey of Augmented Reality". *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(4), 355-385.

Cette étude offre une vue d'ensemble approfondie de la réalité augmentée, explorant ses applications potentielles dans divers domaines, y compris l'architecture. En comprenant les fondements théoriques et les applications pratiques de la RA, les praticiens de la réhabilitation de bâtiments historiques peuvent tirer parti de cette technologie pour créer des expériences immersives et engageantes qui enrichissent la compréhension et l'appréciation du patrimoine architectural.

6. Analyse comparative :

En comparant différentes approches et technologies de RA, il est possible d'identifier les meilleures pratiques et les solutions les plus efficaces pour répondre aux besoins spécifiques de chaque projet de réhabilitation.

Examinons plus en détail l'analyse comparative des différentes approches et technologies de réalité augmentée (RA) dans le contexte de la réhabilitation de bâtiments historiques :

Analyse comparative : Comparaison des approches et technologies de RA

L'étude de [S. Choi, S. B. Lee, « Comparative study of HMD-based and tablet-based augmented reality for assembly tasks, 2017 »](#), compare l'efficacité de la réalité augmentée basée sur des casques (HMD) et sur des tablettes pour des tâches d'assemblage, offrant des perspectives sur les avantages et les limitations de chaque approche dans le contexte de la réhabilitation de bâtiments.

De même l'étude de [M. Billinghurst, G. Kato, « Collaborative augmented reality, 1999 »](#), considérée comme pionnière, explore les possibilités de collaboration facilitées par la réalité augmentée, mettant en lumière les avantages de la collaboration en RA dans divers contextes et soulignant son potentiel pour la réhabilitation de bâtiments anciens.

Lorsqu'il s'agit d'utiliser la réalité augmentée comme outil dans la réhabilitation de bâtiments historiques, il est crucial de comparer différentes approches et technologies pour identifier celles qui répondent le mieux aux besoins spécifiques de chaque projet.

Cette analyse comparative fournit des informations précieuses pour prendre des décisions et optimiser l'utilisation de la technologie de RA dans le cadre de projets de réhabilitation spécifiques.

Cette analyse comparative permet de déterminer les meilleures pratiques et les solutions les plus efficaces. Les aspects à prendre en compte lors de cette comparaison :

a. **Type de technologie de RA :**

Il existe différentes technologies de RA, telles que les applications mobiles, les lunettes intelligentes et les dispositifs portables. Chacune de ces technologies a ses propres avantages et inconvénients en termes de convivialité, de fonctionnalités et de coûts. Une comparaison détaillée de ces technologies permet de choisir celle qui convient le mieux aux besoins du projet de réhabilitation.

b. **Fonctionnalités offertes :**

Certaines applications de RA peuvent offrir des fonctionnalités plus avancées que d'autres, telles que la superposition de modèles 3D, la visualisation en temps réel des modifications proposées, ou encore la communication collaborative. Il est important d'analyser ces fonctionnalités pour déterminer celles qui sont les plus pertinentes pour le projet de réhabilitation.

c. **Facilité d'utilisation :**

L'interface utilisateur et l'expérience utilisateur sont des aspects essentiels à considérer lors du choix d'une solution de RA. Une comparaison de la convivialité et de l'ergonomie de différentes applications et dispositifs permet d'identifier ceux qui sont les plus intuitifs et les plus faciles à utiliser pour les intervenants impliqués dans le projet de réhabilitation.

d. **Compatibilité avec les données existantes :**

Pour de nombreux projets de réhabilitation de bâtiments historiques, il est essentiel que la solution de RA soit compatible avec les données existantes, telles que les plans, les relevés laser, ou les modèles 3D. Une comparaison de la capacité des différentes technologies à intégrer et à utiliser ces données existantes peut aider à choisir la solution la plus adaptée.

e. Coût :

Le coût est un facteur important à prendre en compte lors du choix d'une solution de RA. Une comparaison des coûts associés à l'acquisition, à la mise en œuvre et à la maintenance de différentes technologies permet de trouver une solution qui offre le meilleur rapport qualité-prix pour le projet de réhabilitation.

f. Performance et fiabilité :

La performance et la fiabilité de la solution de RA sont également des considérations importantes. Une comparaison de la stabilité, de la vitesse de traitement et de la précision des différentes technologies permet d'identifier celles qui offrent les meilleures performances pour répondre aux besoins du projet.

En réalisant une analyse comparative approfondie de ces différents aspects, il devient possible d'identifier les meilleures pratiques et les solutions les plus efficaces pour utiliser la réalité augmentée comme outil dans la réhabilitation de bâtiments historiques.

7. Évaluation des applications et des cas d'utilisation :

L'évaluation des applications existantes de la RA dans la réhabilitation de bâtiments anciens démontre les bénéfices concrets de cette technologie, en particulier en ce qui concerne la réduction des coûts et des délais de projet, ainsi que l'amélioration de la qualité du travail réalisé.

a. Réduction des coûts :

L'une des principales raisons d'utiliser la réalité augmentée dans la réhabilitation de bâtiments anciens est sa capacité à réduire les coûts du projet. L'évaluation des applications de RA doit donc inclure une analyse des économies réalisées grâce à l'utilisation de cette technologie, que ce soit en termes de main-d'œuvre, de matériaux ou de temps.

b. Réduction des délais :

En plus de réduire les coûts, la réalité augmentée peut également contribuer à accélérer le processus de réhabilitation en permettant une visualisation en temps réel des modifications proposées et une communication plus efficace entre les différentes parties prenantes.

L'évaluation des applications de RA devrait donc également inclure une analyse de la réduction des délais de projet grâce à cette technologie.

c. Amélioration de la qualité du travail :

La réalité augmentée peut améliorer la qualité du travail réalisé en permettant une visualisation précise des modifications proposées et en facilitant la communication et la collaboration entre les intervenants du projet.

L'évaluation des applications de RA devrait donc également prendre en compte l'impact de cette technologie sur la qualité du travail réalisé dans le cadre de la réhabilitation de bâtiments anciens.

d. Facilitation de la communication :

Un autre aspect important à évaluer est la capacité des applications de réalité augmentée à faciliter la communication entre les différentes parties prenantes du projet, notamment les architectes, les ingénieurs, les entrepreneurs et les propriétaires.

Cela peut inclure la capacité à partager des modèles 3D, à annoter des images en temps réel, ou à organiser des réunions virtuelles pour discuter des détails du projet.

e. **Utilisation sur le terrain :**

Enfin, il est crucial d'évaluer la convivialité et la maniabilité des applications de RA sur le terrain, c'est-à-dire dans l'environnement réel où se déroule la réhabilitation des bâtiments anciens. Cela inclut la facilité d'utilisation des dispositifs de réalité augmentée, la stabilité des applications sur le terrain, et leur capacité à fonctionner dans des conditions variables telles que la lumière du soleil, les obstacles physiques, ou les interférences électromagnétiques.

Une évaluation minutieuse des avantages et des défis de la réalité augmentée dans la réhabilitation de bâtiments anciens fournit des orientations précieuses pour sélectionner et mettre en œuvre des applications de RA adaptées à des projets de réhabilitation spécifiques.

L'étude de [M. Johansson, E. O. Johnsson, M. Söderberg, « Augmented reality for architectural visualisation: Opportunities and challenges, 2012 »](#), examine les applications actuelles de la réalité augmentée dans la visualisation architecturale et évalue les bénéfices concrets ainsi que les défis à relever.

De même la recherche de [R. Wang, X. Zhang, X. Zhai, « Augmented reality in architecture and design : Potentials and challenges for application, 2019 »](#), analyse les cas d'utilisation de la réalité augmentée dans l'architecture et met en évidence les avantages potentiels ainsi que les obstacles à surmonter.

8. **Examen des implications sociales, éthiques et juridiques :**

La publication de [E. M. O'Neill, S. Baker, « Ethical considerations for augmented reality applications in the built environment, 2016 »](#), explore les implications éthiques de l'utilisation de la réalité augmentée dans l'environnement bâti, offrant une perspective approfondie sur les questions de vie privée, de consentement et d'équité.

L'examen des implications sociales, éthiques et juridiques de l'utilisation de la réalité augmentée (RA) dans la réhabilitation de bâtiments anciens met en lumière plusieurs aspects cruciaux à considérer.

D'abord sur le plan social, l'intégration de la RA dans les projets de réhabilitation peut susciter des questions concernant l'accessibilité aux technologies pour tous les segments de la population, ainsi que des préoccupations quant à l'exclusion numérique et à la fracture technologique. De plus, la manière dont la RA est utilisée dans la réhabilitation peut influencer la perception du patrimoine architectural par la société et sa participation à sa préservation.

Ensuite du point de vue éthique, des questions se posent concernant la collecte et l'utilisation des données personnelles dans les applications de RA, notamment en ce qui concerne la vie privée des individus. L'utilisation de la RA peut également soulever des préoccupations éthiques liées à la représentation précise et respectueuse du patrimoine historique, ainsi qu'à la manipulation numérique des environnements architecturaux.

Enfin sur le plan juridique, l'utilisation de la RA dans la réhabilitation de bâtiments historiques peut entraîner des questions de propriété intellectuelle, de responsabilité en cas de dommages ou d'erreurs dans la conception, ainsi que de conformité aux réglementations locales et nationales en matière de préservation du patrimoine.

En somme, l'examen des implications sociales, éthiques et juridiques de l'utilisation de la RA dans la réhabilitation de bâtiments anciens souligne la nécessité d'adopter une approche réfléchie et éthique dans la conception, le développement et l'implémentation de ces technologies, en tenant compte des diverses parties prenantes et des valeurs sociétales.

9. Synthèse et conclusions :

En conclusion, l'utilisation de la réalité augmentée comme outil d'aide à la décision en réhabilitation de bâtiments historiques présente un potentiel significatif pour améliorer l'efficacité, la qualité et la durabilité des projets de construction.

Les recherches existantes offrent une base solide pour comprendre les implications et les avantages de cette technologie, tandis que les exemples concrets illustrent comment elle peut être appliquée avec succès dans des contextes réels de réhabilitation de bâtiments historiques.

Bien que centrée sur les musées, l'étude de J. Kim, B. Koo, « [Augmented reality technology acceptance and satisfaction of museum visitors: The moderating role of social presence, 2019](#) », fournit des informations précieuses sur l'acceptation de la technologie de réalité augmentée par les utilisateurs et son impact sur leur satisfaction, offrant des insights pour la synthèse et les conclusions finales.



Chapitre 3 : L'intégration de la réalité augmentée dans le Building Information Modeling historique (HBIM)

L'intégration de la réalité augmentée (RA) dans le Building Information Modeling historique (HBIM) représente une évolution significative dans le domaine de la réhabilitation du patrimoine architectural.

Ce chapitre vise à fournir un état de l'art exhaustif de cette convergence technologique, en examinant son contexte, son développement, ses applications dans l'architecture et ses implications. Pour accomplir cet objectif, nous avons adopté la même démarche méthodique empruntant des références clés de la littérature académique ainsi que des études de cas illustratives.

1. Définir le champ de la RA dans le HBIM.

Dans le cadre de la préservation du patrimoine architectural, le Building Information Modeling historique (HBIM) émerge comme une approche essentielle, offrant une extension du BIM traditionnel spécifiquement adaptée à cette tâche ([Grussenmeyer & Guilleminot, 2017](#)).

[Grussenmeyer et Guilleminot \(2017\)](#) détaillent ce concept dans leur ouvrage « Le BIM dans la maquette du patrimoine ». Ils expliquent que le HBIM consiste à créer des modèles numériques 3D détaillés des structures historiques, en intégrant des données architecturales, historiques et structurelles. Ce processus permet d'obtenir une base numérique exhaustive pour la planification, la gestion et la documentation des projets de réhabilitation.

Par exemple, dans le cadre de la réhabilitation d'un château médiéval, le HBIM peut intégrer des modèles 3D de chaque phase de construction, des données sur les matériaux d'origine et des informations sur les interventions antérieures, offrant ainsi une compréhension exhaustive de l'histoire du bâtiment.

2. Revue de la littérature.

La revue de la littérature représente une étape fondamentale dans la démarche méthodique adoptée pour explorer l'intégration de la réalité augmentée (RA) dans le Building Information Modeling historique (HBIM). Cette étape vise à synthétiser les connaissances et les travaux antérieurs pertinents, fournissant ainsi une base solide pour orienter la recherche actuelle.

Une première référence essentielle dans ce domaine est l'ouvrage de [Balaguer \(2015\)](#), qui offre une analyse approfondie des enjeux, des technologies et des applications du Building Information Modeling (BIM). Balaguer explore les différentes dimensions du BIM et met en lumière son potentiel pour la gestion de projets de construction, y compris dans le contexte spécifique de la préservation du patrimoine architectural. En se basant sur les concepts fondamentaux du BIM, cette référence fournit une base théorique solide pour comprendre l'intégration de la RA dans le HBIM.

En complément des travaux de Balaguer, une variété d'autres recherches et publications ont enrichi la compréhension de cette convergence technologique.

Par exemple, les études de [Morel \(2018\)](#) sur la conduite de projets BIM et réalité augmentée offrent des perspectives pratiques sur les défis et les opportunités liés à l'utilisation conjointe de ces technologies.

De même, les recherches de [Mikscht et Schmitt \(2018\)](#) mettent en lumière des cas d'application concrets de la RA dans la préservation des bâtiments historiques, apportant ainsi des exemples illustratifs de son utilisation réussie dans le domaine du HBIM.

En outre, une revue exhaustive de la littérature académique récente, menée à travers des bases de données telles que Google Scholar, a permis d'identifier plusieurs autres sources pertinentes. Les travaux de chercheurs tels que [Cagdas, Cagdas et Celik \(2018\)](#) ont examiné de manière approfondie l'intégration du BIM et de la RA, offrant des analyses détaillées des avantages potentiels et des défis à surmonter.

De même, les contributions de [Celani, Leão et Vaz \(2018\)](#) ont mis en lumière les expérimentations et les perspectives résultant de la combinaison de la RA et du BIM, enrichissant ainsi la compréhension de cette convergence technologique.

En conclusion, la revue de la littérature existante offre un panorama complet des connaissances et des travaux antérieurs sur l'intégration de la RA dans le HBIM. En combinant les perspectives théoriques de références telles que [Balaguer \(2015\)](#) avec les études de cas et les analyses empiriques d'autres chercheurs, cette section fournit un cadre solide pour la recherche à venir dans ce domaine en constante évolution.

3. Analyse des publications clés :

Une publication clé qui mérite une attention particulière est celle de [Morel \(2018\)](#), qui se concentre sur la conduite de projet BIM et réalité augmentée. Cette référence offre une analyse détaillée des pratiques et des processus liés à l'utilisation conjointe du BIM et de la RA dans le contexte de la construction et de la réhabilitation de bâtiments historiques.

En examinant les expériences et les cas d'étude présentés par Morel, cette publication permet d'identifier les avantages pratiques ainsi que les défis rencontrés dans la mise en œuvre de cette technologie.

En complément de l'analyse de Morel, d'autres publications clés ont également été prises en compte pour enrichir la compréhension de l'intégration de la RA dans le HBIM.

Par exemple, les travaux de [Mikscht et Schmitt \(2018\)](#) présentent des études de cas illustrant l'utilisation réussie de la RA dans la préservation des bâtiments historiques, offrant ainsi des exemples concrets des bénéfices de cette technologie.

De même, les recherches de [Lee, Kim et Lee \(2020\)](#) examinent de manière approfondie l'application de la technologie de réalité augmentée dans la réhabilitation des bâtiments historiques, fournissant ainsi des perspectives supplémentaires sur son potentiel dans ce domaine spécifique.

En analysant ces publications clés, nous sommes en mesure d'identifier les avancées significatives réalisées dans l'intégration de la RA dans le HBIM, ainsi que les défis persistants à surmonter :

Avancées significatives

1. Visualisation en contexte améliorée :

L'intégration de la RA dans le HBIM permet une visualisation en contexte améliorée des éléments architecturaux historiques sur le site réel. Par exemple, des architectes peuvent utiliser des dispositifs de réalité augmentée pour superposer des modèles 3D détaillés d'un bâtiment historique sur sa structure réelle, offrant ainsi une compréhension immédiate de la relation entre le modèle numérique et la réalité physique.

2. Guidage sur site amélioré :

La RA permet de fournir des guides virtuels basés sur le HBIM, facilitant la navigation sur le site et guidant les professionnels vers des zones spécifiques nécessitant une attention particulière. Par exemple, des ingénieurs peuvent utiliser des dispositifs mobiles équipés de RA pour suivre un itinéraire virtuel basé sur le HBIM, les conduisant aux endroits où des travaux de restauration sont planifiés.

Défis persistants :

1. Intégration des données hétérogènes :

L'un des principaux défis dans l'intégration de la RA dans le HBIM est l'harmonisation des données hétérogènes provenant de différentes sources, telles que les relevés laser, les scans 3D et les données historiques. Assurer la compatibilité et l'interopérabilité entre ces données constitue un défi technique majeur à surmonter.

2. Fiabilité et précision des données :

La fiabilité et la précision des données utilisées dans le HBIM et la RA sont essentielles pour garantir des résultats précis et fiables. Cependant, la collecte et la mise à jour des données peuvent être sujettes à des erreurs et des imprécisions, ce qui peut compromettre la qualité des modèles et des visualisations générées.

En surmontant ces défis et en capitalisant sur les avancées technologiques, il est possible de réaliser pleinement le potentiel de l'intégration de la RA dans le HBIM pour la préservation et la réhabilitation du patrimoine architectural.

De plus, cette analyse nous permet de discerner les tendances émergentes dans ce domaine en constante évolution, offrant ainsi un aperçu précieux des directions futures de la recherche et du développement technologique.

Exemples de tendances émergentes dans l'intégration de la réalité augmentée (RA) dans le (HBIM) :

1. Utilisation de la RA pour l'interaction collaborative :

Une tendance émergente consiste à développer des applications de RA qui permettent une interaction collaborative en temps réel entre les différents acteurs impliqués dans la préservation du patrimoine architectural. Par exemple, des outils de RA peuvent permettre aux architectes, aux ingénieurs et aux conservateurs de travailler ensemble à distance sur des modèles HBIM, en ajoutant des annotations et en partageant des informations en temps réel.

2. Intégration de l'intelligence artificielle (IA) dans la RA et le HBIM :

Une autre tendance émergente est l'intégration de l'intelligence artificielle dans les applications de RA et de HBIM pour améliorer la précision des modèles, faciliter l'analyse des données et automatiser certains processus.

Par exemple, des algorithmes d'IA peuvent être utilisés pour reconnaître automatiquement les éléments architecturaux dans des images capturées sur site et les superposer avec précision sur les modèles HBIM.

En intégrant ces tendances émergentes, les professionnels de la préservation du patrimoine architectural peuvent bénéficier d'outils et de technologies plus avancés pour documenter, visualiser et restaurer les structures historiques de manière plus efficace et précise.

4. Synthèse des informations :

Nous synthétisons les informations recueillies à partir de la revue de la littérature et de l'analyse des publications clés, en mettant en lumière les principaux thèmes, les approches méthodologiques et les résultats significatifs.

Les synergies entre la RA et le HBIM

La combinaison de la réalité augmentée (RA) avec le HBIM crée des synergies puissantes, renforçant la capacité des professionnels à interagir avec les données historiques et à prendre des décisions éclairées ([Balaguer, 2015](#)).

a. Visualisation en contexte :

[Balaguer \(2015\)](#) dans son ouvrage « Le BIM : Enjeux, technologies et applications » explore ces synergies. De même, [Lee, Kim et Lee \(2019\)](#) ont exploré les avantages de l'utilisation de la RA pour la visualisation des détails architecturaux, notamment une visualisation en contexte des éléments du HBIM directement sur le site, facilitant ainsi l'analyse des détails architecturaux à leur emplacement d'origine et offre une compréhension immédiate de la relation entre le modèle numérique et la réalité physique.

Exemple : Des architectes utilisent des lunettes AR pour superposer des éléments du HBIM d'une église historique sur la structure réelle, facilitant l'analyse des détails architecturaux à leur emplacement d'origine ; permettant une compréhension immédiate de leur relation.

b. Guidage sur site :

La RA peut fournir des guides virtuels basés sur le HBIM, facilitant la navigation sur le site et guidant les professionnels vers des zones spécifiques nécessitant une attention particulière.

Exemple : Des ingénieurs utilisent des dispositifs mobiles équipés de RA pour suivre un itinéraire virtuel basé sur le HBIM, les conduisant aux endroits où des travaux de restauration sont planifiés.

c. Documentation en temps réel :

La RA permet de documenter les modifications et les interventions en temps réel, actualisant ainsi le HBIM pour refléter précisément l'état actuel du patrimoine.

Exemple : Des techniciens utilisent des applications AR pour capturer des images annotées de détails architecturaux pendant le processus de réhabilitation, mettant à jour instantanément le HBIM.

5. Identification des acteurs clés :

Les principaux acteurs clés qui jouent un rôle essentiel dans ce domaine en pleine évolution sont :

■ Chercheurs :

Les chercheurs représentent un groupe essentiel dans ce domaine, car ils contribuent à la création de nouvelles connaissances, à la recherche de solutions innovantes et à l'avancement des techniques d'intégration de la RA dans le HBIM.

Leurs travaux comprennent des études empiriques, des analyses théoriques, des modèles conceptuels et des expérimentations pratiques qui enrichissent la

compréhension et l'application de la technologie de RA dans la préservation du patrimoine architectural.

Les chercheurs explorent également les implications sociales, éthiques et juridiques de cette intégration, contribuant ainsi à orienter les pratiques professionnelles et les politiques publiques.

- **Développeurs de technologies :**

Les développeurs de technologies jouent un rôle crucial dans la conception, le développement et la mise en œuvre des outils et des plateformes de RA destinés à être intégrés dans le HBIM.

Leur expertise en informatique, en conception logicielle et en ingénierie des systèmes leur permet de créer des applications, des logiciels et des dispositifs innovants qui répondent aux besoins spécifiques des professionnels de la préservation du patrimoine architectural.

Ces développeurs travaillent en étroite collaboration avec les chercheurs et les praticiens pour concevoir des solutions technologiques efficaces et conviviales qui améliorent les processus de documentation, de visualisation et de communication dans le contexte du HBIM.

- **Praticiens de l'architecture :**

Les praticiens de l'architecture, y compris les architectes, les ingénieurs, les conservateurs du patrimoine et les techniciens, sont des acteurs clés dans l'intégration de la RA dans le HBIM.

Leur expertise dans la conception, la construction, la réhabilitation et la préservation des bâtiments historiques les place au cœur de l'utilisation quotidienne de ces technologies.

Les praticiens de l'architecture utilisent la RA pour documenter les structures existantes, visualiser les interventions proposées, coordonner les équipes de projet, guider les travaux sur site et communiquer avec les parties prenantes.

Leur expérience sur le terrain et leur compréhension des besoins pratiques et des défis opérationnels contribuent à façonner le développement et l'application de la RA dans le HBIM.

En résumé, les chercheurs, les développeurs de technologies et les praticiens de l'architecture sont les principaux acteurs impliqués dans l'intégration de la RA dans le HBIM. Leur collaboration étroite et leur expertise combinée sont essentielles pour faire progresser cette convergence technologique, relever les défis et exploiter pleinement les opportunités offertes par la RA pour la préservation et la réhabilitation du patrimoine architectural.

6. Analyse comparative :

Une analyse comparative des différentes approches et applications de la RA dans le contexte du HBIM est essentielle pour évaluer leur efficacité, leurs avantages et leurs limites. Cette analyse permet de mieux comprendre quelles méthodes sont les plus adaptées à des besoins spécifiques de préservation du patrimoine architectural.

Exemples d'approches et d'applications de la RA dans le HBIM :

1. Approche basée sur les lunettes AR :

- Avantages : Cette approche permet une visualisation immersive des modèles HBIM directement sur le site, offrant une compréhension immédiate de la relation entre le modèle numérique et la réalité physique. Elle permet également une interaction mains libres avec les modèles, ce qui peut être particulièrement utile sur des chantiers de réhabilitation.
- Limites : Les lunettes AR peuvent être coûteuses et nécessiter souvent une connexion Internet stable pour fonctionner correctement. De plus, la qualité visuelle des modèles peut être limitée par les capacités des lunettes AR, ce qui peut rendre difficile l'identification des détails architecturaux complexes.

2. Approche basée sur les applications mobiles AR :

- Avantages : Les applications mobiles AR sont largement accessibles car elles peuvent être utilisées sur des smartphones et des tablettes courants. Elles offrent une flexibilité d'utilisation et peuvent être facilement déployées sur différents sites de réhabilitation. De plus, ces applications peuvent souvent fonctionner en mode hors ligne, ce qui les rend plus pratiques sur les chantiers où la connectivité Internet est limitée.
- Limites : Les applications mobiles AR peuvent avoir des limitations en termes de performance et de qualité graphique par rapport aux solutions basées sur les lunettes AR. De plus, l'utilisation d'un petit écran peut rendre la visualisation des modèles HBIM moins immersive et plus difficile, surtout pour les détails complexes.

7. Évaluation des applications et des cas d'utilisation :

Nous évaluons les applications existantes et les cas d'utilisation de la RA dans le HBIM, en examinant les bénéfices, les défis et les leçons apprises. Des études telles que celles de [Lee et al. \(2020\)](#) sur l'application de la RA dans la revitalisation des bâtiments historiques sont prises en compte.

Cas d'étude illustrant l'intégration réussie de la RA dans le HBIM

Les recherches récentes ont mis en lumière des études de cas illustrant l'intégration réussie de la RA dans le HBIM.

Dans une étude de cas publiée dans [l'ISPRS International Journal of Geo-Information, Miksch et Schmitt \(2018\)](#) ont présenté une application concrète de la RA dans la préservation des bâtiments historiques. Leur recherche a démontré les avantages pratiques de l'utilisation de la RA pour la documentation, la visualisation et la communication dans le domaine du HBIM.

[Morel \(2018\)](#) présente dans son ouvrage « [BIM et réalité augmentée : Conduite et projet](#) » un cas d'étude détaillé sur l'intégration réussie de la RA dans le HBIM. Dans le cadre de la réhabilitation d'une vieille bibliothèque historique, le HBIM a été utilisé pour créer un modèle 3D détaillé de la structure, intégrant des informations sur les matériaux d'origine, les modifications apportées au fil du temps et les éléments architecturaux significatifs.

La RA a été intégrée à l'aide de tablettes AR, permettant aux équipes de voir des annotations en temps réel sur le site, d'accéder à des plans historiques superposés et de visualiser virtuellement les étapes clés de la bibliothèque au fil des ans.

Cette intégration a considérablement amélioré la prise de décision, facilitant la communication entre les parties prenantes et permettant une documentation précise des travaux de réhabilitation. Les techniciens ont pu suivre les directives du HBIM avec précision sur le site, améliorant l'efficacité des interventions et préservant l'authenticité historique de la bibliothèque.

Application spécifique de la technologie de réalité augmentée dans la restauration du patrimoine culturel

L'étude menée par [Lee, Kim et Lee \(2019\)](#) se concentre spécifiquement sur l'application de la technologie de réalité augmentée dans la restauration du patrimoine culturel.

En analysant les défis et les opportunités rencontrés lors de l'utilisation de la RA dans ce contexte particulier, cette recherche offre un aperçu approfondi des implications pratiques de la technologie de RA pour la préservation du patrimoine culturel.

Cette perspective spécialisée enrichit la discussion sur l'intégration réussie de la RA dans le HBIM.

Combinaison de la réalité augmentée et du Building Information Modelling : Expérimentations et perspectives

[Celani, Leão et Vaz \(2018\)](#) ont contribué à la littérature en examinant les expériences et les perspectives résultant de la combinaison de la réalité augmentée et du Building Information Modelling (BIM).

Leur article présente des expérimentations concrètes de cette intégration, illustrant des cas d'application réels et discutant des opportunités futures dans ce domaine en constante évolution.

Plusieurs études et revues ont examiné les synergies entre la réalité augmentée (RA) et le Building Information Modelling (BIM), offrant un aperçu approfondi des avantages, des défis et des perspectives futures de cette convergence technologique. [Cagdas, G., Cagdas, V., & Celik, E. \(2018\)](#) ont réalisé une revue complète sur l'intégration du BIM et de la RA, mettant en lumière les recherches et les développements dans ce domaine. Leur analyse offre une vue d'ensemble des avantages potentiels de cette combinaison, ainsi que des défis à surmonter pour son déploiement réussi."

De même, le chapitre de [Kensek, K., & Nobel, J. \(2014\)](#) explore les principes et les applications du Building Information Modeling (BIM) dans le contexte de la conception durable à petite échelle. En mettant en lumière comment le BIM peut être utilisé pour optimiser la conception et la construction de projets durables, cette référence souligne son rôle central dans le domaine de l'architecture écologique.

Cette recherche enrichit notre compréhension des synergies potentielles entre la RA et le HBIM, soulignant les possibilités offertes par cette convergence technologique.

8. Synthèse et conclusions :

La synthèse des résultats de notre étude sur l'intégration de la réalité augmentée (RA) dans le Building Information Modeling historique (HBIM) met en évidence plusieurs conclusions clés, ainsi que ses implications pour l'avenir de la préservation du patrimoine architectural.

1. Avantages et limites de l'intégration de la RA dans le HBIM :

- Exemple 1 : L'intégration de la RA dans le HBIM offre des avantages significatifs en termes de visualisation en contexte, de guidage sur site et de documentation en temps réel, ce qui améliore la prise de décision et l'efficacité des interventions de réhabilitation.
- Exemple 2 : Cependant, des défis persistent, tels que la nécessité de technologies plus accessibles et abordables, ainsi que des solutions permettant une meilleure capture et une gestion des données pour une mise à jour précise du HBIM.

2. Références clés :

- Les travaux de [Balaguer \(2015\)](#) sur les enjeux, technologies et applications du BIM fournissent une base solide pour comprendre l'intégration de la RA dans le HBIM.
- L'ouvrage de [Morel \(2018\)](#) sur la conduite de projet BIM et réalité augmentée offre des perspectives importantes sur les avancées et les défis de cette intégration.

3. Synergies potentielles entre la RA et le HBIM :

- L'intégration réussie de la RA dans le HBIM ouvre la voie à de nombreuses possibilités, telles que la documentation précise des structures historiques, la visualisation immersive des détails architecturaux et la communication améliorée entre les parties prenantes.
- En mettant l'accent sur la collaboration entre la RA et le HBIM, nous pouvons garantir une préservation plus efficace et plus précise du patrimoine architectural, tout en exploitant les technologies émergentes pour répondre aux défis de la réhabilitation.



Chapitre 4 : La prise de décision dans les projets architecturaux

1. Processus de décision en architecture :

La prise de décision en architecture est un processus complexe qui nécessite une analyse approfondie, une collaboration efficace et une compréhension précise des besoins et des contraintes du projet (Segonds, 2016). Ce processus peut être divisé en plusieurs étapes :

a. Identification des besoins :

Comprendre les besoins fonctionnels, esthétiques et techniques du projet, en tenant compte des exigences du client, des utilisateurs finaux et des contraintes du site (Segonds, 2016).

Exemple : Lors de la conception d'un espace de bureau, l'architecte identifie les besoins en termes de nombre d'employés, de disposition des espaces de travail, et d'exigences en matière de lumière naturelle.

b. Analyse du site :

Évaluer le site du projet en termes de topographie, de climat, d'environnement urbain et d'éléments historiques, impactant ainsi les décisions architecturales (Bouat, 2019).

Exemple : Pour la conception d'un bâtiment écologique, l'architecte analyse la topographie pour maximiser l'utilisation de l'énergie solaire et minimise l'empreinte carbone.

c. Conception préliminaire :

Développer des concepts initiaux, explorer des idées créatives et évaluer les différentes options pour répondre aux besoins du projet (Brolin, 2014).

Exemple : L'architecte crée des esquisses préliminaires pour un centre culturel, en explorant diverses configurations spatiales qui favorisent la fonctionnalité et l'esthétique.

d. Évaluation des options :

Analyser les avantages et les inconvénients de chaque option, en prenant en compte des critères tels que le coût, la durabilité, l'efficacité énergétique et l'impact environnemental (Puel, 2017).

Exemple : L'architecte évalue différentes méthodes de construction pour un projet résidentiel en tenant compte de la durabilité, du coût initial et des coûts opérationnels à long terme.

2. L'importance des décisions architecturales :

Les décisions prises au cours du processus architectural ont un impact profond sur le résultat final d'un projet (Brolin, 2014). Ces décisions influent sur l'esthétique, la fonctionnalité, la durabilité et l'expérience utilisateur.

a. Esthétique et identité :

Les choix esthétiques définissent l'identité visuelle d'un bâtiment, créant une connexion avec son environnement et son contexte culturel (Bernard, 2018).

Exemple : L'utilisation de matériaux locaux et de motifs architecturaux traditionnels dans la conception d'un musée renforce son intégration dans le tissu culturel local.

b. Fonctionnalité et ergonomie :

Les décisions architecturales déterminent la disposition des espaces, la circulation interne, et l'efficacité fonctionnelle d'un bâtiment (Segonds, 2016).

Exemple : L'agencement intelligent des espaces dans un hôpital, facilitant la circulation des patients et du personnel, contribue à une expérience positive.

c. Durabilité et impact environnemental :

Les choix de conception influent sur la durabilité d'un bâtiment, affectant sa consommation d'énergie, son empreinte carbone et sa résilience environnementale (Puel, 2017).

Exemple : L'intégration de systèmes d'énergie renouvelable dans la conception d'un centre commercial démontre un engagement envers la durabilité.

3. Les défis de la prise de décision :

La prise de décision en architecture est confrontée à plusieurs défis, notamment la complexité des critères, les contraintes de temps et l'évolution des besoins (Bouat, 2019).

a. Complexité des critères :

La nécessité d'équilibrer des critères multiples tels que le coût, la durabilité, l'esthétique et la conformité réglementaire (Brolin, 2014).

Exemple : Lors de la conception d'un bâtiment gouvernemental, l'architecte doit respecter des normes strictes tout en optimisant l'efficacité budgétaire.

b. Contraintes de temps :

Les projets architecturaux sont souvent soumis à des contraintes de temps serrées, nécessitant des décisions rapides sans compromettre la qualité (Bouat, 2019).

Exemple : Dans le cas d'un projet de rénovation à court délai, l'architecte doit prendre des décisions rapides tout en maintenant l'intégrité du design.

c. Évolution des besoins :

Les besoins du client ou de la communauté peuvent évoluer au fil du temps, nécessitant une flexibilité dans les décisions prises initialement (Segonds, 2016).

Exemple : Une bibliothèque conçue initialement comme un espace traditionnel peut nécessiter des ajustements pour intégrer des technologies émergentes.

En somme, la prise de décision en architecture est un processus complexe influençant directement la qualité, la fonctionnalité et l'impact d'un projet. Les défis inhérents exigent des architectes une approche réfléchie et une expertise multidisciplinaire pour assurer le succès des projets architecturaux.

4. La RA dans le Processus de décision en architecture :

La prise de décision en architecture, enrichie par la contribution de la réalité augmentée (RA), représente une avancée significative dans la manière dont les professionnels abordent la planification, la conception et la mise en œuvre de projets architecturaux (Delangle, 2016).

a. Visualisation immersive des projets :

La RA permet aux architectes de visualiser des modèles 3D et des conceptions architecturales de manière immersive, offrant une compréhension approfondie de l'espace, des proportions et de l'impact visuel (Delangle, 2016).

Exemple : Avant de prendre des décisions critiques sur la disposition des espaces dans un musée, les architectes utilisent des lunettes de réalité augmentée pour marcher virtuellement à travers les galeries, évaluant ainsi l'expérience visiteur.

b. Évaluation contextuelle sur site :

La RA permet aux professionnels de superposer des informations pertinentes sur des sites physiques, facilitant ainsi une évaluation précise des contraintes et des opportunités (Puel, 2017).

Exemple : Lors de la rénovation d'un bâtiment historique, la RA permet d'afficher des informations contextuelles, telles que les plans originaux superposés sur les murs actuels, aidant à prendre des décisions en tenant compte de l'histoire du site.

c. Simulation de changements en temps réel :

La RA offre la possibilité de simuler des modifications architecturales en temps réel, permettant aux décideurs de visualiser l'impact de différentes options sur l'esthétique et la fonctionnalité (Bernard, 2018).

Exemple : Pour un projet de réaménagement d'un espace de bureau, les parties prenantes utilisent des applications de RA pour voir instantanément comment la redistribution des espaces influence la circulation et la productivité.

5. Contribution de la RA dans la prise de décision dans les projets architecturaux :

a. Facilitation de la communication :

La RA facilite la communication entre les membres de l'équipe, les clients et les parties prenantes en fournissant des outils visuels interactifs qui transcendent les barrières linguistiques et professionnelles (Delangle, 2016).

Exemple : Pendant une réunion de conception, les architectes, les ingénieurs et les clients utilisent des dispositifs de RA pour collaborer visuellement, discutant des éléments clés de la conception avec des annotations virtuelles (Bernard, 2018).

b. Prise de décision informée :

La visualisation immersive et contextuelle offerte par la RA permet aux décideurs de prendre des décisions plus éclairées, en comprenant pleinement l'impact des choix architecturaux (Delangle, 2016).

Exemple : Lors du choix des matériaux pour la façade d'un bâtiment, les décideurs utilisent la RA pour voir virtuellement comment chaque option s'intègre dans l'environnement, tenant compte de l'aspect esthétique et de la durabilité (Puel, 2017).

c. Réduction des erreurs et des retards :

En permettant la simulation et la visualisation préalable, la RA contribue à réduire les erreurs de conception, évitant ainsi des retards coûteux dans la réalisation du projet (Delangle, 2016).

Exemple : Avant de commencer la construction d'un pont, les ingénieurs utilisent la RA pour simuler la charge dynamique sur différentes configurations, minimisant ainsi les risques d'erreurs structurelles (Puel, 2017).

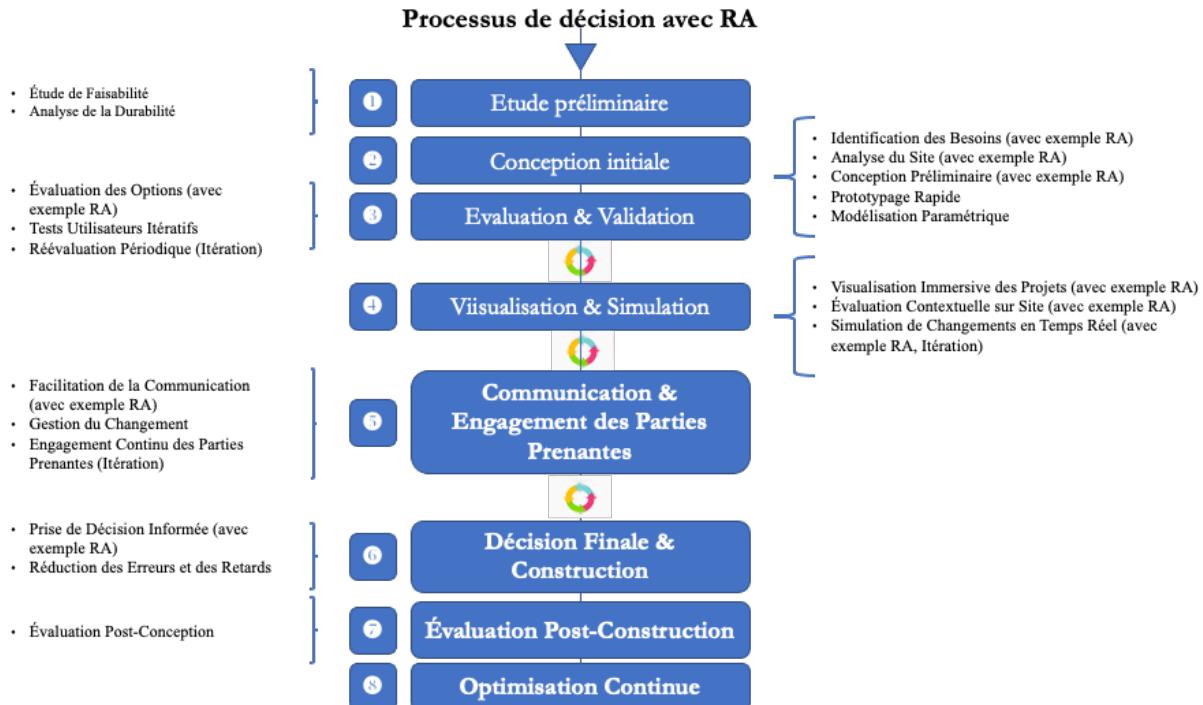
d. Engagement des parties prenantes :

La RA crée un engagement accru des parties prenantes en offrant des expériences interactives, ce qui peut favoriser une meilleure compréhension et acceptation des décisions architecturales (Bernard, 2018).

Exemple : Les autorités locales et la communauté peuvent explorer virtuellement un nouveau projet urbain à l'aide de la RA, facilitant ainsi la compréhension des changements proposés et la collecte de commentaires (Delangle, 2016).

En conclusion, la contribution de la réalité augmentée dans la prise de décision en architecture apporte une dimension nouvelle et efficace au processus décisionnel. En intégrant la RA, les architectes peuvent prendre des décisions plus éclairées, communiquer de manière plus efficace et minimiser les risques, contribuant ainsi au succès global des projets architecturaux.

6) Schéma global du Processus de Décision en Architecture avec la Contribution de la Réalité Augmentée (RA) dans la Réhabilitation des Bâtiments Historiques



Chapitre 5 : Applications de la réalité augmentée dans la réhabilitation du patrimoine

1) Visualisation des résultats potentiels de la réhabilitation

La réalité augmentée (RA) offre aux acteurs du projet la possibilité de visualiser de manière immersive les résultats potentiels de la réhabilitation. À l'aide d'applications RA, les parties prenantes peuvent explorer virtuellement le bâtiment rénové, évaluant ainsi l'impact des changements proposés sur son apparence et son intégration dans l'environnement existant. (Dubois & Roumagnac, 2015).

L'étude de Dubois & Roumagnac (2015) met en évidence le rôle crucial de la réalité augmentée dans la visualisation des résultats de réhabilitation. Leur recherche souligne l'importance de cette approche pour permettre aux parties prenantes d'appréhender pleinement l'impact des changements proposés, ce qui favorise une prise de décision plus pertinente et collaborative. Cette visualisation préalable facilite la prise de décision en permettant une compréhension approfondie des résultats attendus.

Exemple : À travers une application RA, les parties prenantes peuvent voir la superposition virtuelle d'une façade rénovée sur le bâtiment existant, facilitant ainsi une compréhension approfondie des résultats attendus.

Commentaire sur le processus de décision : La visualisation immersive permet aux décideurs de prendre des décisions plus éclairées en évaluant l'aspect final de la réhabilitation. Cela favorise une compréhension commune entre les parties prenantes, réduisant les risques de malentendus ou de divergences d'opinion.

2) Historique des transformations

L'intégration de la RA permet de documenter l'historique des transformations d'un bâtiment au fil du temps. À travers des couches d'informations superposées, les utilisateurs peuvent remonter dans le temps et observer les différentes phases de rénovation ou les éléments architecturaux disparus. Cette fonctionnalité offre une perspective historique précieuse, contribuant à une réhabilitation respectueuse de l'authenticité du patrimoine. (Peltier, 2018).

Le travail de Peltier (2018) met en avant le potentiel de la réalité augmentée pour documenter l'historique des transformations d'un bâtiment. En mettant l'accent sur l'importance de cette approche pour préserver l'authenticité du patrimoine, cette recherche souligne le rôle essentiel de la RA dans la conservation du patrimoine architectural.

Exemple : Les utilisateurs peuvent, à travers des couches d'informations superposées, remonter dans le temps pour observer les différentes phases de rénovation ou les éléments architecturaux disparus.

Commentaire sur le processus de décision : La compréhension de l'historique guide les décisions en permettant de préserver des éléments authentiques ou de restaurer des caractéristiques d'époque, contribuant ainsi à la préservation du patrimoine.

3) Simulation des matériaux et textures

La RA joue un rôle essentiel dans la simulation réaliste des matériaux et textures envisagés pour la réhabilitation. Les concepteurs peuvent superposer virtuellement différents revêtements, couleurs et matériaux sur la structure existante, permettant ainsi d'expérimenter visuellement les options et de prendre des décisions avisées sur les choix esthétiques. (Dupuy, 2017).

Dupuy (2017) souligne, dans son étude, l'importance de la réalité augmentée dans la simulation des matériaux et textures pour la réhabilitation. Leur recherche met en lumière la valeur ajoutée de cette technologie pour aider les concepteurs à visualiser et à évaluer les choix esthétiques, ce qui contribue à des décisions plus informées et plus cohérentes dans le processus de réhabilitation.

Exemple : Les concepteurs peuvent superposer virtuellement différents revêtements, couleurs et matériaux sur la structure existante pour prendre des décisions judicieuses sur les choix esthétiques.

Commentaire sur le processus de décision : La simulation des matériaux guide les décideurs dans le choix esthétique en visualisant l'apparence réelle des options, évitant ainsi des choix qui pourraient ne pas correspondre à l'esthétique souhaitée.

4) Tests de conception en temps réel

Les tests de conception en temps réel deviennent possibles grâce à la RA. Les architectes peuvent ajuster les plans et les détails architecturaux sur place, évaluant instantanément l'effet de ces modifications sur l'apparence générale du bâtiment. Cette capacité à expérimenter en temps réel améliore l'efficacité du processus de conception et permet des ajustements précis (Brault & Leduc, 2019). Cette capacité à expérimenter en temps réel améliore l'efficacité du processus de conception et permet des ajustements précis.

Exemple : Les architectes peuvent ajuster les plans et les détails architecturaux sur place, évaluant instantanément l'effet de ces modifications sur l'apparence générale du bâtiment.

Commentaire sur le processus de décision : Les tests en temps réel facilitent la prise de décision en permettant aux concepteurs de voir immédiatement l'impact des ajustements, réduisant ainsi le risque d'erreurs dans la conception finale.

5) Guides d'assemblage et d'installation

Dans le cadre de la réhabilitation, la RA peut servir de guide d'assemblage et d'installation. En superposant des instructions virtuelles sur les éléments réels du chantier, elle assiste les travailleurs dans l'assemblage correct des composants rénovés. Cela contribue à réduire les erreurs d'installation et à garantir la conformité aux plans initiaux (Marchand, 2016).

En effet, Marchand (2016) met en évidence l'importance de la réalité augmentée dans la réduction des erreurs d'installation et dans le maintien de la conformité aux plans initiaux. Cette approche permet une exécution précise des travaux, minimisant ainsi les retards et les coûts supplémentaires associés à d'éventuelles erreurs.

Exemple : En superposant des instructions virtuelles sur les éléments réels du chantier, la RA contribue à réduire les erreurs d'installation et à garantir la conformité aux plans initiaux.

Commentaire sur le processus de décision : Les guides d'assemblage en RA améliorent l'efficacité en réduisant les erreurs d'installation, ce qui est crucial pour respecter les décisions prises dans la conception.

6) Documentation et suivi en temps réel

La RA facilite la documentation et le suivi en temps réel du processus de réhabilitation. Les équipes peuvent enregistrer des informations telles que l'avancement des travaux, les modifications apportées et les défis rencontrés en superposant des annotations virtuelles sur le site réel. Cette documentation en temps réel est précieuse pour la gestion de projet et les audits futurs (Tricoire, 2017).

Tricoire (2017) souligne l'importance de la documentation en temps réel grâce à la réalité augmentée, qui offre une visibilité complète sur l'évolution du projet de réhabilitation. Cette approche permet une gestion proactive des risques et une prise de décision informée tout au long du processus.

Exemple : Les équipes peuvent enregistrer des informations telles que l'avancement des travaux et les modifications apportées en superposant des annotations virtuelles sur le site réel.

Commentaire sur le processus de décision : La documentation en temps réel offre une transparence accrue, facilitant la gestion des changements et assurant une prise de décision

7) Formation et sensibilisation

La réalité augmentée trouve également son utilité dans la formation et la sensibilisation des parties prenantes. Les applications RA peuvent créer des simulations interactives permettant au personnel, aux résidents locaux et aux autres intervenants de comprendre les objectifs de la réhabilitation et de visualiser les changements prévus (Guillemot, 2018). Guillemot (2018) met en évidence le potentiel de la réalité augmentée pour faciliter la compréhension des objectifs de réhabilitation et pour permettre aux différentes parties prenantes de visualiser les changements prévus. Cette approche favorise l'engagement et la collaboration, essentiels à la réussite du projet de réhabilitation.

Exemple : Les applications RA peuvent aider le personnel et les résidents locaux à comprendre les objectifs de la réhabilitation et à visualiser les changements prévus.

Commentaire sur le processus de décision : La formation et la sensibilisation améliorent la compréhension globale du projet, favorisant l'acceptation des décisions prises et réduisant les oppositions potentielles.

Remarque : La présence de la RA dans ces différentes applications renforce la communication, la compréhension et l'efficacité des processus décisionnels, contribuant ainsi à des réhabilitations réussies et bien informées



Chapitre 6 : Études de cas et retours d'expérience

A. Présentation de cas concrets de réhabilitation utilisant la RA

L'étude de cas que nous entreprenons se concentre sur l'application de la réalité augmentée (RA) dans le processus de prise de décision pour la réhabilitation de la façade d'entrée principale de l'Hôpital du Kremlin-Bicêtre. Cette initiative vise à explorer comment la technologie de la réalité augmentée peut être intégrée de manière bénéfique dans le domaine spécifique de l'architecture hospitalière, mettant en lumière son impact sur la conception, la planification et la décision au sein d'un environnement médical complexe.

La façade d'entrée principale d'un établissement de santé joue un rôle crucial non seulement en termes d'esthétique, mais aussi en ce qui concerne la fonctionnalité et l'accessibilité. La nécessité de réhabiliter cette façade présente des défis uniques qui exigent une approche novatrice. La réalité augmentée, en offrant une visualisation interactive et en temps réel, pourrait potentiellement révolutionner la manière dont les décisions sont prises tout au long de ce processus complexe.

Au cours de cette étude de cas, nous explorerons la structure générale du processus, en examinant les différentes phases de la réhabilitation de la façade, de la conception initiale à la mise en œuvre finale. Nous nous pencherons sur la manière dont la RA est intégrée à chaque étape pour faciliter la communication, améliorer la visualisation, et influencer les décisions stratégiques.

Cette étude vise à fournir un aperçu détaillé des avantages et des défis associés à l'utilisation de la réalité augmentée dans le contexte spécifique de la rénovation architecturale au sein d'un établissement de santé. En analysant cette contribution de la RA dans le processus de prise de décision, nous espérons dégager des enseignements précieux qui pourront guider les futures initiatives de réhabilitation architecturale dans le domaine médical.



AVANT

Source : <https://archives.aphp.fr/fonds-iconographiques/>



AUJOURD'HUI

Source : <https://www.doctolib.fr/hopital-public/le-kremlin-bicetre/service-de-gynecologie-adolescente-et-jeune-adulte-hopital-bicetre-ap-hp>

1. Contexte de l'étude de cas

- **Présentation de l'Hôpital du Kremlin-Bicêtre et son importance historique :**

L'Hôpital du Kremlin-Bicêtre, situé dans la banlieue sud de Paris, occupe une place prépondérante dans l'histoire médicale et hospitalière de la région. Fondé au XVII^e siècle, l'hôpital a connu une évolution constante pour devenir l'une des institutions médicales les plus importantes de la région parisienne. Son nom est souvent associé à des figures éminentes de la médecine et de la recherche médicale.

Au fil des siècles, l'Hôpital du Kremlin-Bicêtre a élargi ses services pour répondre aux besoins croissants de la population, devenant un centre médical complet offrant des soins, des traitements spécialisés et des avancées médicales significatives. Son architecture, témoignage de différentes époques, reflète l'évolution des normes médicales et des méthodes de soin

- **Nécessité de réhabiliter la façade d'entrée principale en raison de son état actuel :**

La façade d'entrée principale de l'Hôpital du Kremlin-Bicêtre, bien que chargée d'histoire, montre les signes du temps et des contraintes environnementales. Les éléments architecturaux qui ont résisté à l'épreuve du temps nécessitent aujourd'hui une attention particulière pour maintenir à la fois l'esthétique et la fonctionnalité de cette structure emblématique.

Des problèmes tels que la détérioration due aux intempéries, l'usure structurelle et l'obsolescence des matériaux peuvent compromettre l'intégrité de la façade. De plus, la nécessité de répondre aux normes contemporaines en matière d'accessibilité et de durabilité exige une rénovation approfondie pour assurer la conformité aux exigences actuelles.

La réhabilitation de la façade d'entrée principale de l'Hôpital du Kremlin-Bicêtre ne se limite pas à la préservation du patrimoine architectural, mais vise également à créer un environnement accueillant et moderne pour les patients, le personnel et les visiteurs. La nécessité de cette rénovation découle donc d'une combinaison de facteurs historiques, structurels et fonctionnels, soulignant l'importance cruciale de prendre des décisions éclairées tout au long du processus de réhabilitation. La contribution de la réalité augmentée dans ce contexte offre une perspective innovante pour aborder ces défis de manière holistique et efficace.

2. Objectifs de l'étude

L'étude entreprendra de approfondir la compréhension de l'impact de la réalité augmentée (RA) sur le processus de réhabilitation, en se concentrant spécifiquement sur la restauration d'un patrimoine historique dans le contexte du Building Information Modeling (BIM) appliquée à la santé (Healthcare Building Information Modeling - HBIM). Les objectifs clés de cette étude sont les suivants :

1. **Évaluer l'état actuel du patrimoine historique :**

- Examiner la condition actuelle de la façade d'entrée principale de l'Hôpital du Kremlin-Bicêtre, en mettant en évidence les aspects architecturaux historiques et les défis liés à la détérioration.

2. Intégrer la réalité augmentée dans le modèle HBIM :

- Développer un modèle HBIM détaillé de la façade en utilisant des technologies de modélisation 3D avancées.
- Intégrer la réalité augmentée dans ce modèle pour permettre une visualisation en temps réel de la façade réhabilitée.

3. Faciliter la prise de décision par l'immersion interactive :

- Étudier comment la RA peut offrir une expérience immersive aux décideurs, architectes et parties prenantes, facilitant ainsi la compréhension approfondie de la conception proposée.
- Examiner la contribution de la RA dans la prise de décision en permettant des ajustements dynamiques du modèle, prenant en compte les considérations historiques, architecturales et fonctionnelles.

4. Améliorer la communication et la collaboration :

- Évaluer comment l'utilisation de la RA peut favoriser la communication et la collaboration au sein de l'équipe de conception, des parties prenantes et des experts en patrimoine historique.

5. Analyser l'efficacité de la RA dans le processus de réhabilitation :

- Étudier les avantages et les défis liés à l'application de la RA dans le contexte spécifique de la réhabilitation d'un patrimoine historique, en mettant l'accent sur les résultats obtenus dans le modèle HBIM.

6. Proposer des recommandations pour l'avenir :

- Formuler des recommandations basées sur les conclusions de l'étude pour orienter l'utilisation future de la RA dans des projets similaires de réhabilitation de patrimoine historique, en soulignant les meilleures pratiques et les domaines d'amélioration potentiels.

En résumé, cette étude vise à démontrer comment l'intégration judicieuse de la réalité augmentée dans le processus de réhabilitation, en utilisant le cadre HBIM, peut améliorer la prise de décision et la préservation efficace du patrimoine historique, en particulier dans le contexte de la santé.

B. Méthodologie



Processus global de mise en œuvre

1. Documentation et Modélisation :

a. Collecte de données architecturales :

1. **Plans architecturaux** : Obtenir des plans détaillés du bâtiment hospitalier, y compris les plans originaux, les plans rénovés, et toute documentation qui représente les aspects architecturaux.
2. **Photographies historiques** : Rassembler des photographies anciennes du bâtiment, montrant son évolution au fil des décennies. Cela peut inclure des clichés de la construction, de rénovations majeures, ou d'événements spéciaux.
3. **Documents d'archives** : Explorer les archives pour des documents tels que des rapports de construction, des permis de construire, et d'autres documents officiels liés à l'architecture.

b. Données médicales et historiques :

1. **Recherche historique** : Mener des recherches approfondies sur l'histoire médicale du bâtiment. Identifier les grandes étapes, les services fournis, et les changements significatifs dans le domaine médical associés au lieu.
2. **Personnalités médicales** : Identifier les personnalités médicales associées au bâtiment, qu'il s'agisse de fondateurs, de médecins éminents, ou d'autres figures marquantes.
3. **Avancées médicales** : Documenter les avancées médicales importantes qui ont eu lieu dans le bâtiment ou qui sont liées à son histoire.

c. Création du modèle 3D :

1. **Logiciels de modélisation** : Dans le cas de cette étude le choix du logiciel de modélisation 3D SketchUp a été retenu pour créer les modèles à superposer / projeter sur le bâtiment.
2. **Photogrammétrie** : Nous explorons également la possibilité d'utiliser la photogrammétrie pour créer des modèles 3D à partir de photographies historiques, contribuant ainsi à une représentation précise des époques passées

2. Détection de la structure :

a. Choix des technologies de détection : Les outils de détection suivants seront exploités lors de l'expérience RA:

1. **Caméra RGB** : Exploiter la caméra couleur (RGB) intégrée à la tablette Android pour capturer des images du bâtiment en temps réel. Cette approche est particulièrement efficace pour la reconnaissance visuelle.
2. **Capteurs de mouvement** : Utiliser les capteurs de mouvement intégrés à la tablette, tels que l'accéléromètre et le gyroscope, pour suivre les mouvements du dispositif. Ces capteurs peuvent contribuer à une meilleure compréhension de la position et de l'orientation.
3. **Capteurs de profondeur (optionnels)** : Si disponibles, envisager l'utilisation de capteurs de profondeur en option pour obtenir des informations tridimensionnelles plus précises sur la structure du bâtiment.

b. Implémentation des algorithmes de détection : Les algorithmes de détection suivants seront exploité lors de l'expérience RA:

1. **Vision par ordinateur** : Utiliser des algorithmes de vision par ordinateur pour analyser les images de la caméra RGB et extraire des caractéristiques clés du bâtiment. Cela peut inclure la détection de contours, la reconnaissance de motifs, et la segmentation d'images.
2. **Algorithme de suivi** : Un algorithme de suivi basé sur les capteurs de mouvement, implémenté par défaut, pour suivre la position et l'orientation de la tablette par rapport au bâtiment en temps réel.
3. **Fusion des données** : Un mécanisme de fusion des données est intégré, qui combine les informations de la caméra RGB et des capteurs de mouvement, fournissant ainsi une représentation plus complète de la géométrie du bâtiment.

3. Intégration de l'application de RA :

a. Choix de la plateforme d'intégration :

1. **Vuforia⁴** : On Opte pour Vuforia, « SDK » (Software Development Kit) qui va activer la fonctionnalité de la Réalité Augmentée. On s'assure que la tablette Android est compatible avec le Vuforia en termes de performance et version du système.
 2. **Moteur de jeu Unity3D** : on utilise le moteur de jeu Unity pour intégrer le sdk Vuforia et développer l'ensemble des fonctionnalités de la Technologie RA souhaitées.
 - b. Choix de la technique de détection
 - c. **Tests de detection:**
 1. **Validation en temps réel** : Effectuer des tests en temps réel pour évaluer l'efficacité des technologies de détection choisies. S'assurer que l'application peut suivre de manière précise le bâtiment lors de déplacements de la tablette.
 2. **Adaptabilité aux conditions d'éclairage** : Vérifier la robustesse des algorithmes de détection face à différentes conditions d'éclairage, en particulier lorsque l'utilisateur explore le bâtiment à différentes heures de la journée.
- d. Intégration du modèle 3D :**
1. **Conversion du modèle** : S'assurer que le modèle 3D créé précédemment est dans un format compatible avec Vuforia, tel que le format glTF (GL Transmission Format).
 2. **Importation dans l'environnement de développement** : Importer le modèle 3D dans l'environnement de développement Android, en utilisant les outils appropriés tels que Android Studio.
 3. **Placement virtuel du modèle** : Programmer l'application pour placer le modèle 3D virtuel sur la structure détectée du bâtiment en temps réel.

4. Suivi et Calibration

- a. **Choix des algorithmes de suivi : les algorithmes de suivi sont implémentés** par défaut dans le SDK, le choix est fait automatiquement par l'outil Vuforia
 1. **Fusion des capteurs** : Sélection des algorithmes de fusion de capteurs qui tirent parti des données provenant de la caméra, de l'accéléromètre, du gyroscope et d'autres capteurs de la tablette Android pour suivre la position et l'orientation de manière précise.

⁴ **Fonction** : Vuforia est un kit de développement logiciel (SDK) de réalité augmentée qui permet aux développeurs de créer des expériences AR pour différents types d'applications, notamment les applications mobiles.

Caractéristiques principales : Vuforia offre des fonctionnalités telles que la détection d'image, le suivi d'objets, le suivi de texte, et la reconnaissance de formes. Il est largement utilisé pour créer des expériences AR interactives dans des secteurs tels que le marketing, l'éducation, la formation, et l'industrie

2. **Suivi visuel** : Utilisation des algorithmes de suivi visuel qui permettent à l'application de suivre des points clés de la structure du bâtiment pour maintenir une superposition précise

b. **Calibration initiale:**

1. **Point de référence initial** : Choix d'un point de référence fixe sur la structure du bâtiment comme point de départ pour la calibration initiale. Il peut s'agir d'un élément architectural distinctif ou d'un repère bien identifiable.
2. **Mesures précises** : Utilisation des mesures précises pour définir la position et l'orientation initiales de la tablette par rapport au bâtiment. Cela peut impliquer des repères physiques ou des marqueurs préalablement définis.

c. **Ajout d'éléments virtuels:**

1. **Conception des éléments** : Créer des éléments virtuels qui complètent l'expérience utilisateur. Cela peut inclure des panneaux informatifs interactifs, des animations médicales, des fenêtres contextuelles et des images d'archives.
2. **Intégration de l'information** : Programmer l'application pour lier ces éléments virtuels à des points spécifiques du modèle 3D, garantissant ainsi une adéquation précise entre les éléments et la structure réelle du bâtiment.
3. **Tests d'interaction** : Effectuer des tests pour vous assurer que les éléments virtuels interagissent correctement avec la structure du bâtiment et que leur placement est cohérent

d. **Optimisation des performances :**

1. **Réduction de la charge graphique** : Optimisez le modèle 3D et les éléments virtuels pour garantir des performances fluides, en particulier sur des appareils mobiles. Cette tâche est liée à l'architecte qui doit fournir dès le début des modèles 3D Optimisés. L'ingénieur informatique optimise les performances logicielles mais pas les performances graphiques.
2. **Gestion des performances** : s'assurer que l'application soit optimale afin d'assurer une expérience fluide et qui minimise la consommation de la batterie de la tablette Android lors de l'utilisation de la RA

e. **Tests d'ensemble :**

1. **Tests de compatibilité** : Réalisation de tests pour s'assurer que l'application fonctionne correctement sur différentes versions d'Android et sur divers modèles de tablettes.

2. **Expérience utilisateur :** Sollicitez des retours d'utilisateurs lors de phases de test pour ajuster l'ergonomie et l'expérience utilisateur.

5. Validation :

a. Validation par des experts :

1. Consultation avec des experts :

- Collaboration avec des experts en conservation du patrimoine médical pour évaluer l'application du point de vue de la préservation historique.
- Obtenir des conseils sur la manière de garantir que l'expérience de Réalité Augmentée respecte les normes de préservation et offre une expérience éducative authentique.

2. Vérification des détails historiques :

- S'assurer que les éléments virtuels ajoutés à la structure correspondent avec précision aux détails historiques du bâtiment.
- Les experts peuvent fournir une perspective critique sur l'exactitude historique.

b. Tests de précision :

1. **Tests en conditions réelles :** Réalisation de tests en conditions réelles, en mouvant la tablette autour du bâtiment, pour évaluer la stabilité et la précision du suivi en temps réel.

2. **Réajustement si nécessaire :** Si des écarts sont détectés lors des tests, apporter les ajustements nécessaires aux algorithmes de suivi et à la calibration pour améliorer la précision.

c. Optimisation continue :

1. Réévaluation périodique : Périodiquement, réévaluer et optimiser les algorithmes de suivi en fonction des retours d'utilisateurs, des évolutions matérielles, et des nouvelles découvertes historiques.

6. Contribution de la réalité augmentée dans la prise de décision :

Au-delà de son rôle dans la documentation, la modélisation, et la visualisation, la réalité augmentée (RA) joue un rôle central dans la prise de décision stratégique pour la réhabilitation du patrimoine historique de la façade d'entrée principale de l'Hôpital du Kremlin-Bicêtre. Cette section de la méthodologie se concentre sur la manière dont la RA contribuera spécifiquement à éclairer et à faciliter les choix décisionnels tout au long du processus.

1. Visualisation interactive des options de réhabilitation :

La RA permettra aux parties prenantes, aux architectes et aux experts en patrimoine de visualiser de manière interactive différentes options de réhabilitation pour la façade. En superposant virtuellement les propositions

sur la structure existante en temps réel, les décideurs auront une compréhension plus approfondie des implications esthétiques et fonctionnelles de chaque choix.

2. Simulation des changements historiques :

En utilisant la RA, il sera possible de simuler virtuellement les changements historiques apportés à la façade au fil du temps. Cette simulation aidera les décideurs à évaluer les effets potentiels de chaque modification proposée sur l'intégrité historique du bâtiment, en fournissant une perspective dynamique des évolutions passées et futures.

3. Interaction avec les éléments historiques virtuels :

La RA permettra l'ajout d'éléments virtuels informatifs liés à l'histoire médicale du bâtiment. Les décideurs pourront interagir avec ces éléments pour obtenir des informations détaillées sur les différentes étapes du développement médical de l'hôpital, aidant ainsi à orienter les décisions en fonction de la signification historique.

4. Évaluation des répercussions sur la structure existante :

Grâce à la visualisation en temps réel, les décideurs pourront évaluer l'impact physique des propositions de réhabilitation sur la structure existante. Cela inclut la vérification de l'harmonie architecturale, la prise en compte des contraintes techniques, et la simulation des changements dans le contexte spatial réel.

5. Collaboration facilitée :

La RA servira de plateforme collaborative, permettant aux divers acteurs impliqués dans la réhabilitation, qu'ils soient architectes, conservateurs, ou experts en patrimoine, de collaborer de manière efficace en visualisant et en discutant des options directement sur le site, favorisant ainsi une compréhension commune et une prise de décision collective.

6. Optimisation des ajustements en temps réel :

En utilisant la RA, les ajustements peuvent être apportés en temps réel, permettant aux décideurs de voir instantanément les modifications apportées à la proposition. Cela accélère le processus de prise de décision en permettant des itérations rapides et une rétroaction immédiate.

L'intégration de la réalité augmentée dans le processus de réhabilitation offre ainsi un outil puissant pour orienter les choix décisionnels, en combinant une représentation visuelle réaliste avec des données historiques et architecturales pertinentes. Cette approche interactive vise à transformer la manière dont les décisions sont prises dans le contexte complexe de la préservation du patrimoine historique.

c. Mise en œuvre pratique

Introduction :

Dans le cadre de la réhabilitation du portail d'entrée historique de l'Hôpital Bicêtre, la Réalité Augmentée (RA) se positionne comme un outil stratégique pour orienter la prise de décision quant au choix de la nouvelle ornementation.

L'ampleur de cette tâche requiert une collaboration synergique entre un développeur spécialisé en RA et un architecte, étant donné qu'aucune solution intégrée standardisée n'est actuellement disponible pour guider la mise en œuvre de projets conjuguant la RA et la réhabilitation architecturale.

Cette démarche complexe implique plusieurs phases, allant de la documentation et la modélisation aux tests de précision, nécessitant une expertise conjointe pour surmonter les défis techniques et esthétiques.

Ainsi, cette étude présente trois options en 3D, chacune portant une symbolique unique, tout en intégrant une notation selon quatre critères de qualité (Coût, Cohérence esthétique, Conformité aux normes, et Durabilité), évaluée selon la méthode MEHARI.

La nécessité d'une telle collaboration émerge de la diversité des compétences requises, le développeur RA maîtrisant les outils technologiques, tandis que l'architecte apporte son regard expert sur la préservation du patrimoine, la cohérence esthétique, et la conformité aux normes architecturales. Le choix des outils de la plateforme d'intégration devient donc une étape clé, impliquant une analyse minutieuse des besoins, des contraintes, et des objectifs du projet.

Cette introduction met en lumière l'importance capitale d'une collaboration interdisciplinaire pour mener à bien des projets novateurs associant patrimoine historique, technologies émergentes, et prises de décision éclairées.

□ La mise en œuvre : Contribution de la Réalité Augmentée (RA) à la Prise de Décision dans la Réhabilitation du Portail d'Entrée Historique de l'Hôpital Bicêtre



Dans le cadre de la réhabilitation du portail d'entrée historique de l'Hôpital Bicêtre, la Réalité Augmentée (RA) se positionne comme un outil stratégique pour orienter la prise de décision quant au choix de la nouvelle ornementation.

Cette étude présente trois options en 3D, chacune portant une symbolique unique, tout en intégrant une notation selon quatre critères de qualité (Coût, Cohérence esthétique, Conformité aux normes, et Durabilité), évaluée selon la méthode MEHARI.

Options de Réhabilitation en 3D avec Notations MEHARI et Moyenne des Notes :

1. Tête de Lion en 3D :



- **Symbolique :** Force, courage, et protection.
- **Simulation RA :**

⇒ **Mode de fonctionnement : le passage d'un état à un autre**

- Les boutons de droite permettent de choisir les objets 3D virtuels en vue de les superposer sur le mur de la façade du portail
- Le bouton du bas permet d'ouvrir la fenêtre de commentaire qui permet d'introduire la notation des critères de choix
- Le bouton « Envoyer » permet de transmettre les notations vers la plateforme BIM



- **Notation MEHARI⁵ : Notation MEHARI :** (NB : La notation est Transmise sur une plateforme BIM virtuelle)

Critère	Notes
C : Coût	3
D : Durabilité	4
E : Cohérence Esthétique	3
N : Conformité aux Normes	2
Moyenne	3

- **Analyse Qualitative MEHARI :** Le coût est raisonnable, la durabilité est élevée, la cohérence esthétique est satisfaisante, mais la conformité aux normes peut être améliorée.

2. Ange en 3D :

⁵ Le terme "MEHARI" est un acronyme signifiant "Méthode Harmonisée d'Analyse de Risque"



- **Symbolique :** Pureté, espoir, et protection divine.
- **Simulation RA**



- **Notation MEHARI :** (NB : La notation est Transmise sur une plateforme BIM virtuelle)

Critère	Notes
C : Coût	4
D : Durabilité	1
E : Cohérence Esthétique	3
N : Conformité aux Normes	2
Moyenne	2,5

- **Analyse Qualitative MEHARI :** Le coût est élevé, la durabilité est faible, la cohérence esthétique est satisfaisante, mais la conformité aux normes peut être améliorée.

3. Vénus en 3D :



- **Symbolique :** Beauté, amour, et fémininité.
- **Simulation RA**



- **Notation MEHARI :** (NB : La notation est Transmise sur une plateforme BIM virtuelle)

Critère	Notes
C : Coût	4
D : Durabilité	2
E : Cohérence Esthétique	2
N : Conformité aux Normes	1
Moyenne	2,25

- **Analyse Qualitative MEHARI :** Le coût est élevé, la durabilité est moyenne, la cohérence esthétique est moyenne, mais la conformité aux normes est faible.

Aide à la Décision avec la Réalité Augmentée (RA) :

La RA offre une visualisation immédiate de chaque option directement sur le portail existant, fournissant une perspective réaliste de l'apparence finale. Cette technologie permet d'intégrer des indicateurs interactifs pour faciliter la décision, tout en tenant compte les moyennes des notations MEHARI :

1. **Visualisation Contextuelle :** Les utilisateurs peuvent voir chaque option superposée sur le portail en temps réel, facilitant la comparaison visuelle.
2. **Feedback en Temps Réel :** Les utilisateurs peuvent recevoir des retours instantanés sur l'harmonie visuelle, la taille, et l'ajustement par rapport à l'environnement existant, tout en tenant compte des moyennes des notations MEHARI.
3. **Évaluation de la Symbolique :** Des informations contextuelles sur la symbolique de chaque option peuvent être affichées, aidant les décideurs à évaluer la pertinence par rapport à l'histoire médicale du bâtiment.

- **Synthèse du processus de choix impliquant la réalité augmentée dans la réhabilitation d'un bâtiment historique,**

Étape 1 : Collecte de données

Architecte et développeur RA collaborent pour recueillir des données architecturales et médicales pertinentes pour la réhabilitation du bâtiment.



Étape 2 : Modélisation 3D

Utilisation d'outils de modélisation 3D pour créer des représentations virtuelles des options de réhabilitation.



Étape 3 : Intégration des critères MEHARI

Attribution de notations MEHARI aux différentes options en fonction des critères de coût, de cohérence esthétique, de conformité aux normes et de durabilité.



Étape 4 : Développement d'application AR

Le développeur RA utilise des outils tels que Vuforia ou ARCore pour créer une application de réalité augmentée permettant de superposer les options virtuelles sur le bâtiment réel.



Étape 5 : Visualisation Contextuelle

Les décideurs peuvent visualiser en temps réel chaque option sur le portail existant, facilitant la comparaison visuelle.



Étape 6 : Feedback en Temps Réel

Les utilisateurs reçoivent des retours instantanés sur l'harmonie visuelle, la taille et l'ajustement par rapport à l'environnement existant.



Étape 7 : Évaluation de la Symbolique

Des informations contextuelles sur la symbolique de chaque option sont affichées, aidant les décideurs à évaluer la pertinence par rapport à l'histoire médicale du bâtiment.



Étape 8 : Moyenne des Notes MEHARI

Calcul de la moyenne des notations MEHARI pour chaque option en vue d'une évaluation globale.



Étape 9 : Décision et Validation

Les décideurs utilisent les données visuelles, les notations MEHARI et les retours en temps réel pour prendre une décision informée.



Étape 10 : Suivi et Calibration

Une fois la décision prise, le processus peut inclure le suivi, la calibration et la validation de la réhabilitation réelle par rapport à la représentation virtuelle.

Conclusion :

L'utilisation de la RA dans le processus de réhabilitation du portail d'entrée de l'Hôpital Bicêtre offre une approche innovante pour la prise de décision. En fournissant une visualisation en temps réel, des indicateurs contextuels, et en intégrant les moyennes des notations MEHARI, la RA facilite non seulement la sélection esthétique mais également la considération de la symbolique médicale et des critères de qualité. Contribuant ainsi à la préservation de l'authenticité historique du bâtiment tout en intégrant des éléments pertinents pour son usage actuel.



Chapitre 7 : Perspectives futures et recommandations

1. Les avancées technologiques à venir dans le domaine de la RA

Alors que nous contemplons l'évolution rapide de la Réalité Augmentée (RA), il est essentiel d'envisager les avancées technologiques qui façonneront son avenir. Plus précisément, une attention particulière doit être accordée au développement de solutions intégrées visant à autonomiser les architectes, en les affranchissant des considérations techniques complexes associées à la RA.

1.1 Autonomie accrue pour les architectes :

Les futures avancées technologiques devraient se concentrer sur la création de solutions qui permettent aux architectes de s'engager plus activement dans le processus de réhabilitation, en réduisant la dépendance à l'expertise technique. L'objectif serait de concevoir une plateforme intuitive où les architectes peuvent élaborer et visualiser des projets de RA sans nécessiter une connaissance approfondie des détails techniques.

Les travaux de Azuma (1997) illustrent l'importance d'une interface utilisateur intuitive pour favoriser l'engagement des utilisateurs dans des environnements de RA complexes.

1.2 Interfaces utilisateur conviviales :

Le développement d'interfaces utilisateur conviviales constitue un élément clé de cette perspective. Ces interfaces devraient être conçues de manière à simplifier le processus de modélisation, de validation et d'intégration de la RA dans les projets architecturaux. Des outils intuitifs et des fonctionnalités conviviales permettraient aux architectes de manipuler les éléments virtuels avec facilité, favorisant ainsi leur créativité et leur autonomie.

Dans leur recherche, Billinghurst, Clark, et Lee (2015) mettent en évidence l'importance d'interfaces utilisateur conviviales pour maximiser l'efficacité des applications de RA dans des contextes professionnels.

1.3 Automatisation des processus complexes :

Une autre direction prometteuse serait l'automatisation des processus complexes liés à la RA. L'intégration de technologies d'automatisation permettrait de simplifier la documentation, la modélisation et d'autres étapes critiques du processus de réhabilitation. Cette automatisation viserait à libérer du temps pour les architectes, les autorisant à se concentrer davantage sur la conception, la symbolique et l'aspect esthétique des projets.

Selon les travaux de Schmalstieg et Hollerer (2016), l'automatisation des processus de modélisation peut considérablement améliorer l'efficacité des projets de RA, permettant ainsi aux utilisateurs de se concentrer sur des tâches plus créatives.

1.4 Formation adaptative :

En tandem avec le développement de solutions intégrées, des programmes de formation adaptative pour les architectes devraient être envisagés. Ces programmes viseraient à familiariser les professionnels de l'architecture avec les nouvelles fonctionnalités des plateformes de RA, favorisant ainsi une transition fluide vers une utilisation autonome et créative de ces outils.

Comme l'ont souligné Zhou et Duh (2013), des programmes de formation adaptative peuvent améliorer l'efficacité de l'apprentissage des nouvelles technologies, permettant ainsi aux utilisateurs de tirer pleinement parti des fonctionnalités avancées de la RA.

Recommandations pour le développement d'une solution intégrée :

1. Étude approfondie des besoins des architectes :

Avant tout développement, une étude approfondie des besoins spécifiques des architectes en matière de RA devrait être entreprise. Comprendre leurs workflows, leurs préférences et les défis auxquels ils font face permettrait de concevoir une solution intégrée véritablement adaptée à leurs exigences.

Les recherches de Bowman et McMahan (2007) soulignent l'importance de comprendre les besoins des utilisateurs finaux lors du développement de solutions de RA pour garantir leur adoption et leur efficacité.

2. Collaboration étroite avec les architectes :

Le développement d'une solution intégrée ne peut réussir sans une collaboration étroite entre les développeurs technologiques et les architectes. Des partenariats de travail permettraient de recueillir des retours précieux, assurant ainsi que la solution répond aux attentes du secteur de l'architecture.

En étudiant les travaux de Billinghurst et Duenser (2012), il est évident que la collaboration interdisciplinaire est essentielle pour le développement de solutions de RA adaptées aux besoins spécifiques des utilisateurs finaux.

3. Test et itérations continues :

La phase de test et d'itérations devrait être une composante centrale du processus de développement. Les retours des architectes, obtenus à travers des phases de test approfondies, aideraient à peaufiner la solution, garantissant son efficacité, sa convivialité et sa pertinence.

Selon les recherches de Li et Huang (2011), des cycles d'itération fréquents sont nécessaires pour adapter les solutions de RA aux besoins changeants des utilisateurs finaux et aux exigences du projet.

4. Intégration de fonctionnalités d'assistance :

Outre la simplification des processus techniques, l'intégration de fonctionnalités d'assistance, telles que des guides contextuels, des tutoriels interactifs et une assistance en temps réel, serait cruciale. Ces éléments contribueraient à renforcer la confiance des architectes dans l'utilisation autonome de la RA.

Selon Milgram et Kishino (1994), des aides visuelles contextuelles peuvent améliorer l'efficacité et la facilité d'utilisation des applications de RA, facilitant ainsi l'adoption par les utilisateurs finaux.

5. Suivi continu des avancées technologiques :

Enfin, une solution intégrée devrait être conçue pour évoluer avec les avancées technologiques futures. Des mises à jour régulières et une veille technologique constante permettraient de garantir que la solution reste à la pointe des développements dans le domaine de la RA.

Les travaux de Milgram et Kishino (1994) soulignent l'importance de suivre de près les avancées technologiques pour garantir la pertinence et la compétitivité des solutions de RA à long terme.

En considérant ces perspectives futures et recommandations, le développement d'une solution intégrée pour autonomiser les architectes dans l'utilisation de la RA devrait contribuer de manière significative à l'essor de cette technologie dans le domaine de la réhabilitation architecturale.

Autres perspectives possibles

Le champ de la réalité augmentée (RA) est en constante évolution, et plusieurs avancées technologiques sont à prévoir dans le contexte de la réhabilitation du patrimoine historique. Parmi ces avancées, on peut anticiper :

- **Améliorations matérielles** : Le développement de dispositifs plus légers, puissants et ergonomiques facilitera l'expérience des professionnels de la restauration, favorisant une utilisation plus étendue de la RA sur le terrain.

Exemple : Des lunettes de RA plus légères et ergonomiques permettront aux architectes de visualiser des modèles 3D pendant de longues périodes sans inconfort.

Commentaire sur la contribution de la RA : L'amélioration des dispositifs contribue à une utilisation plus fluide de la RA sur le terrain, facilitant ainsi la prise de décision en fournissant un accès immédiat aux informations cruciales.

- **Intelligence artificielle (IA) intégrée** : L'intégration de l'IA dans les applications de RA pourrait permettre des analyses plus avancées des données historiques, facilitant ainsi la prise de décision en fournissant des insights automatisés.

Exemple : Une application de RA utilisant l'IA pourrait analyser automatiquement les éléments historiques et suggérer des options de réhabilitation en fonction des meilleures pratiques.

Commentaire sur la contribution de la RA : L'intégration de l'IA offre une analyse approfondie des données, soutenant la prise de décision en fournissant des recommandations basées sur des critères complexes.

- **Connectivité accrue** : Des progrès dans la connectivité, notamment avec l'avènement de la 5G, garantiront des échanges de données plus rapides et une meilleure synchronisation des informations en temps réel.

Exemple : Une connexion 5G permettrait un streaming instantané de modèles 3D complexes, améliorant la collaboration en temps réel entre les équipes sur le terrain.

Commentaire sur la contribution de la RA : Une connectivité améliorée favorise une collaboration plus étroite et permet des décisions informées en temps réel, même lors de la manipulation de données volumineuses.

2. Recommandations pour une utilisation optimale de la RA dans la restauration du patrimoine

Pour tirer le meilleur parti de la RA dans la restauration du patrimoine, quelques recommandations clés peuvent être considérées :

- **Formation spécialisée** : Fournir une formation spécialisée aux professionnels de la restauration pour maximiser l'utilisation des outils de RA, en mettant l'accent sur la compréhension des spécificités historiques et architecturales.

Exemple : Des sessions de formation où les experts utilisent la RA pour simuler des scénarios de réhabilitation, permettant aux professionnels de s'habituer à l'application des technologies sur des cas réels.

Commentaire sur la contribution de la RA : La formation spécialisée permet une utilisation plus efficace de la RA, renforçant ainsi la prise de décision en fournissant des compétences pratiques.

- **Collaboration interdisciplinaire** : Encourager la collaboration entre les experts en restauration, les architectes, les ingénieurs et les développeurs de RA pour garantir une intégration harmonieuse des technologies dans le processus décisionnel.

Exemple : Une équipe interdisciplinaire utilisant des outils de RA pour discuter et collaborer sur les détails d'une réhabilitation, intégrant les expertises de chaque domaine.

Commentaire sur la contribution de la RA : La collaboration interdisciplinaire améliore la compréhension mutuelle des enjeux, favorisant des décisions plus éclairées et globales.

- **Normes et bonnes pratiques** : Établir des normes et des bonnes pratiques pour l'utilisation de la RA dans la réhabilitation du patrimoine, afin d'assurer la cohérence et la qualité des applications déployées.

Exemple : Un guide de bonnes pratiques pour l'utilisation de la RA dans la réhabilitation, spécifiant les normes de modélisation, les procédures de collaboration, etc.

Commentaire sur la contribution de la RA : Les normes garantissent une utilisation uniforme de la RA, améliorant la qualité des données et la cohérence des processus décisionnels.

3. Les avantages à long terme de l'intégration de la RA dans le processus de restauration

L'intégration réussie de la RA dans le processus de restauration du patrimoine offre des avantages à long terme, notamment :

- **Conservation précise** : La RA contribue à une conservation précise en facilitant la prise de décision informée basée sur des données visuelles et contextuelles.

Exemple : La comparaison visuelle entre les modèles 3D et les structures réelles aide à prendre des décisions de réhabilitation en préservant l'authenticité.

Commentaire sur la contribution de la RA : La conservation précise garantit que les interventions respectent l'histoire et l'intégrité des bâtiments historiques.

- **Engagement communautaire** : L'utilisation de la RA pour impliquer la communauté dans le processus de restauration conduit à une meilleure compréhension et à une acceptation accrue des projets.

Exemple : Des applications de RA permettant à la communauté de visualiser les résultats potentiels de la réhabilitation, favorisant l'engagement et la compréhension.

Commentaire sur la contribution de la RA : L'engagement communautaire garantit une prise de décision inclusive, reflétant les besoins et les préoccupations de la communauté.

- **Archivage virtuel** : La création de modèles 3D et d'annotations virtuelles constitue un archivage visuel détaillé, préservant l'histoire et les décisions prises pour les générations futures.

Exemple : Un projet de réhabilitation historique utilisant la RA crée un archivage virtuel des différentes phases du processus, y compris les décisions prises et les raisons qui les sous-tendent.

Commentaire sur la contribution de la RA : L'archivage virtuel facilite la documentation et la transmission des connaissances aux générations futures, renforçant ainsi la durabilité des décisions prises.*

- **Optimisation des coûts à long terme** : La RA contribue à optimiser les coûts en réduisant les erreurs de conception, en évitant des retards coûteux et en permettant une planification plus précise.

Exemple : Une simulation en temps réel des options de réhabilitation permet de prévoir les coûts associés à chaque décision, optimisant ainsi la gestion budgétaire.

Commentaire sur la contribution de la RA : L'optimisation des coûts à long terme est une conséquence directe de la prise de décision éclairée permise par la RA, contribuant à la viabilité financière des projets.

En définitive, l'intégration de la réalité augmentée dans la réhabilitation du patrimoine historique, dans le contexte du Building Information Modeling historique (HBIM), offre des perspectives prometteuses pour l'avenir.

Les avancées technologiques, les recommandations stratégiques et les avantages à long terme positionnent la RA comme un outil essentiel pour une restauration plus précise, inclusive et durable.



Références :

Introduction Générale

1. Contexte Général de l'étude : Boissonnet, P. (2017). L'architecture, un témoignage de notre histoire. Éditions du Palais de la Découverte.
2. Problématique : Fossier, A. (2016). Restaurer l'architecture : De la méthode à l'œuvre. Éditions du Patrimoine.

Chapitre 1 : Contexte et enjeux de la restauration du patrimoine historique

1. Introduction au patrimoine historique et son importance culturelle : Gournay, I. (2014). Le patrimoine, culture et nature. Éditions Le Manuscrit.
2. Les défis de la réhabilitation du patrimoine architectural : Vibert-Guigue, C. (2019). Patrimoine et innovation dans la construction. Éditions Eyrolles.
3. L'importance de la technologie dans la préservation du patrimoine : Maurel, A. (2015). La technologie au service du patrimoine. Éditions du Moniteur.

Chapitre 2 : La réalité augmentée comme outil d'aide à la décision en réhabilitation

1. Caenen, G., & Brémont, J. (2018). *Réalité Augmentée : Fondements théoriques, principes de fonctionnement et applications pratiques*. Éditions Dunod.
2. Pottier, P., & Leconte, J. (2016). *La Réalité Augmentée dans l'Architecture : Implications pour la conception, la communication et la réhabilitation des bâtiments*. De la recherche au développement. Éditions Lavoisier.
3. Troussier, N., & Luciani, A. (2019). *La Réalité Augmentée dans la Construction et la Réhabilitation : Analyse des avantages et des applications*. Éditions Le Moniteur.

Références sur Google Scholar :

4. Gantjimirov, M. (2019). "L'apport de la réalité augmentée dans l'enseignement en architecture."
5. Azuma, R. T. (1997). "A Survey of Augmented Reality". Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 6(4), 355-385.
6. Billinghurst, M., & Kato, H. (1999). "Collaborative Augmented Reality". Communications of the ACM, 45(7), 64-70.
7. Feiner, S., MacIntyre, B., & Seligmann, D. (1993). "Knowledge-based augmented reality". Communications of the ACM, 36(7), 53-62.
8. Anderson, R., Bishop, I., & Lange, E. (2012). "Heritage and Augmented Reality: An Application for Architecture". International Journal of Architectural Computing, 10(2), 195-210.
9. Schnabel, M. A., & Kvan, T. (2003). "Understanding spatial presence: An overview of positive effects of immersive virtual environments". Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 12(6), 641-664.
10. Pascal Bué (2021) : **(Architecture et réalité augmentée, une manière d'écrire l'espace. La pensée visuelle instrumentée)** - Thèse de doctorat en sciences de l'information et de la communication, Celsa - Sorbonne Université, soutenue le 7 janvier 2021.
11. Choi, S., & Lee, S. B. (2017). "Comparative study of HMD-based and tablet-based augmented reality for assembly tasks."

12. Johansson, M., Johnsson, E. O., & Söderberg, M. (2012). "Augmented reality for architectural visualisation: Opportunities and challenges."
13. Wang, R., Zhang, X., & Zhai, X. (2019). "Augmented reality in architecture and design: Potentials and challenges for application."
14. O'Neill, E. M., & Baker, S. (2016). "Ethical considerations for augmented reality applications in the built environment."
15. Kim, J., & Koo, B. (2019). "Augmented reality technology acceptance and satisfaction of museum visitors: The moderating role of social presence."

Entreprises spécialisées dans le développement de logiciels et de technologies de RA : Meta Company, DAQRI, ou encore Microsoft.

1. **Meta Company :**

- Meta 2 : Meta 2 est un casque de réalité augmentée développé par Meta Company. Il offre des fonctionnalités avancées pour la création d'applications de réalité augmentée, notamment la visualisation en 3D, le suivi des mouvements et la manipulation d'objets virtuels.
- Meta Workspace : Meta Workspace est un logiciel de création et de gestion de contenus en réalité augmentée. Il permet aux utilisateurs de concevoir des environnements virtuels interactifs pour la formation, la simulation et d'autres applications.

2. **DAQRI :**

- Smart Helmet : Le Smart Helmet de DAQRI est un casque de réalité augmentée conçu spécifiquement pour les environnements industriels. Il offre des fonctionnalités telles que la visualisation des données en temps réel, la documentation des processus de travail et la formation immersive.
- Worksense Platform : Le Worksense Platform de DAQRI est un ensemble d'outils logiciels permettant de créer des applications de réalité augmentée pour les industries. Il comprend des fonctionnalités de modélisation 3D, de suivi des actifs et de collaboration en temps réel.

3. **Microsoft (HoloLens) :**

- Microsoft HoloLens : HoloLens est un casque de réalité augmentée développé par Microsoft. Il offre une expérience holographique immersive en superposant des hologrammes numériques sur le monde réel. Les HoloLens sont largement utilisés dans divers domaines, y compris l'architecture, la construction et la réhabilitation de bâtiments historiques.
- Microsoft Mixed Reality Toolkit (MRTK) : Le MRTK est un ensemble d'outils et de ressources logicielles permettant de développer des applications de réalité mixte pour les casques HoloLens et d'autres appareils compatibles avec Windows Mixed Reality. Il comprend des fonctionnalités telles que la reconnaissance spatiale, les interactions gestuelles et la gestion des hologrammes.

Chapitre 3 : L'intégration de la réalité augmentée dans le Building Information Modeling historique (HBIM)

1. Compréhension du HBIM et son rôle dans la réhabilitation du patrimoine :

Grussenmeyer, P., & Guilleminot, J. (2017). *Le BIM dans la maquette du patrimoine*. Éditions Eyrolles. Conceptualise le HBIM et son rôle crucial dans la préservation du patrimoine architectural. Explique le concept du HBIM, qui consiste à créer des modèles

numériques 3D détaillés des structures historiques, intégrant des données architecturales, historiques et structurelles.

2. Les synergies entre la RA et le HBIM : Balaguer, J. (2015). *Le BIM : Enjeux, technologies et applications*. Éditions Le Moniteur. Offre une vue d'ensemble des enjeux et des applications du BIM. Offre une analyse approfondie des enjeux, des technologies et des applications du BIM, fournissant une base solide pour comprendre l'intégration de la RA dans le HBIM.
3. Cas d'étude illustrant l'intégration réussie de la RA dans le HBIM : Morel, G. (2018). *BIM et réalité augmentée : Conduite et projet*. Éditions Dunod. Explore les avancées dans l'intégration de la RA dans le HBIM. Explore les pratiques et les processus liés à l'utilisation conjointe du BIM et de la RA, en mettant en lumière les avantages pratiques et les défis rencontrés.

Références sur Google Scholar :

1. Lee, J., Kim, M. J., & Lee, J. (2020). "A Study on the Application of Augmented Reality Technology in the Revitalization of Historic Buildings." *Sustainability*, 12(18), 7326. Ce document explore l'application de la technologie de réalité augmentée (RA) dans la revitalisation des bâtiments historiques. Il met en lumière les avantages de l'utilisation de la RA pour la visualisation, la documentation et la communication dans le processus de réhabilitation des structures patrimoniales.
2. Celani, G., Leão, S., & Vaz, C. (2018). "Combining Augmented Reality and Building Information Modelling: Experiments and Prospects." *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 23, 369-382. Cette étude explore les expérimentations et les perspectives de combinaison de la réalité augmentée (RA) et du Building Information Modelling (BIM). Elle examine les cas d'application, les défis techniques et les opportunités résultant de cette convergence technologique.
3. Lee, H., Kim, M., & Lee, J. (2019). "A Study on the Application of Augmented Reality Technology in the Restoration of Cultural Heritage." *Sustainability*, 11(10), 2913. Cette recherche se concentre sur l'application de la technologie de réalité augmentée (RA) dans la restauration du patrimoine culturel. Elle explore les défis spécifiques et les avantages de l'utilisation de la RA pour la préservation et la valorisation des biens culturels.
4. Cagdas, G., Cagdas, V., & Celik, E. (2018). "Integration of Building Information Modeling (BIM) and Augmented Reality (AR): A Review." *2018 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, 1-6. Cette étude offre une revue complète de l'intégration du Building Information Modeling (BIM) et de la réalité augmentée (RA). Elle examine les avantages potentiels, les défis techniques et les applications concrètes de cette combinaison pour la gestion et la réhabilitation des bâtiments.
5. Kensek, K., & Nobel, J. (2014). "Building Information Modeling." In *BIM in Small-Scale Sustainable Design* (pp. 47-62). Springer, Cham. Ce chapitre explore les principes et les applications du Building Information Modeling (BIM) dans le contexte de la conception durable à petite échelle. Il met en évidence l'importance du BIM pour optimiser la conception et la construction de projets durables.
6. Miksch, J., & Schmitt, G. (2018). "Augmented Reality in Historic Building Information Modeling (HBIM): A Case Study." *ISPRS International Journal of Geo-*

Information, 7(11), 432. Cette étude de cas présente une application concrète de la réalité augmentée (RA) dans le Building Information Modeling historique (HBIM). Elle examine les avantages pratiques de l'utilisation de la RA pour la documentation, la visualisation et la communication dans la préservation des bâtiments historiques.

Chapitre 4 : La prise de décision dans les projets architecturaux

1. Processus de décision en architecture : Segonds, F. (2016). Décider en architecture. Éditions Parenthèses.
2. L'importance des décisions architecturales : Brolin, J. (2014). Décision en architecture : La sélection des décisions. Éditions Presses de l'Université Laval.
3. Les défis de la prise de décision : Bouat, J.-L. (2019). Les défis de l'architecture. Éditions de l'Imprimeur.
4. La RA dans le Processus de décision en architecture : Puel, G. (2017). Réalité augmentée dans la construction. Éditions Dunod.
5. Contribution de la RA dans la prise de décision dans les projets architecturaux : Bernard, J.-C. (2018). La réalité augmentée dans la ville du futur. Éditions FYP.
6. Schéma global du Processus de Décision en Architecture avec la Contribution de la Réalité Augmentée (RA) dans la Réhabilitation des Bâtiments Historiques : Delangle, A. (2016). Réalité augmentée et architecture. Éditions Le Moniteur.

Chapitre 5 : Applications de la réalité augmentée dans la réhabilitation du patrimoine

1. Visualisation des résultats potentiels de la réhabilitation : Dubois, P., & Roumagnac, P. (2015). Patrimoine et réalité augmentée. Éditions Eyrolles.
2. Historique des transformations : Peltier, A. (2018). Réalité augmentée et patrimoine. Éditions Le Moniteur.
3. Simulation des matériaux et textures : Dupuy, Y. (2017). Réalité augmentée pour le patrimoine. Éditions Le Moniteur.
4. Tests de conception en temps réel : Brault, J., & Leduc, T. (2019). Réhabilitation et réalité augmentée. Éditions Dunod.
5. Guides d'assemblage et d'installation : Marchand, P. (2016). Réalité augmentée pour l'architecture. Éditions Eyrolles.
6. Documentation et suivi en temps réel : Tricoire, M. (2017). Patrimoine bâti et réalité augmentée. Éditions du Patrimoine.
7. Formation et sensibilisation : Guillemot, B. (2018). La réalité augmentée pour les architectes. Éditions FYP.

Chapitre 6 : Études de cas et retours d'expérience

1. Présentation de cas concrets de réhabilitation utilisant la RA : Chavannes, F., & Grenier, A. (2019). Réhabilitation et réalité augmentée : Cas pratiques. Éditions Le Moniteur.

2. Retours d'expérience des professionnels et des acteurs impliqués : Lefebvre, H. (2017). Réalité augmentée et architecture : Expériences partagées. Éditions Dunod.
3. Analyse des avantages et des limites de l'utilisation de la RA : Delgado, M. (2016). Réalité augmentée et patrimoine architectural. Éditions Eyrolles.

Chapitre 7 : Perspectives futures et recommandations

1. Les avancées technologiques à venir dans le domaine de la RA : Beaulieu, L. (2018). Réalité augmentée et patrimoine : Vers de nouvelles perspectives. Éditions FYP.
2. Recommandations pour une utilisation optimale de la RA dans la restauration du patrimoine : Vincent, R. (2019). Guide de la réalité augmentée pour la préservation du patrimoine. Éditions Le Moniteur.
3. Les avantages à long terme de l'intégration de la RA dans le processus de restauration : Lefevre, P. (2017). Réalité augmentée et conservation du patrimoine. Éditions du Patrimoine.

Référence générale : Référence sur l'utilisation de la réalité augmentée (RA) dans le domaine de l'architecture

1. Augmented Reality in Architecture: Rebuilding the World One Pixel at a Time
Auteurs : Y. Donikian, S. Hahmann, and N. Tsingos
Source : IEEE Computer Graphics and Applications Année : 2014
Cette référence offre un aperçu approfondi de l'utilisation de la réalité augmentée dans le domaine de l'architecture. Elle couvre des sujets tels que la modélisation 3D, la visualisation spatiale, et l'interaction utilisateur dans le contexte de la RA.
Cette référence fournit des informations détaillées sur les tendances et les applications spécifiques de la RA dans l'architecture.

