



Photo : Marion TISSIÈRES - Montage : Thibault VLEK

Visualisation de projets de construction en réalité augmentée sur mobile

Romain Délèze

Février 2026

Domaine Ingénierie et Architecture

Master conjoint UNIGE-HES-SO en développement territorial (MDT)

Orientation Ingénierie géomatique

Directeur : Dr. Jens INGENSAND

Expert : Dr. Thibaud CHASSIN

Mémoire n° : 1198



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

Hes·so
Haute Ecole Spécialisée
de Suisse occidentale

Résumé

La réalité augmentée – *augmented reality (AR)* – représente une évolution significative, mêlant le monde réel et le monde virtuel afin de créer des expériences utilisateurs immersives. L'avènement de l'AR sur le web (WebAR) rend cette technologie plus accessible en supprimant la nécessité d'un téléchargement préalable. Cette technologie est présente dans divers domaines de notre société, tels que les jeux vidéo, le marketing ou l'éducation. Son utilisation en aménagement du territoire reste encore rare, mais pourrait s'avérer bénéfique.

Une application de WebAR a été développée dans le but de tester l'impact d'une visualisation par réalité augmentée sur un projet de construction. Des utilisateurs potentiels ont été contactés afin de tester ce prototype et de l'évaluer au moyen d'un questionnaire. Les réponses obtenues, ainsi que les données enregistrées durant les tests, ont permis de vérifier les hypothèses de cette étude.

Les résultats démontrent une bonne acceptation du prototype, ainsi qu'une bonne compréhension du projet présenté. Le choix d'une application web et l'architecture de l'interface permettent une prise en main simplifiée. Cette méthode de visualisation est globalement bien accueillie par les utilisateurs ayant participé au test. Certaines limites subsistent néanmoins.

Les résultats obtenus montrent que la réalité augmentée peut créer une expérience immersive pour l'utilisateur, ce qui améliore sa compréhension d'un projet urbain. Des recherches futures pourraient se concentrer sur l'amélioration du géoréférencement tridimensionnel de la scène afin d'obtenir un rendu encore plus immersif et plus proche de la réalité.

Abstract

Augmented reality (AR) represents a significant evolution, combining the real and virtual worlds to create immersive user experiences. The advent of web-based augmented reality (WebAR) has made this technology more accessible by eliminating the need for a preliminary download. This technology is used in various fields of our society, such as video games, marketing, and education. Its application in spatial planning remains rare, but could prove beneficial.

A WebAR application was developed with the aim of testing the impact of an augmented reality visualization on a construction project. Potential users were invited to test this prototype and evaluate it through a questionnaire. The collected responses, as well as the data recorded during the tests, made it possible to verify the hypotheses of this study.

The results demonstrate good acceptance of the prototype, as well as a good understanding of the presented project. The choice of a web-based application and the interface architecture enable an intuitive user experience. This visualization method was generally well received by the users who participated in the test. However, certain limitations remain.

The results indicate that augmented reality can create an immersive experience for the user, thereby improving their understanding of an urban project. Future research could focus on improving the three-dimensional georeferencing of the scene in order to achieve an even more immersive and realistic rendering.

Remerciements

Je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères et ma gratitude envers toutes les personnes qui m'ont accompagnées durant ce travail, en particulier :

- **Dr. Jens Ingensand**, directeur de ce travail, pour ses enseignements passionnants dispensés durant mon cursus académique, ainsi que pour ses précieux conseils, sa disponibilité et son enthousiasme tout au long de ce travail.
- **Dr. Thibaud Chassin**, pour sa participation en tant qu'expert et ses conseils lors de la séance intermédiaire.
- **Mme Morgane Rothacker**, urbaniste à la Ville de Sion et cheffe de projet Ronquoz 21, pour la mise à disposition des données relatives à ce projet, ainsi que pour sa collaboration et participation tout au long du travail.
- **M. Maxime Collombin**, pour les conseils et le temps accordé.
- **M. Benjamin Melchiorre**, pour le soutien durant ce travail, mais aussi tout au long de notre cursus Master.
- **Mme Marion Tissières**, pour son soutien durant ce cursus Master et la relecture attentive du document.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Contexte	1
1.2	Objectifs	3
1.3	Structure du document	4
2	La réalité augmentée	5
2.1	Définitions	5
2.1.1	La réalité étendue	5
2.1.2	Méthodes de positionnement	6
2.2	Historique	7
2.3	Domaines d’application	8
2.3.1	Commerce et marketing	8
2.3.2	Divertissement	9
2.3.3	Formation	10
2.3.4	Assistant au quotidien	10
2.3.5	Santé	11
2.3.6	Expérience immersive	11
2.3.7	Manufacture	12
2.4	Aménagement du territoire et construction	13
2.5	Technologies	14
2.5.1	<i>Frameworks</i>	15
2.5.2	Librairies	15
2.5.3	Moteurs de jeu	15
2.5.4	Modélisation 3D	15
2.6	WebAR	16
2.7	Enjeux et limites de l’usage de la WebAR	17
2.7.1	Améliorer la géolocalisation	17
2.7.2	Expérience utilisateurs	19
2.7.3	Recueil des <i>feedbacks</i>	20
3	Zone d’étude	21
3.1	Ronquoz 21	21

3.1.1	Présentation du quartier	21
3.1.2	Contexte	22
3.1.3	Présentation du projet	22
3.1.4	Phases de réalisations	24
3.2	Projets sélectionnés	25
4	Cadre méthodologique de la recherche	27
4.1	Public cible	27
4.2	Hypothèses	28
5	Réalisation	31
5.1	Vue d'ensemble du système	31
5.1.1	Chronologie d'utilisation	31
5.1.2	Composants principaux	32
5.1.3	Environnement d'exécution	33
5.1.4	Points connus	33
5.2	Technologies utilisées	34
5.2.1	Environnement de développement	34
5.2.2	Technologie AR	35
5.2.3	Gestion des modèles 3D	35
5.3	Architecture du prototype	35
5.3.1	Moteur de réalité augmentée	35
5.3.2	Position GPS	37
5.3.3	Calibration	38
5.3.4	Transformation	40
5.3.5	Fonctionnement résumé	42
5.4	Modèles 3D	43
5.4.1	Simplification	43
5.4.2	Géoréférencement	43
5.5	Méthodes de validation	44
5.5.1	Évaluation du prototype	45
5.5.2	Enregistrement du suivi de l'utilisation	45
6	Synthèse des résultats	47
6.1	Présentation du processus de tests	47
6.1.1	Sélection des participants	47
6.1.2	Procédure des tests	47
6.2	Retours des utilisateurs	48
6.2.1	Questionnaire	48
6.2.2	Retours oraux, écrits et comportementaux	52
6.3	Performances techniques	54

7	Discussion	57
7.1	Analyse des résultats	57
7.1.1	H1 - Le profil d'utilisateur a une influence sur l'utilisation et l'utilisabilité de l'application.	58
7.1.2	H2 - L'AR améliore la compréhension du projet.	60
7.1.3	H3 - La calibration est contraignante pour l'utilisateur.	62
7.1.4	H4 - L'acceptabilité de la technologie est positive.	63
7.2	Portée et interprétation des résultats	65
8	Conclusion	67
9	Perspectives	69
9.1	Améliorations possibles	69
9.2	Nouveaux cas d'usages et d'études	70
	Bibliographie	71
	Annexes	75

Table des figures

1.1	Illustration de l'utilisation de l'AR via une page web. (unitear.com)	1
1.2	Différents niveaux de détails de modèles 3D. (github.comRandom3Dcity)	3
2.1	Spectre schématique de la réalité étendue (XR).	5
2.2	Exemples de marqueurs utilisés. (WIKIPEDIA, 2025a)	6
2.3	Illustration de l'utilisation de l'AR en marketing. (forbes.com)	9
2.4	Exemple d'un utilisateur de Pokémon GO. (nytimes.com)	9
2.5	Exemple d'un utilisateur de l'AR dans le domaine de l'éducation. (key2learn.org)	10
2.6	Lunettes Ray-Ban Meta. (meta.com)	11
2.7	Exemple d'un utilisateur de l'AR dans le domaine de la santé. (BALGRIST UNIVERSITY HOSPITAL, s. d.)	11
2.8	Exemple d'un utilisateur dans un musée. (RYFFEL et al., 2017)	12
2.9	Utilisation du système. (SETTIMI et al., 2025)	13
2.10	Utilisation du Trimble SiteVision. (GEOSPATIAL, s. d.)	14
2.11	Schema d'un utilisateur GNSS. (cadastre.ch)	18
2.12	Schema des axes d'un smartphone. (researchgate.net)	18
2.13	Exemple avec et sans gestion de l'occlusion. (GOOGLE, 2025)	20
3.1	Situation du périmètre du projet Ronquoz 21. (VILLE DE SION, 2023)	22
3.2	Montage numérique du futur quartier des Ronquoz. (HERZOG DE MEURON, 2019)	24
3.3	Modèle 3D du bâtiment <i>Swiss Innovation Park</i> simplifié.	25
3.4	Modèle 3D d'un banc du parc des Câbles.	26
3.5	Modèle 3D de la liaison câblée.	26
5.1	Captures d'écran de la phase de calibration, la visualisation et la fenêtre d'infor- mations.	32
5.2	Situation avec l'emplacement approximatif des points de référence (vert), le bâ- timent (rouge), le mobilier urbain (bleu) et la liaison câblée (mauve).	34
5.3	Schéma explicatif du fonctionnement du moteur de réalité augmentée.	36
5.4	Schéma explicatif de la fonction de <i>lerping</i>	37
5.5	Schéma du traitement des mesures utilisées pour la calibration.	39
5.6	Schéma de la correction de la position en temps réel.	40
5.7	Schéma explicatif des interactions entre les fonctions de transformation.	42

5.8	Modèles 3D du <i>Swiss Innovation Park</i> avant et après simplification.	43
5.9	Schéma explicatif du géoréférencement d'un modèle 3D, avec à gauche une vue en situation et de profil à droite.	44
5.10	Fonctionnement schématique de l'enregistrement des données d'utilisation.	46
6.1	Répartition de l'âge des participants.	48
6.2	Répartition du niveau de formation des participants.	49
6.3	Répartition de la fréquence d'utilisation de la 3D entre les participants.	49
6.4	Histogramme des résultats de l'évaluation du système selon un questionnaire SUS.	50
6.5	Résultats de la première question du SUS.	50
6.6	Résultats de la cinquième question de l'évaluation de l'expérience.	51
6.7	Résultats de la question sur la contrainte que représente la phase de calibration.	51
6.8	Situation avec les itinéraires empruntés durant les différents tests, ainsi que les éventuels arrêts. Il y a également l'emplacement approximatif des points de référence (vert), le bâtiment (rouge), le mobilier urbain (bleu) et la liaison câblée (mauve).	53
6.9	Un utilisateur durant le test.	54
6.10	Histogramme de la précision de la géolocalisation du smartphone.	54
6.11	Écarts planimétriques mesurés durant la phase de calibration.	55
6.12	Moyenne altimétrique par session et par point fixe durant la calibration.	55
7.1	Résultats de la troisième question qui porte sur l'évaluation de l'expérience.	62
7.2	Distance parcourue par utilisateurs durant l'expérience.	65
9.1	Question n°1 sur l'expérience.	80
9.2	Question n°2 sur l'expérience.	80
9.3	Question n°3 sur l'expérience.	81
9.4	Question n°4 sur l'expérience.	81
9.5	Question n°5 sur l'expérience.	81

Liste des tableaux

7.1	Interprétation de la force de la corrélation selon le coefficient de Spearman . . .	57
7.2	Résultats de l'analyse de Spearman entre les indicateurs du profil et l'utilisabilité.	59
7.3	Résultats de l'analyse de Spearman entre les indicateurs du profil et l'utilisabilité.	59
7.4	Résultats de l'analyse de Spearman entre les indicateurs du profil et la distance parcourue.	60
7.5	Résultats de l'analyse de Spearman entre les indicateurs du profil et les arrêts. .	60
7.6	Résultats de l'analyse de Spearman entre les indicateurs du profil et la compré- hension du projet.	61

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte

La réalité augmentée – *augmented reality (AR)* – représente une évolution significative dans l’interaction numérique, mélangeant les mondes physique et virtuel pour créer des expériences utilisateur immersives. Initialement popularisée dans le domaine des jeux vidéo, l’AR s’est étendue à divers domaines, notamment l’éducation, la vente au détail et le marketing, transformant ainsi la manière dont les utilisateurs interagissent avec le contenu numérique (I. D. FOUNDATION, 2025)(BUDIU et BEHNAM, 2022). L’avènement de la réalité augmentée sur le web (WebAR) permet aux utilisateurs d’accéder directement à des expériences d’AR via leur navigateur web, permettant d’éliminer le besoin d’applications dédiées et rendant la technologie plus accessible que jamais (GARCIA, 2024)(VIDANOVIC, 2025). Cette évolution est motivée par les progrès réalisés dans les capacités des appareils mobiles et le développement de cadres robustes.



FIGURE 1.1 – Illustration de l’utilisation de l’AR via une page web. (unitear.com)

Cette technologie est, depuis quelques années, également utilisée dans les domaines de l’amé-

nagement du territoire, de l'urbanisme, de la construction et autres domaines adjacents. L'AR a émergée comme un outil qui transforme la manière dont les communautés et professionnels interagissent avec les projets d'aménagement du territoire. En superposant des modèles numériques à des environnements réels, la réalité augmentée facilite les visualisations immersives qui améliorent la participation du public et rationalisent la communication entre les acteurs. Ce nouvel outil de visualisation permet une meilleure compréhension des impacts potentiels d'un projet et favorise la transparence dans la prise de décision. (DAVID, 2025) (SRI, 2025) (REAVAR, 2023). En effet, la compréhension d'un projet sous forme de plan peut s'avérer être une tâche compliquée. Un des résultats de l'étude menée par T. Chassin démontre que 20% des personnes sondées ont démontré une faible habilité de représentation spatiale. Même si ce résultat n'est pas représentatif de la population, il admet des disparités de capacité entre les individus. (CHASSIN et al., 2022)

Les controverses majeures entourant l'utilisation de l'AR pour des projets urbains portent notamment sur les implications éthiques des représentations visuelles potentiellement trompeuses et le risque d'exacerber les disparités dans l'engagement du public. Ces enjeux sont renforcés par les limites techniques actuelles de nombreuses applications de réalité augmentée, spécifiquement la qualité parfois insuffisante du rendu tridimensionnel et le faible niveau d'immersion, susceptibles d'influencer le jugement des usagers non spécialistes. À mesure que les applications de réalité augmentée se généralisent, il devient important de gérer ces technologies avec prudence afin de s'assurer qu'elles facilitent véritablement la participation communautaire plutôt que de manipuler la perception du public ou de restreindre l'engagement à certains profils d'utilisateurs. (WAN et al., 2024)

La qualité insuffisante du rendu tridimensionnel est due à la limitation des ressources techniques actuelles. En effet, il y a encore des questions sur la capacité de représentation en temps réel via la réalité augmentée à travers une page web. La consommation d'énergie accrue par l'utilisation de la caméra et des capteurs limite le poids des données pouvant être affichées sur un smartphone. De plus, la précision du positionnement GPS et des capteurs de mouvement des appareils mobiles peut affecter la stabilité et la fidélité des objets virtuels superposés à l'environnement réel. Cet esprit critique à conserver lors de la visualisation de donnée 3D est à encourager, afin d'augmenter la sensibilité des utilisateurs potentiels. (TELYAI, 2025) (REAVAR, 2023)



FIGURE 1.2 – Différents niveaux de détails de modèles 3D. (github.com/Random3Dcity)

1.2 Objectifs

Ce projet a pour ambition d'étendre l'usage de la réalité augmentée (AR) au domaine de l'aménagement du territoire, et plus particulièrement à la visualisation de projets de construction se trouvant encore à l'état numérique à travers une plateforme web. Aujourd'hui, ces projets sont généralement présentés sous forme de plans ou de maquettes 3D accessibles sur ordinateur, mais leur représentation dans l'espace réel reste souvent difficile à appréhender pour le grand public. L'intégration de la réalité augmentée permet de combiner la maquette numérique et l'environnement réel, facilitant ainsi la compréhension du projet et son intégration dans le contexte existant.

L'objectif principal de ce travail est de concevoir et de prototyper une application WebAR permettant à tout utilisateur de visualiser, directement sur son smartphone, une maquette 3D d'un futur bâtiment, ou un autre projet de construction, superposée à son emplacement réel. Ce prototype se veut simple d'utilisation, car il cible un public large et varié. Cette simplicité est en partie traduite par l'utilisation des technologies web qui permettent l'accès à ce service sans téléchargement au préalable d'une application sur son smartphone.

Dans le cadre des mises à l'enquête publique ou de projets d'envergure, cet outil pourrait offrir aux citoyens et aux parties prenantes une représentation plus concrète et immersive des projets soumis. Une telle approche pourrait contribuer à réduire les incompréhensions et les inquiétudes des riverains, en rendant les projets plus transparents et accessibles. De plus il permettrait de recueillir leurs avis et remarques. Cet outil pourrait également apporter une plus-value lors de démarches participatives. Une fois le prototype réalisé, des avis seront récoltés auprès d'utilisateurs potentiels variés, afin d'évaluer l'acceptation d'une telle méthode et d'obtenir un retour sur leur expérience. Ce retour permettra de mettre en évidence les attentes et les limites de cette méthode.

Au-delà des enquêtes publiques, la visualisation de données en réalité augmentée ouvre également des perspectives intéressantes dans d'autres domaines liés à la gestion territoriale. Par exemple, la représentation en AR du cadastre souterrain ou d'éléments issus de la mensuration officielle pourrait améliorer la compréhension des infrastructures existantes et soutenir la prise de décision dans les projets d'aménagement. Les alternatives sont multiples et l'objectif de ce travail est d'explorer les possibilités offertes par la réalité augmentée dans le contexte spécifique de l'aménagement du territoire, en mettant l'accent sur la simplicité d'accès via une application web (WebAR).

1.3 Structure du document

Ce document est structuré en plusieurs chapitres suivant une ligne conductrice. Cette section présente brièvement le contenu de chaque chapitre et l'organisation générale, afin de guider le lecteur à travers le travail réalisé.

Après cette introduction, le chapitre 2 présente un état de l'art des technologies et méthodes existantes dans le domaine de la réalité augmentée, avec une section mettant l'accent sur les applications WebAR et leur utilisation dans l'aménagement du territoire. Ce chapitre explore également les défis techniques et les opportunités offertes par ces technologies.

Ensuite, le chapitre 3 présente le projet Ronquoz 21 de la Ville de Sion. Des données issues de celui-ci sont utilisées pour l'évaluation du travail réalisé. Une brève introduction à ce projet d'ampleur permet de contextualiser les tests réalisés et les résultats obtenus.

Le chapitre 4 présente le public cible du produit imaginé et présentes les différentes hypothèses qui seront ensuite évaluées dans le chapitre 7.

Dans le chapitre suivant, le chapitre 5, le développement et les fonctionnalités du prototype WebAR sont détaillés. Ce chapitre décrit les choix techniques, les étapes de développement et les fonctionnalités clés de l'application. Il décrit aussi les méthodes utilisées pour évaluer l'application.

Les deux chapitres suivants traiteront des résultats obtenus lors des tests réalisés avec des utilisateurs potentiels. Le chapitre 6 présente les résultats de manière factuelle, tandis que le chapitre 7 analyse ces résultats en lien avec les hypothèses émises précédemment.

Pour finir, le chapitre 8 conclut ce travail en résumant les principales conclusions. Tandis que le chapitre 9 propose des pistes pour des travaux futurs et des améliorations potentielles du prototype développé.

Chapitre 2

La réalité augmentée

Ce chapitre présente un aperçu de la réalité augmentée (AR) avec son histoire, des exemples de domaines d'application, des technologies utilisées et des méthodes de localisation. Il vise à présenter l'écosystème de l'AR et de présenter les outils et technologies utilisés dans ce domaine.

2.1 Définitions

2.1.1 La réalité étendue

La réalité augmentée est une technologie qui superpose des objets numériques dans le monde réel en temps réel. Elle fait partie du spectre plus large de la réalité étendue (XR), qui englobe également la réalité virtuelle (VR) et la réalité mixte (MR). Contrairement à la réalité virtuelle, qui immerge complètement l'utilisateur dans un environnement virtuel, la réalité augmentée enrichit l'environnement réel avec des éléments virtuels, permettant ainsi une interaction entre les deux. La réalité mixte, quant à elle, combine des aspects de la réalité augmentée et de la réalité virtuelle, permettant aux objets virtuels d'interagir de manière plus naturelle avec le monde réel. La réalité augmentée peut être expérimentée à travers divers dispositifs, notamment les smartphones, les tablettes, les lunettes intelligentes et les casques AR dédiés. Ces dispositifs utilisent des caméras, des capteurs et des algorithmes de vision par ordinateur pour détecter l'environnement réel et positionner les objets virtuels de manière cohérente. C'est une technologie qui trouve des applications dans de nombreux domaines variés allant de l'éducation au divertissement en passant par la santé et le commerce. (I. D. FOUNDATION, 2025)

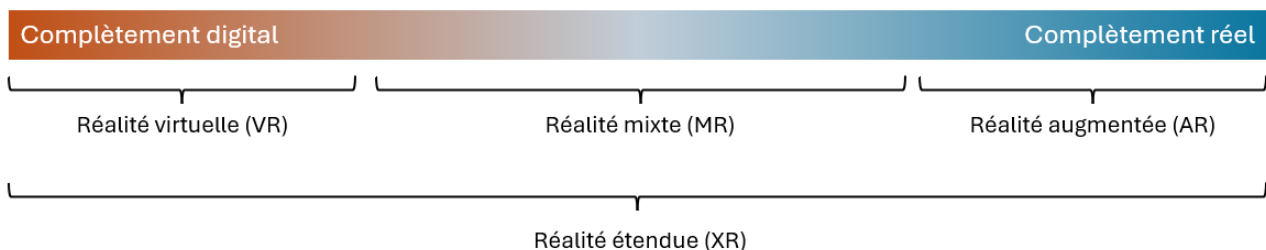


FIGURE 2.1 – Spectre schématisé de la réalité étendue (XR).

2.1.2 Méthodes de positionnement

La localisation est cruciale pour les applications de réalité augmentée. Elle assure un placement correct du modèle numérique dans le monde réel, assurant une expérience immersive pour l'utilisateur. Sans une localisation précise, les objets virtuels peuvent apparaître décalés ou mal alignés, compromettant l'immersion et l'utilité de l'application AR. Il existe plusieurs méthodes de positionnement, allant de l'utilisation de marqueurs visuels à la localisation basée sur les capteurs embarqués et le GPS. Chaque méthode a ses avantages et ses inconvénients, et le choix dépend souvent du contexte d'utilisation et des exigences spécifiques de l'application. Ces algorithmes utilisent des modèles mathématiques complexes pour améliorer la localisation et le suivi en temps réel, garantissant l'alignement correct des objets virtuels avec le monde réel même lorsque l'utilisateur se déplace. (NAARG, 2024)

La catégorisation de ces méthodes peut varier d'une source à l'autre. Néanmoins, deux grandes familles peuvent être faites : les méthodes qui utilisent un marqueur pour géoréférencer les éléments numériques (*Marker-based*) et celles qui n'en ont pas besoin (*Markerless*).

Marker-based tracking

Le tracking basé sur des marqueurs (*Marker-based*) utilise des images ou des motifs visuels spécifiques, appelés marqueurs, pour détecter et suivre la position et l'orientation d'un appareil dans l'espace. Lorsqu'un appareil équipé d'une caméra reconnaît un marqueur, il peut superposer du contenu numérique en 3D sur ce marqueur, créant ainsi une expérience de réalité augmentée. Cette méthode est souvent utilisée dans les applications AR car elle offre une précision élevée et une stabilité dans le placement des objets virtuels. Cependant, elle nécessite la présence physique des marqueurs dans l'environnement, ce qui peut limiter la flexibilité de l'application. (NAARG, 2024)

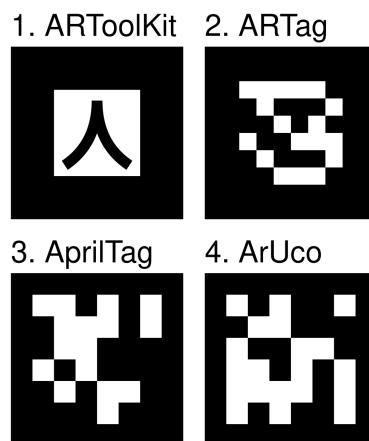


FIGURE 2.2 – Exemples de marqueurs utilisés. (WIKIPEDIA, 2025a)

Markerless tracking

Pour se localiser, cette méthode n'utilise pas de marqueur visuel prédéfini. Au lieu de cela, elle s'appuie sur les senseurs disponibles par l'appareil que l'utilisateur utilise pour la visualisation (smartphone, lunettes, ...). Depuis quelques années, tous les smartphones sont équipés de capteurs comme des caméras, des accéléromètres, des gyroscopes et des magnétomètres. La position GPS de l'appareil est également utilisé, afin de permettre un positionnement absolu du modèle numérique. Ces capteurs permettent de suivre les mouvements de l'appareil et d'estimer sa position dans l'espace avec plus ou moins de précision.

À partir des données de ces senseurs, des algorithmes ont été mis au point, dans le but d'optimiser la localisation et le suivi en temps réel. Parmi ces algorithmes, on retrouve la *Visual Odometry (VO)*, la reconnaissance visuelle et le *Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)*. Ces algorithmes utilisent des modèles mathématiques complexes pour analyser les données visuelles et inertielles, permettant une localisation précise et un suivi en temps réel. Ils sont particulièrement utiles dans les environnements dans lesquels les marqueurs visuels ne sont pas disponibles ou pratiques à utiliser. Cependant, la plupart de ces algorithmes, en particulier lorsque les données visuelles sont utilisées, nécessitent une bonne puissance de calcul et une batterie assez grande, ce qui peut être un défi pour les appareils mobiles avec des ressources limitées. (NAARG, 2024)

L'étude SARLIN et al., 2022 est un exemple représentatif de *Markerless tracking* en conditions réelles. Les trajectoires sont capturées à l'aide de dispositifs AR grand public (HoloLens 2, iPhone), en exploitant les systèmes de suivi embarqué de type *Visual-Inertial Odometry (VIO)*, ainsi que des signaux radio. La localisation globale est ensuite obtenue par mise en correspondance visuelle avec un modèle 3D de référence, sans recours à des marqueurs artificiels ou à des points d'ancrage prédéfinis.

2.2 Historique

Les origines de la réalité augmentée remontent au début du XXe siècle, plus précisément aux récits de science-fiction apparus dès 1901. Cependant, le terme « réalité augmentée » a été utilisé pour la première fois dans un contexte technique par Thomas Caudell en 1990, alors qu'il développait un système pour Boeing afin d'aider les travailleurs à visualiser des systèmes aéronautiques complexes (I. D. FOUNDATION, 2025). Cela a marqué un tournant dans l'évolution de l'AR, qui est passée de la fiction conceptuelle à l'application pratique.

La progression de la technologie s'est accélérée en 1992 lorsque Louis Rosenberg a créé le système *Virtual Fixtures* pour l'armée de l'air américaine, qui représente l'une des premières implémentations sophistiquées. Au fil des ans, elle a commencé à faire son apparition dans les applications grand public de divertissement et d'utilité. Notamment, le lancement du jeu AR-

Quake en 2000 et le développement de l'ARToolkit en 2009 ont élargi l'accessibilité et l'attrait à un public plus large (I. D. FOUNDATION, 2025).

Les années 2010 ont été marquées par une explosion technologique dans le domaine de l'AR. La sortie du HoloLens de Microsoft en 2015 a marqué une avancée significative dans l'intégration de l'AR dans les applications quotidiennes, mettant en avant une facilité d'utilisation et une sophistication accrue des logiciels d'AR (I. D. FOUNDATION, 2025). Cette décennie a également vu l'émergence de la réalité étendue (XR) en tant que terme générique englobant la réalité augmentée (AR), la réalité virtuelle (VR) et la réalité mixte (MR) (I. D. FOUNDATION, 2025)(BUDIU et BEHNAM, 2022).

L'évolution de la réalité augmentée sur le web (WebAR) représente le dernier chapitre de cette histoire en cours, permettant aux utilisateurs d'accéder directement à des expériences de réalité augmentée via des navigateurs web sans avoir besoin d'applications dédiées, simplifiant ainsi l'expérience utilisateur et élargissant la portée de cette technologie (J et J, 2025)(JOHNSON, 2025).

2.3 Domaines d'application

La réalité augmentée (AR) s'est imposée comme une technologie transformatrice offrant diverses applications dans divers secteurs, notamment pour améliorer l'expérience utilisateur en alliant des informations numériques et le réel.

2.3.1 Commerce et marketing

En quelques années, la réalité augmentée est passée d'une curiosité à un outil essentiel, avec une adoption par les consommateurs qui a atteint un point d'inflexion. Les marques l'intègrent rapidement dans des expériences d'achat, afin d'améliorer l'engagement, la confiance et les ventes. L'AR permet aux détaillants de réduire le coût de l'attention des consommateurs, de personnaliser le marketing à grande échelle et de brouiller la frontière entre le shopping numérique et physique. Les applications comprennent les vitrines AR, les fresques murales AR, les essayages virtuels et les expériences en magasin, offrant des avantages tels qu'une augmentation de l'engagement, une amélioration de la satisfaction client, une augmentation des ventes et une réduction des taux de retour. L'émergence de WebAR, offrant des expériences AR directement dans les navigateurs web sans nécessiter d'application, élargi davantage la portée de l'AR et a rendu son intégration plus pratique et rentable pour les marques. (BRANDXR, 2025)



FIGURE 2.3 – Illustration de l'utilisation de l'AR en marketing. (forbes.com)

2.3.2 Divertissement

La réalité augmentée (AR) transforme le divertissement en offrant des expériences immersives et interactives dans divers secteurs. Des filtres de réseaux sociaux aux activations immersives dans les concerts, en passant par les jeux vidéo, la télévision et le théâtre, l'AR permet de créer des expériences uniques et mémorables. Elle offre aux créateurs de contenu de nouvelles opportunités de raconter des histoires, d'engager des audiences et de générer des revenus, comme en témoignent des exemples tels que les expériences AR pour l'album de Warren Hue ou l'utilisation de l'AR par la *Royal Shakespeare Company*. L'AR est particulièrement prisée par la nouvelle génération, qui se trouve être plus réceptive aux technologies novatrices et immersives, ce qui en fait un outil puissant pour atteindre ce public. (FIELD, 2025) Parmi ces expériences, quelques exemples notables, tel que le jeu mobile Pokémon Go, qui a popularisé l'AR dans le grand public à partir de 2016.



FIGURE 2.4 – Exemple d'un utilisateur de Pokémon GO. (nytimes.com)

2.3.3 Formation

De nouvelles méthodes d'enseignement voient le jour depuis l'arrivée de l'AR en superposant des éléments virtuels au monde réel, offrant une expérience d'apprentissage plus interactive et engageante. Contrairement à la réalité virtuelle qui immerge complètement l'utilisateur dans un environnement virtuel, l'AR permet aux élèves de manipuler et d'observer des objets impossibles à obtenir physiquement, comme le système solaire ou un atome. Des exemples concrets incluent l'utilisation de l'AR en conjonction avec l'impression 3D pour créer des objets virtuels puis réels, ou encore la visualisation de modèles complexes comme un cœur humain ou un moteur de voiture. L'AR favorise l'engagement et la participation des élèves, rendant les concepts abstraits plus concrets et stimulant la créativité. (B., 2025)

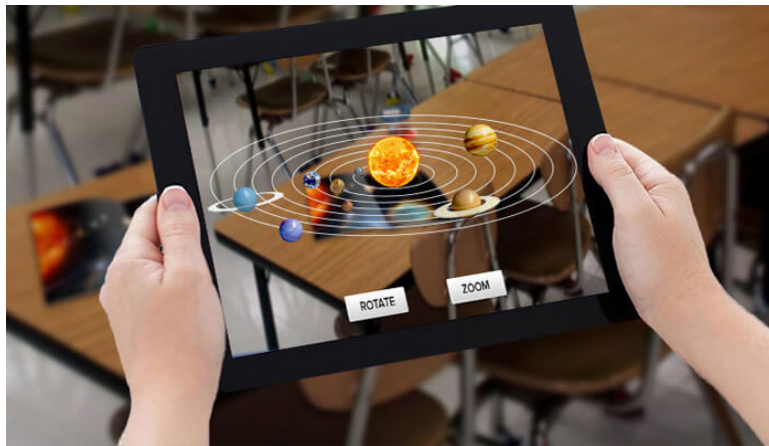


FIGURE 2.5 – Exemple d'un utilisateur de l'AR dans le domaine de l'éducation. (key2learn.org)

2.3.4 Assistant au quotidien

Les améliorations et recherches sur cette technologie ont ouvert la voie à des assistants personnels portés en permanence. Parmi les dispositifs les plus prometteurs figurent les *smart glasses*, qui combinent un affichage *heads-up*, suivi de la tête et des yeux, ainsi que des capteurs environnementaux pour délivrer du contenu contextuel en temps réel. Des études montrent que les plateformes commerciales actuelles - *Microsoft HoloLens*, *Meta Display smart glasses* et *Google Glass Enterprise* - offrent déjà des interactions main-libres et des flux d'information continus, permettant aux utilisateurs de consulter des notifications, d'obtenir des indications de navigation ou de recevoir un guidage visuel lors de tâches quotidiennes (MANN et FUNG, 2020) tout ceci avec des design devenant plus soignés. Certains articles récents révèlent que les recherches sur l'assistance quotidienne via AR connaissent une croissance exponentielle depuis 2015, avec un intérêt particulier pour les scénarios de guidage contextuel et d'aide à la maintenance. (ZHOU et al., 2022)



FIGURE 2.6 – Lunettes Ray-Ban Meta. (meta.com)

2.3.5 Santé

Dans cet exemple qui touche le domaine de la santé, la réalité augmentée permet à un chirurgien de visualiser l'anatomie d'un patient en 3D durant une opération. Une équipe de l'hôpital universitaire de Balgrist à Zürich a réussi la première opération chirurgicale de la colonne vertébrale guidée par holographie. Cette opération fait partie d'une étude clinique qui se trouve être la première de ce genre au monde. Le système guide le chirurgien durant des étapes critiques de la procédure. Par exemple, l'insertion exacte et la trajectoire d'une vis est directement visualisable durant l'opération grâce à l'AR. D'après le docteur Farshad qui a mené l'opération chirurgicale, l'AR améliore les sens et la perception du chirurgien. (BALGRIST UNIVERSITY HOSPITAL, s. d.)



FIGURE 2.7 – Exemple d'un utilisateur de l'AR dans le domaine de la santé. (BALGRIST UNIVERSITY HOSPITAL, s. d.)

2.3.6 Expérience immersive

La grande force de l'AR est de pouvoir visualiser des éléments qui n'existent pas dans la réalité et de créer des interactions avec l'utilisateur. Dans cet exemple, l'ETH de Zürich a collaboré

avec la collection princière du Liechtenstein pour créer des expériences muséales interactives, novatrices et captivantes pour les visiteurs. Durant la visite, l'application mobile permet des expériences interactives et ludiques dans lesquelles des objets et des récits virtuels s'intègrent de manière transparente dans le monde physique. Ce prototype d'application démontre le potentiel de l'AR pour les musées. Grâce à cette application, les œuvres d'art sont enrichies virtuellement de textes, d'images, d'audios, de vidéos, de modèles 3D et d'effets visuels avancés. L'application crée une rencontre nouvelle, divertissantes et participatives avec l'œuvre d'art et fournit au visiteur des informations contextualisées et personnalisées. Le projet a été présenté pour la première fois lors du Digitaltag 2018 au Stadtmuseum de Vaduz, au Liechtenstein, où l'application a été présentée et testée publiquement par les visiteurs. (RYFFEL et al., 2017)



FIGURE 2.8 – Exemple d'un utilisateur dans un musée. (RYFFEL et al., 2017)

2.3.7 Manufacture

Ce cas de recherche vise à donner une alternative aux entreprises de constructions, et plus précisément aux menuisiers. Ce domaine utilise des instruments parfois coûteux qui peut être un poids pour les PME. L'objectif est de fournir un outil digital à moindre coût qui permet de faciliter le travail des employés du domaine. Le framework proposé permet une découpe et un perçage précis grâce à un retour d'information en temps réel généré par ordinateur, éliminant ainsi le besoin de dessins d'exécution 2D traditionnels, de marquage et de gabarits. Une évaluation de la méthode démontre une erreur moyenne de 3 millimètres pour le positionnement des joints et la précision millimétrique pour les coupes des faces des joints, garantissant un assemblage précis pour des poutres pouvant atteindre jusqu'à 3 mètres de long. Cependant, des défis persistent pour les poutres plus longues en raison des imprécisions de cartographie, qui nécessitent des recherches supplémentaires en CV afin d'améliorer la robustesse. Cette étude montre comment les opérations manuelles peuvent s'intégrer de manière transparente dans la chaîne de valeur numérique. (SETTIMI et al., 2025)



FIGURE 2.9 – Utilisation du système. (SETTIMI et al., 2025)

2.4 Aménagement du territoire et construction

La réalité augmentée s’inscrit, depuis plusieurs années, dans les pratiques émergentes de l’aménagement du territoire, de l’urbanisme et de la construction. La littérature récente la décrit comme un outil de visualisation innovant, susceptible de transformer les modalités d’interaction entre les professionnels, les décideurs publics et les citoyens. En intégrant des contenus numériques directement dans l’environnement réel, l’AR permet de proposer des visualisations immersives facilitant la compréhension des projets d’aménagement et améliorant la communication entre les différents acteurs impliqués. Plusieurs travaux soulignent que ce type de représentation contribue à une meilleure appréhension des impacts potentiels des projets et participe au renforcement de la transparence des processus décisionnels (DAVID, 2025, SRI, 2025, REAVER, 2023). À l’inverse, la lecture de projets présentés exclusivement sous forme de plans ou de documents techniques peut constituer un obstacle à leur compréhension pour une partie de la population. À ce sujet, l’étude menée par T. Chassin met en évidence que 20% des personnes interrogées présentent de faibles capacités de représentation spatiale. Bien que ces résultats ne soient pas généralisables à l’ensemble de la population, ils révèlent néanmoins l’existence de disparités significatives entre les individus face aux modes de représentation spatiale traditionnels (CHASSIN et al., 2022).

Parallèlement à ces apports, plusieurs auteurs mettent en évidence les limites et controverses associées à l’utilisation de la réalité augmentée dans les démarches d’aménagement du territoire. Celles-ci concernent notamment les enjeux éthiques liés à des représentations visuelles susceptibles d’influencer la perception des projets, ainsi que le risque de renforcer certaines inégalités dans l’engagement du public. Ces questionnements sont accentués par les contraintes techniques actuelles de nombreuses applications, telles que la qualité parfois insuffisante des rendus tridimensionnels ou un niveau d’immersion limité, susceptibles d’affecter le jugement des usagers non spécialistes. La littérature converge ainsi vers l’idée que le recours à la réalité augmentée en urbanisme nécessite une attention particulière quant à ses conditions d’usage, afin qu’elle constitue un outil pertinent d’aide à la compréhension et à la participation collective

(WAN et al., 2024).

La technologie de la réalité augmentée n'est pas encore très présente dans le domaine de l'aménagement du territoire et de la construction. Cependant, elle offre un potentiel considérable pour améliorer la visualisation et la compréhension des projets de construction. À l'heure où le BIM (*Building Information Modelling*) est couramment utilisé, permettre sa visualisation en temps réel sur le site du projet prend tout son sens. Gamma AR est un exemple d'entreprise qui permet la visualisation de maquettes BIM en réalité augmentée. À travers une application, l'entreprise offre à l'utilisateur une immersion dans le projet (AR, 2025). L'entreprise américaine Trimble propose également une solution appelée Trimble SiteVision qui utilise la réalité augmentée. Celle-ci est utilisable en extérieur avec un positionnement en RTK permettant une précision centimétrique. Une application est également obligatoire pour l'utilisation de cet outil (GEOSPATIAL, s. d.). En matière de visualisation de projet de construction, la société vGIS Inc. propose un outil de visualisation en temps réel lors de la phase d'autorisation de construire (vGIS INC., 2025).



FIGURE 2.10 – Utilisation du Trimble SiteVision. (GEOSPATIAL, s. d.)

En plus de ces exemples, on peut aisément imaginer un agent immobilier utiliser cette technologie pour de la vente, une commune pour contrôler les nouvelles constructions ou un porteur de projet lors d'une démarche participative. Tous ces exemples démontrent que cette technologie offre de nombreuses opportunités dans le domaine de l'aménagement du territoire et de la construction. Les solutions présentées dans le chapitre précédent sont néanmoins toutes développées en application native. Il reste encore des défis à relever, notamment en termes de précision de localisation, de performance des appareils mobiles et d'accessibilité pour les utilisateurs finaux. Malgré ces défis, l'avenir de la réalité augmentée offre un potentiel pour transformer la manière dont les projets de construction sont visualisés et compris par les parties prenantes.

2.5 Technologies

Avec l'évolution rapide de la réalité augmentée (AR), une variété de technologies et d'outils ont émergé pour faciliter le développement et la mise en œuvre d'applications AR. Ces technologies

incluent des *frameworks*, des bibliothèques, des moteurs de jeu et des outils de modélisation 3D. Chacun de ces composants joue un rôle crucial dans la création d'expériences AR immersives et interactives.

2.5.1 *Frameworks*

Les *frameworks* sont des structures logicielles qui fournissent une base pour le développement d'applications. Ils offrent des fonctionnalités préconstruites, des bibliothèques et des outils qui simplifient le processus de développement. Parmi les *frameworks* populaires pour la réalité augmentée, on trouve ARKit d'Apple, ARCore de Google, Meta Spark Studio de Meta et A-Frame qui est *open-source*. Ces *frameworks* permettent aux développeurs de créer des applications AR pour diverses plateformes, notamment iOS, Android et le web. (HAMANN, 2024)

2.5.2 Bibliothèques

Les bibliothèques sont des collections de fonctions et de routines préécrites qui peuvent être utilisées pour ajouter des fonctionnalités spécifiques aux applications ou aux algorithmes. Elles sont souvent utilisées en conjonction avec des *frameworks* pour étendre leurs capacités. Des exemples de bibliothèques populaires pour la réalité augmentée incluent Three.js, Vuforia et AR.js. Ces bibliothèques offrent des outils pour la reconnaissance d'images, le suivi de mouvement, le rendu 3D et d'autres fonctionnalités essentielles pour les applications AR.

2.5.3 Moteurs de jeu

Un moteur de jeu (*engine*) est une plateforme logicielle conçue pour faciliter le développement de jeux vidéo et d'applications interactives. Il fournit aux développeurs des outils, bibliothèques et API utiles pour la conception d'expériences interactives en temps réel pour l'AR. Contrairement aux moteurs traditionnels, les moteurs utilisés en réalité augmentée sont optimisés pour la perception spatiale, la reconnaissance d'objets et l'interaction avec le monde réel. Les moteurs de jeu les plus populaires utilisés pour la réalité augmentée, sont Unity, Unreal Engine et 8th Wall. Ces moteurs offrent des capacités avancées pour le développement d'expériences AR immersives, y compris le support pour les plateformes AR. (MEEGLE, 2025)

2.5.4 Modélisation 3D

Au-delà des technologies de développement, la modélisation 3D joue un rôle crucial dans la création de contenu pour la réalité augmentée. Des outils comme Blender, Autodesk Revit et 3ds Max permettent aux artistes et aux développeurs de créer des modèles 3D détaillés qui peuvent être intégrés dans des applications AR. Ces outils offrent des fonctionnalités avancées pour la modélisation, le *texturing*, l'animation et le rendu, permettant de créer des expériences AR visuellement proches de la réalité.

Au niveau des formats de fichiers 3D, plusieurs standards existent. Parmi les plus courants, on retrouve le format OBJ, FBX, STL et le format glTF/glb. Le format glTF/glb est de plus en plus populaire pour les applications AR en raison de son efficacité et de sa compatibilité avec de nombreuses plateformes. Il est conçu pour être un format de transmission rapide et léger, ce qui le rend idéal pour les applications web et mobiles.

2.6 WebAR

Depuis quelques années, plusieurs outils permettant de créer des applications de réalité augmentée utilisables à travers un navigateur web ont vu le jour. Une partie de ces outils est mentionnée dans le chapitre 2.5. Cette approche de la réalité augmentée gagne en popularité auprès des développeurs et des utilisateurs, car elle offre plusieurs avantages non négligeables par rapport aux applications natives.

Tout d'abord, leur accessibilité est un atout majeur. Ces applications sont accessibles via un simple lien web, éliminant le besoin de télécharger et d'installer une application dédiée. Cela réduit les barrières à l'entrée pour les utilisateurs, permettant de toucher un public bien plus large indépendamment du système d'exploitation de l'appareil connecté. Un autre avantage est qu'il est possible de réaliser une application complète gratuitement, sans compter le temps passer pour le développement. En effet, il existe plusieurs bibliothèques open-source qui permettent de développer des applications WebAR sans frais de licence. De manière générale, une application web coûte moins cher en développement et maintenance qu'une application native (SAMSYUDIN, 2024). Cela est particulièrement avantageux pour les petits développeurs ou les projets à budget limité. Le dernier avantage notable est que ces applications sont dépendantes d'un système d'exploitation. En effet, une application native nécessite un téléchargement et une installation sur un système d'exploitation spécifique rendant le développement souvent dépendant de ce système. (QIAO et al., 2019a) (SCHMIDT, 2023)

Il existe néanmoins quelques challenges à relever pour le développement d'application WebAR. Tout d'abord, les performances peuvent être limitées par rapport aux applications natives. Les applications WebAR dépendent des capacités du navigateur web et de l'appareil utilisé, ce qui peut entraîner des limitations en termes de qualité graphique et de fluidité. De plus, l'accès aux différents senseurs de l'appareil, tels que la caméra et les capteurs, peut être restreint par les navigateurs web, limitant ainsi les possibilités de développement. Enfin, la compatibilité entre différents navigateurs et appareils peut poser des défis supplémentaires, nécessitant des tests approfondis pour garantir une expérience utilisateur cohérente. Même si l'arrivée du réseau 5G a permis d'améliorer l'efficacité des communications et calculs, une application basée sur le web serait totalement dépendante de ce réseau. Une mauvaise couverture pourrait rendre son utilisation délicate, voir impossible. La compatibilité entre les outils de développement et les formats de données 3D n'est pas optimale. Cette faible compatibilité rend l'utilisation à cette

technologie d'avantage contraignant. (QIAO et al., 2019b) (QIAO et al., 2019a)

La difficulté réside dans le fait de trouver un équilibre entre accessibilité, coûts et performance. Donner la priorité à l'un ou l'autre dépend de l'objectif poursuivi par les développeurs. En conclusion, le choix entre les applications web et les applications natives n'est pas seulement une décision technique, mais aussi une décision stratégique qui reflète les grandes tendances en matière de technologie, les attentes des utilisateurs et les exigences opérationnelles.

2.7 Enjeux et limites de l'usage de la WebAR

L'utilisation de la réalité augmentée peut s'avérer compliquée. En particulier lorsque cette technologie est utilisée à travers le web, comme explicité dans la section précédente. Cette section met en lumière des difficultés qui compliquent le développement d'une application de WebAR.

2.7.1 Améliorer la géolocalisation

Lors de l'utilisation de la réalité augmentée *Markerless*, la précision de la géolocalisation joue un rôle important dans la qualité de l'expérience. Cependant, la qualité des capteurs montés sur un smartphone est faible. Elle suffit pour leur utilisation prédestinée, mais devient limitante lorsque l'on cherche à augmenter les performances du positionnement.

Le capteur principal chargé de géolocaliser un smartphone est son antenne GNSS. Sa précision dépend du modèle et de l'ancienneté du smartphone, mais elle est de plusieurs mètres en planimétrie est altimétrie. Cette précision est fortement dépendante de l'environnement dans laquelle l'utilisateur se trouve. Des obstacles au ciel peuvent nuire aux performances. Il est possible d'améliorer les performances en réalisant du positionnement différentiel sur le code (DGPS) ou la phase (RTK). Des produits existent pour réaliser du *Precise Point Positioning* (PPP), par exemple HAS qui est mis à disposition gratuitement par l'ESA.

Ces trois techniques demandent l'obtention des mesures GNSS brutes. Ces données seraient accessibles à travers l'API *Location* d'Android. L'utilisation de cette API nécessite le développement d'une application native Android. À l'heure actuelle, les mesures brutes ne sont pas disponibles à travers une page web pour des raisons de sécurité et de confidentialité.

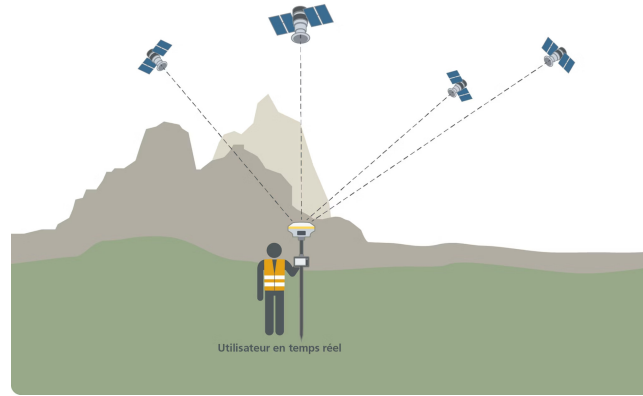


FIGURE 2.11 – Schema d'un utilisateur GNSS. (cadastre.ch)

Les bibliothèques de réalité augmentée utilisent également les mesures de l'IMU (accéléromètre + gyroscope), ainsi que celles du magnétomètre pour déterminer l'orientation de l'utilisateur dans l'espace. Cependant, ces capteurs possèdent une faible précision et une mauvaise stabilité dans le temps qui impacte négativement les résultats. Même si le récepteur GNSS permet de limiter la *drift* de ces senseurs, un nombre minimal de satellites et une bonne visibilité vers le ciel sont nécessaires. (CAPUANO et al., 2023)

Calibrer ces senseurs peut s'avérer compliqué, car chaque senseur connaît des erreurs de natures différentes et nécessite une méthode de calibration personnalisée. La qualité et la "quantité d'erreur" des mesures dépendent des modèles de senseurs embarqués et le modèle des senseurs dépendent du modèle du smartphone.

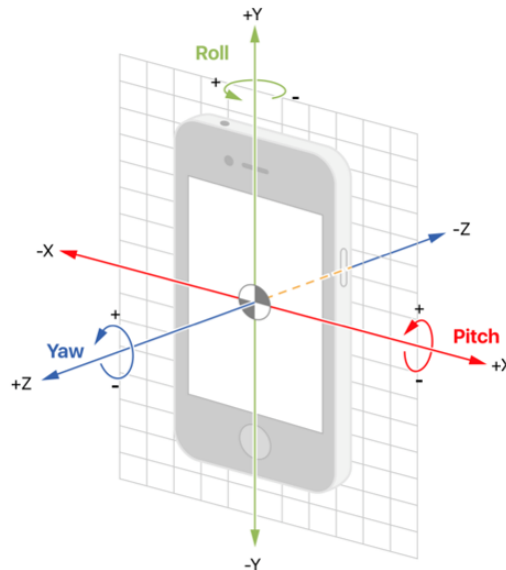


FIGURE 2.12 – Schema des axes d'un smartphone. (researchgate.net)

La caméra fait aussi partie des senseurs capables d'améliorer la géolocalisation de l'appareil. Les images récoltées peuvent être utilisées à des fins différentes. On peut citer la détermination de la vitesse de déplacement, grâce à des algorithmes d'odométrie visuelle (VIO). On pourrait

également implémenter un algorithme de détection d'arêtes horizontales et verticales, afin d'obtenir l'orientation absolue du smartphone. Toutes ces techniques sont limitées par la capacité de calcul, la capacité de la batterie est la qualité du réseau internet, car ces calculs sont faits en temps réel et sur un flux d'image constant.

L'utilisation de cibles connues en coordonnées visibles dans l'image serait une autre solution pour améliorer la détermination de l'attitude et la position du smartphone. L'utilisation de cibles est très limitant, car celles-ci doivent être visibles par l'utilisateur et reconnaissables par l'algorithme utilisé. Une cible mal orientée, avec une mauvaise luminosité ou un temps pluvieux peut rendre la cible indétectable. Ces limites rendent l'utilisation de cibles en extérieur difficile.

2.7.2 Expérience utilisateurs

L'acceptation sociale de la WebAR peut aisément être affectée par des facteurs de sécurité et de confidentialité. Les informations privées des utilisateurs, telles que les informations d'identification personnelle et de localisation, peuvent être collectées par des tiers à d'autres fins. Afin de garantir la sécurité de la vie privée, il est nécessaire de mettre en place des mécanismes de confiance pour la génération de données et des mécanismes de certification pour l'accès aux données, ainsi qu'un environnement réseau sécurisé pour la transmission des données.

Les défis liés à la confidentialité et à la sécurité des systèmes de réalité augmentée nécessitent également des approches sociales, politiques ou juridiques. L'AR sur le Web dépend davantage des réseaux mobiles et est donc plus susceptible d'être piratée. Cela pose un défi important pour le développement et le déploiement d'applications de réalité augmentée sur le Web. (QIAO et al., 2019a)

La représentation du modèle numérique fait aussi partie de l'expérience de l'utilisateur. Un mauvais choix de représentation peut saboter l'immersion ou l'objectif de l'application. Un niveau de détails trop faible, la mise en évidence de la construction ou l'ajout des textures peuvent avoir un impact sur la capacité de l'utilisateur à se représenter la scène. (CHASSIN et al., 2022)

Lorsqu'un utilisateur visualise une scène en réalité augmentée, l'objet numérique doit sembler appartenir au monde réel. L'occlusion survient lorsque les objets de la scène, qu'ils soient réels ou numériques, ne sont pas correctement gérés en fonction de leur profondeur. Cela peut entraîner la superposition d'un élément numérique devant un objet réel pourtant plus proche dans le champ de vision. Une mauvaise gestion de ce phénomène réduit fortement l'immersion et empêche l'objet numérique de se fondre dans l'environnement réel.

Pour éviter cela, l'application doit être capable d'estimer la profondeur de la scène et la position relative des objets réels afin de placer correctement le modèle 3D. Ce traitement nécessite des algorithmes complexes fonctionnant en temps réel, sollicitant grandement les ressources de calcul du smartphone, déjà mises à contribution par d'autres opérations essentielles à l'AR. (GOOGLE, 2025)

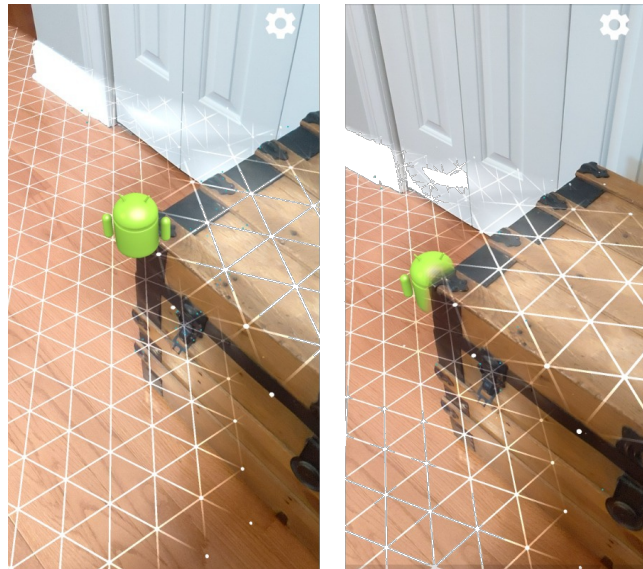


FIGURE 2.13 – Exemple avec et sans gestion de l’occlusion. (GOOGLE, 2025)

2.7.3 Recueil des *feedbacks*

Obtenir des *feedbacks* nécessite d’abord la présence d’utilisateurs. Dans notre cas, ceux-ci seront invités à se rendre sur les lieux à une heure précise. Cette nécessité vient du fait qu’un encadrant sera présent tout au long de l’expérience.

La difficulté est d’obtenir assez d’inscription. En effet, le principal défi sera d’attirer l’attention des personnes contactées, afin de les convaincre de prendre de leur temps à l’évaluation de l’application. Malgré ces efforts, une incertitude subsistera quant au volume de *feedbacks* que l’on peut raisonnablement espérer.

Obtenir des profils variés présente également un défi. Certaines hypothèses mettent en concurrence les différents profils. S’ils sont trop similaires, les conclusions ne seront pas significatives.

Certaines données sur l’utilisation de l’application seront récoltées, afin d’analyser en détail la manière dont cette application sera utilisée. Par exemple, la durée de l’utilisation peut donner une indication sur l’intérêt que l’utilisateur porte sur le système. Connaitre l’âge de l’utilisateur pourrait donner des informations sur le type d’utilisateurs potentiels. Leurs déplacements durant l’expérience pourraient donner une indication sur les angles du projet les plus visualisés. Ce sont quelques exemples d’informations qui peuvent être récoltées.

Comme précisé dans le chapitre 2.7.2, cette récolte d’informations peut engendrer des gênes au niveau de l’utilisateur. Certaines personnes ne souhaitent pas que ces informations soient utilisées. C’est pourquoi il sera important de les sensibiliser dès le démarrage de l’expérience.

En plus de ces raisons limitantes, la personne doit pouvoir accéder à l’application. Le 2.6 mentionne les librairies utilisées pour de la réalité augmentée à travers le web. Certaines d’entre elles ne sont utilisables qu’à travers certains navigateurs. Cette contrainte d’accès aura certainement un impact considérable sur le nombre de retours reçu.

Chapitre 3

Zone d'étude

Dans le cadre de ce travail de master, des données tests ont été nécessaires pour le développement et l'évaluation de l'application web de réalité augmentée. Une opportunité s'est présentée avec le projet Ronquoz 21 de la ville de Sion en Valais. Ce chapitre présente ce projet global ainsi que différents sous-projets visualisés à travers l'application développée.

3.1 Ronquoz 21

3.1.1 Présentation du quartier

Le périmètre du projet Ronquoz 21 se situe sur le quartier des Ronquoz au sud de la capitale valaisanne. Il est délimité par les voies de chemins de fer et la gare CFF au nord, le pont de la Sainte-Marguerite au nord-est, à l'ouest la rue traversière puis l'aéroport, tandis que l'autoroute marque sa limite au sud. Le Rhône coule à l'est du quartier, formant sa limite naturelle. La surface de ce site est d'environ soixante hectares. (figure 3.1)

Jusqu'aux années 60, le quartier était principalement occupé par des zones agricoles. L'essor de l'industrie a transformé le site avec l'implantation de plusieurs entreprises, lui conférant sa vocation essentiellement industrielle. Durant cette même époque, des habitations ont commencé à émerger dans ce secteur. Depuis les années 2000, l'important développement sédunois a amorcé l'extension du centre-ville et l'implantation d'activités tertiaires et de formation dans ce quartier. Aujourd'hui, Ronquoz est le résultat de ces mutations, mêlant zones industrielles, tertiaires et résidentielles. (VILLE DE SION, 2023)

A l'heure actuelle, le quartier compte près de 900 logements et 4'200 emplois. Avec ce projet, le nouveau quartier devrait accueillir plus de 5'000 habitants et 6'000 emplois.



FIGURE 3.1 – Situation du périmètre du projet Ronquoz 21. (VILLE DE SION, 2023)

3.1.2 Contexte

La loi fédérale sur l'aménagement du territoire (LAT) promeut un développement urbain orienté vers la densification du tissu bâti existant, dans le but de limiter l'étalement urbain et de préserver les espaces naturels et agricoles. Par conséquent, la création et l'extension de nouvelles zones à bâtir sont aujourd'hui fortement régulées

Dans ce cadre contraint, les communes doivent répondre à l'évolution démographique principalement par une utilisation plus intensive du sol déjà urbanisé. À Sion, les projections démographiques indiquent une augmentation de la population d'approximativement 13'400 habitants à l'horizon 2045, impliquant un besoin accru en logements.

Dans ce contexte, la Ville de Sion a identifié le quartier des Ronquoz comme un secteur prioritaire de développement urbain, en raison de sa proximité avec le centre-ville ainsi que de la présence d'infrastructures et de réseaux existants, favorables à une densification cohérente du tissu urbain. (VILLE DE SION, 2023)

3.1.3 Présentation du projet

Dans le cadre de ce projet, un mandat d'étude parallèle (MEP) a été lancé par la Ville de Sion. L'un des objectifs spécifiés par les experts chargés d'évaluer les différentes propositions, est de faire preuve d'imagination et d'innovation dans leur proposition. En effet, planifier Ronquoz 21 est l'occasion pour la Ville de Sion de se projeter dans la ville du 21^{ème} siècle et d'inventer une nouvelle identité urbaine. Ce quartier pourrait servir de laboratoire pour tester de nouvelles approches en matière d'urbanisme, de mobilité et de développement durable.

A la suite de ce MEP, plusieurs études préliminaires ainsi que plusieurs démarches participatives, quatre grands principes du projet ont pu être identifiés et inscrits dans le plan guide (VILLE DE SION, 2023) :

1. **Un projet structuré par le paysage et les espaces publics** : Le concept du projet réside dans la complémentarité entre la densité urbaine et les grands espaces libres. Aussi, la densification importante du quartier est accompagnée par la création d'un espace public majeur : La Chaîne des parcs. Avec la plantation de près de 5'500 arbres, plus d'un tiers de la surface du quartier sera dédié aux espaces libres de constructions et à la mise en valeur de l'eau. Le futur quartier bénéficiera d'un cadre de vie de qualité élevé.
2. **Un quartier durable** : Basé sur des objectifs ambitieux du point de vue environnemental, énergétique, social et économique, le projet Ronquoz 21 vise une gestion durable des ressources, de la récréation de valeurs écologiques, de la conservation du patrimoine existant, de l'intégration socio-culturelle des nouveaux habitants et du confort des futurs usagers.
3. **Une mobilité repensée** : La priorité sera donnée à la mobilité douce, ainsi qu'aux transports publics. Le trafic individuel motorisé sera quant à lui limité autant que possible. Ainsi, de nombreux aménagements pour la pratique de la mobilité douce seront réalisés. La gare de Sion s'étendra au Sud des voies ferrées en devenant un véritable hub de mobilité comprenant une nouvelle gare routière, ainsi que le départ de la télécabine Sion - Les Mayens de l'Ours. Enfin, des parkings en silo situés sur les axes principaux couvriront les besoins en stationnement de tous les secteurs.
4. **Une transition progressive et pragmatique** : Fondés sur l'analyse du parcellaire et du bâti existant, et enrichis par les démarches participatives, les principes de mise en œuvre de Ronquoz 21 s'affirment vers un développement réalisable au fur et à mesure des opportunités de relocalisations d'entreprises ou de réutilisation d'espaces libres.
5. **Une mixité des usages** : Le projet Ronquoz 21 ne sera pas uniquement un quartier d'habitations. Il intégrera également des espaces pour des activités économiques, des infrastructures éducatives, culturelles et de loisirs, ainsi que des services de proximité. Cette mixité des usages vise à créer un quartier vivant et dynamique, favorisant les interactions sociales et la qualité de vie des habitants.



FIGURE 3.2 – Montage numérique du futur quartier des Ronquoz. (HERZOG DE MEURON, 2019)

3.1.4 Phases de réalisations

La réalisation pour ce projet est étirée sur plusieurs décennies. Depuis le lancement du MEP en 2019, plusieurs étapes ont été réalisées (VILLE DE SION, s. d.) :

- **2020** : Début de la zone réservée pour le projet Ronquoz 21 dans le plan d'affectation des zones (PAZ).
- **2023-2024** : Élaboration de l'avant-projet et du plan-guide (v1).
- **2025** : Prolongation de la zone réservée par le conseil général (CG) de la Ville de Sion.

En marge de ces étapes, les études préliminaires et démarches administratives nécessaires à la révision du règlement communal des constructions et des zones (RCCZ), ainsi que celle du plan d'affectation de zone sont en cours. Ces révisions sont essentielles pour adapter le cadre réglementaire aux objectifs et aux spécificités du projet Ronquoz 21. Les étapes principales prévues dans l'élaboration de ce quartier sont les suivantes (VILLE DE SION, s. d.) :

- **2025-2026** : Étude et approbation du RCCZ révisé par le CG.
- **2026** : Signature des premières conventions d'intention et mise à l'enquête publique du PAZ.
- **2027** : Élaboration des premiers plans de quartier et adoption du PAZ par le CG.
- **2028** : Homologation du PAZ par le canton et approbation des premiers plans de quartier par la commune.
- **2029** : Premières constructions.

3.2 Projets sélectionnés

Dans le cadre de ce travail de master, plusieurs projets situés dans le quartier des Ronquoz ont été modélisés en 3D et intégrés dans l'application web de réalité augmentée développée. Ces projets couvrent différents types d'aménagements urbains et illustrent la diversité des interventions prévues dans le cadre du projet Ronquoz 21. De plus, cette diversité permet de tester plusieurs types de données et d'obtenir un retour varié selon les infrastructures visualisées. Les trois projets sont situés à proximité.

Le premier projet est une construction immobilière. Il s'agit du *Swiss Innovation Park* situé à proximité de la gare CFF. Ce bâtiment sera situé sur un actuel parking privé.

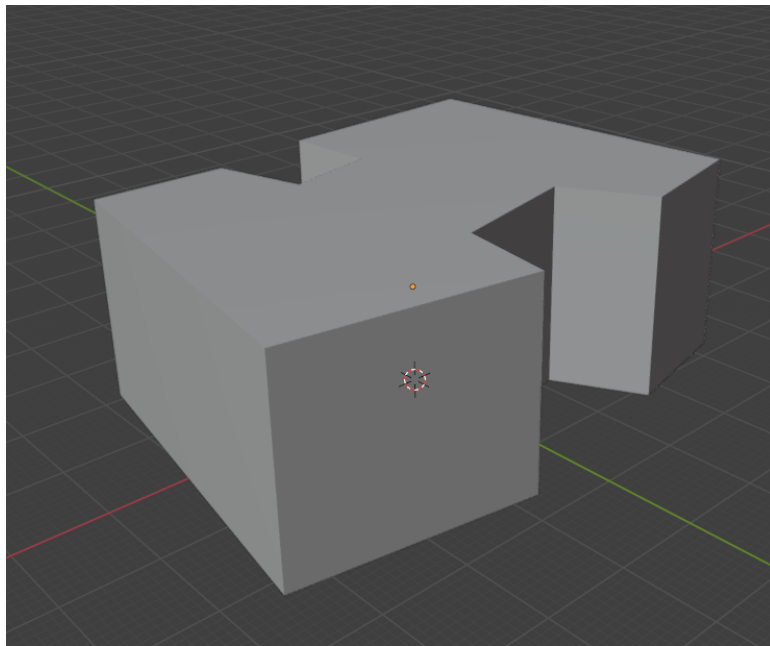


FIGURE 3.3 – Modèle 3D du bâtiment *Swiss Innovation Park* simplifié.

Le second projet est le parc des Câbles. Celui-ci s'implantera entre le *Swiss Innovation Park* et l'actuel Alpole, bâtiment de l'EPFL Valais. Ce parc sera directement rattaché au futur cordon boisé mentionné précédemment et fera le lien avec la gare CFF, la future gare routière et le départ de la future liaison câblée Sion - Les Mayens de l'Ours. Pour des raisons de lisibilité en AR, seul le mobilier urbain a été ajouté à la scène finale.

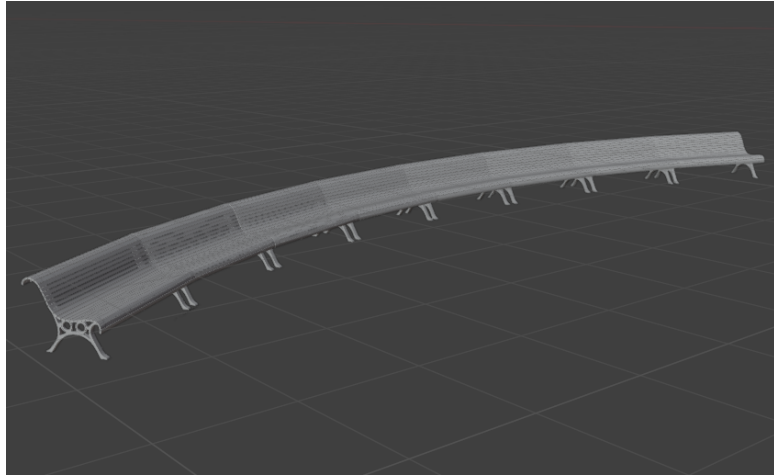


FIGURE 3.4 – Modèle 3D d'un banc du parc des Câbles.

Pour terminer, le troisième projet est la construction de la liaison câblée qui relie la gare CFF aux Mayens de l'Ours. Cette installation permettra de relier le centre-ville de Sion aux zones de loisirs situées en hauteur, facilitant ainsi l'accès aux activités récréatives et touristiques pour les habitants et les visiteurs. Son tracé est adjacent au *Swiss Innovation Park*. Le tracé complet ne m'a pas été transmis, mais une portion suffisante pour permettre une visualisation en AR intéressante.

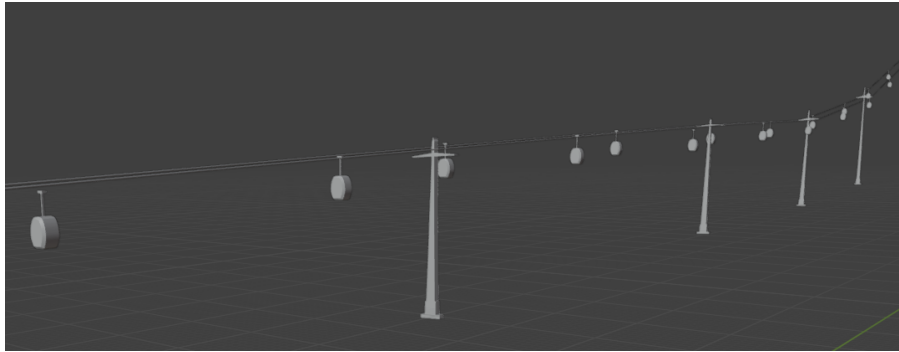


FIGURE 3.5 – Modèle 3D de la liaison câblée.

Chapitre 4

Cadre méthodologique de la recherche

Le présent chapitre vise à poser le cadre méthodologique et à formuler les hypothèses qui guideront l'analyse, en explicitant les questions centrales auxquelles le travail cherchera à répondre. Ces hypothèses constituent un cadre d'interprétation permettant de circonscrire le champ d'étude et de préciser les relations supposées entre les différentes variables en jeu.

Pour rappel, les objectifs de ce travail sont de concevoir et prototyper une application WebAR permettant la visualisation immersive de maquettes 3D de projets urbains, ainsi que d'évaluer l'acceptabilité et l'expérience utilisateur associée à cette technologie à travers la récolte de *feedback*.

4.1 Public cible

Ce projet n'est pas destiné à un public en particulier. Il s'adresse à toute personne susceptible de circuler à proximité du site de la future construction et disposant d'un appareil mobile capable d'accéder à l'application. Le public potentiel peut être représenté dans cette liste non exhaustive :

- **Les passants occasionnels**, attirés par la présence d'un chantier, d'une signalétique ou d'un dispositif inhabituel dans l'espace public.
- **Les riverains**, directement concernés par les impacts du futur aménagement et potentiellement motivés par un besoin d'information ou une volonté de s'exprimer.
- **Les usagers réguliers de la zone**, tels que les travailleurs, étudiants ou habitants qui transitent fréquemment à proximité du site.
- **Les personnes intéressées par les technologies numériques ou immersives**, susceptibles d'être attirées par la nouveauté de l'outil.

L'unique condition d'accès est la possession d'un smartphone ou d'une tablette disposant d'un système de géoréférencement fonctionnel et d'un navigateur web compatible. Cette faible bar-

rière technique permet de toucher un public large, mais implique également une grande variabilité dans le profil des participants, leurs motivations et leur niveau d'engagement.

4.2 Hypothèses

Ce sous-chapitre présente les hypothèses dans le cadre de cette étude. Elles visent à évaluer l'apport de la réalité augmentée dans la visualisation de projets urbains, ainsi que les facteurs susceptibles d'influencer l'expérience utilisateur. Ces hypothèses et sous-hypothèses s'appuient sur les objectifs du projet et sur les enjeux identifiés. Elles cherchent à explorer les dimensions clés de l'utilisabilité, de la compréhension, de la calibration et de l'acceptabilité de la technologie.

H1 - Le profil d'utilisateur a une influence sur l'utilisation et l'utilisabilité de l'application.

Description : Cette hypothèse vise à évaluer la facilité d'utilisation de l'application WebAR, conçue pour être accessible à un large public (voir introduction), tout en examinant l'éventuelle influence de profils utilisateurs différenciés sur l'expérience d'usage.

- **H1.1** - Le profil de l'utilisateur n'influence pas l'utilisabilité.
- **H1.2** - Le profil de l'utilisateur influence l'utilisation.

H2 - L'AR améliore la compréhension du projet.

Description : La deuxième hypothèse a pour objectif d'évaluer si l'AR améliore la compréhension du projet par rapport à une visualisation classique pour un utilisateur avec et sans expérience de la 3D. L'amélioration de la lecture des projets urbains est l'un des principaux objectifs, et c'est ce que va permettre de tester cette hypothèse.

- **H2.1** - Le profil de l'utilisateur n'influence pas la compréhension.
- **H2.2** - L'usage de l'AR permet une meilleure perception de l'insertion du projet dans son environnement.

H3 - La calibration est contraignante pour l'utilisateur.

Description : Cette hypothèse vise à évaluer l'impact perçu par la phase de calibration. L'objectif est d'évaluer la méthode utilisée et son impact sur l'expérience de l'utilisateur.

- **H3.1** - La calibration a un impact négatif sur l'acceptabilité du système.
- **H3.2** - La calibration décourage la réutilisation potentielle.

H4 - L'acceptabilité de la technologie est positive.

Description : L'hypothèse 4 évalue la réception générale de la technologie AR pour la visualisation de projets urbains, en examinant les facteurs qui influencent l'acceptabilité. Ces sous-hypothèses permettront de mieux cibler les améliorations nécessaires.

- **H4.1** - L'intention de réutilisation est liée à la compréhension perçue du projet.
- **H4.2** - La familiarité avec les technologies 3D n'influence pas l'acceptabilité de la méthode proposée.

- **H4.3** - Une intégration perçue comme bonne du modèle dans l'environnement réel n'influence pas l'acceptabilité de la méthode.
- **H4.4** - Une distance parcourue plus importante est associée à une acceptabilité accrue de l'utilisateur.

Ces hypothèses seront évaluées à partir des données recueillies au moyen d'un questionnaire administré aux participants à l'issue des phases de test, ainsi que du *tracking*. Les réponses obtenues portent à la fois sur le profil des participants, sur l'évaluation de l'utilisabilité du prototype à l'aide du score SUS, ainsi que sur des appréciations subjectives relatives à l'expérience d'utilisation. Les résultats sont présentés dans le chapitre 6, tandis que l'analyse de ces données est présentée et discutée dans le chapitre 7.

Chapitre 5

Réalisation

Le chapitre précédent a fixé le cadre méthodologique en présentant les hypothèses du travail. Celui-ci présente la réalisation et technique mises en place pour répondre aux objectifs fixés. Il présente également l'architecture générale de l'application, les technologies utilisées ainsi que les différentes étapes d'implémentation. Enfin, il détaille les méthodes de validation employées pour évaluer la qualité et l'efficacité de la solution développée.

5.1 Vue d'ensemble du système

5.1.1 Chronologie d'utilisation

Le système développé est une application web permettant la visualisation de modèles 3D en réalité augmentée. Il est destiné à être utilisée sur des appareils mobiles, tels que des smartphones ou des tablettes. Il repose sur plusieurs composants qui travaillent ensemble pour offrir une expérience utilisateur la plus fluide et immersive possible.

L'utilisation de l'application suit un flux spécifique depuis le lancement jusqu'à l'affichage de la scène en réalité augmentée :

1. **Lancement de l'application** : L'utilisateur ouvre l'application web à travers un navigateur web sur son appareil mobile ;
2. **Page de garde** : Des *pop-ups* demandent à l'utilisateur pour accéder aux différents senseurs. Ensuite, il est automatiquement redirigé vers la page de calibration ;
3. **Calibration** : La calibration se déroule en trois étapes distinctes :
 - (a) **Premier point** : L'utilisateur est guidé en AR jusqu'au premier point connu qui est représenté par une flèche, puis, après avoir confirmé sa position, les mesures durent cinq secondes ;
 - (b) **Deuxième point** : Identique, mais sur un deuxième point connu ;
 - (c) **Validation** : L'utilisateur valide les mesures ;
4. **Visualisation** : Après la calibration, l'utilisateur est redirigé vers la page de visualisation en réalité augmentée où le modèle 3D est affiché à l'emplacement corrigé. Il a également accès à des informations relatives au projet ;

5. **Feedback** : L'onglet nommé "Feedback" permet à l'utilisateur de remplir un questionnaire portant sur son expérience avec l'application. ;
6. **Fin** : Pour les tests, un bouton permet de "terminer" l'enregistrement de la session et des activités de l'utilisateur.

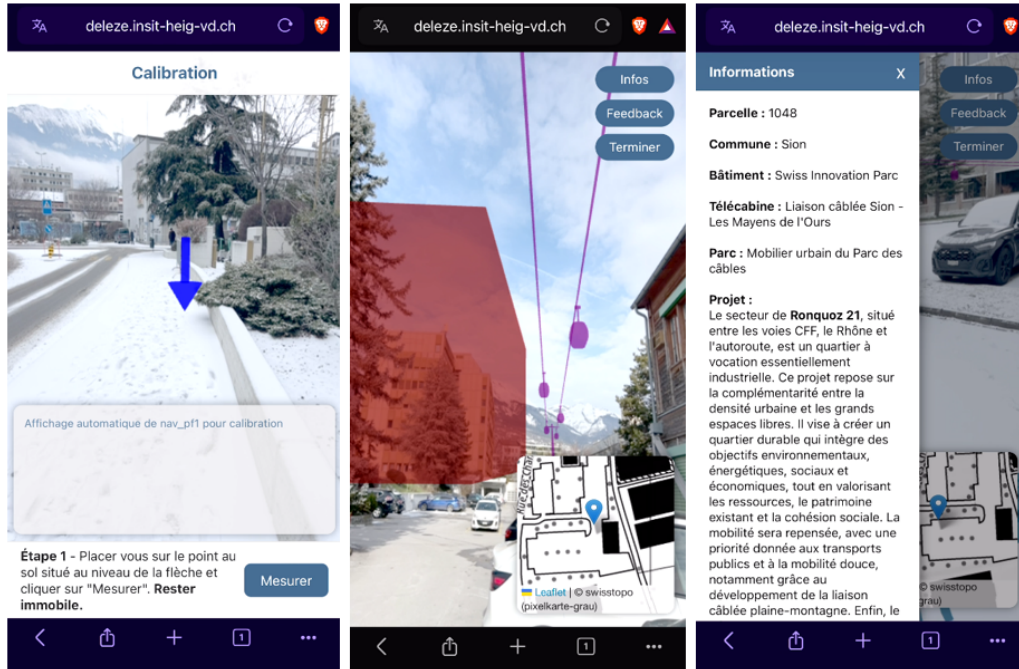


FIGURE 5.1 – Captures d'écran de la phase de calibration, la visualisation et la fenêtre d'informations.

5.1.2 Composants principaux

Les composants principaux qui constituent l'architecture de l'application sont les suivants :

- **Serveur web** : Il est responsable de l'hébergement des fichiers qui composent l'application, ainsi que de la diffusion de la webapp. Les données du *tracking* sont aussi recueillies et enregistrées sur ce serveur ;
- **Moteur de réalité augmentée** : Il est responsable de la gestion de la réalité augmentée, y compris le rendu des modèles 3D et l'intégration avec la caméra de l'appareil ;
- **Position GPS** : Il permet de récupérer la position en WGS84 (longitude/latitude) de l'appareil en tout temps ;
- **Calibration** : Ce module gère chaque étape du processus de calibration et corrige la position de l'utilisateur après la calibration ;
- **Transformation** : Il permet d'obtenir les paramètres de transformations et corrige les coordonnées données en entrée. Il collabore directement avec le module de calibration ;
- **Frontend** : Développé en Vue.js (YOU, 2026) pour gérer l'interface utilisateur et les interactions.

5.1.3 Environnement d'exécution

L'application est conçue pour être exécutée sur des appareils mobiles compatibles avec les technologies web modernes et avec les bibliothèques de réalité augmentée. Pour pouvoir afficher une scène, il est nécessaire que l'appareil soit équipé de senseurs, tels qu'un accéléromètre, un GPS, . . . À l'heure actuelle, tous les smartphones et autres appareils mobiles en sont équipés. La contrainte principale vient des bibliothèques et API utilisées, car elles ne sont pas compatibles avec tous les navigateurs, même si une grande majorité les acceptent. Pour assurer un fonctionnement complet, il est conseillé de modifier les paramètres de confidentialité du navigateur pour donner l'accès aux mesures des senseurs, ainsi que d'utiliser Chrome ou un navigateur similaire. La justesse du rendu dépend directement de la qualité des senseurs de l'appareil et du niveau de réception GPS.

5.1.4 Points connus

Le processus de calibration est brièvement introduit au début de cette section. Il est fait mention de points connus. Ces points sont utilisés comme références et mesurés. Le choix des points de référence utilisés pour la calibration s'est porté sur des points limites issus de la mensuration officielle. Ils présentent l'avantage d'offrir une précision planimétrique élevée, suffisante pour les besoins de l'étude, tout en étant déjà matérialisés et largement disponibles sur le territoire. Leurs déplacements, destruction ou recouvrement et très peu probable sur la durée des tests. Dans le cas du projet étudié, plusieurs points de ce type sont présents à proximité immédiate. Parmi ceux-ci, seuls les points les mieux positionnés ont été retenus, afin de limiter les effets de configuration défavorable et d'optimiser la qualité des résultats de calibration. En effet, une distance suffisamment grande aura un effet moindre sur une erreur directionnelle. La proximité avec le projet est une priorité, dans un souci de minimisation de la contrainte sur l'utilisateur.



FIGURE 5.2 – Situation avec l’emplacement approximatif des points de référence (vert), le bâtiment (rouge), le mobilier urbain (bleu) et la liaison câblée (mauve).

5.2 Technologies utilisées

5.2.1 Environnement de développement

Comme précisé précédemment, l’application se veut accessible sans téléchargement. Pour le permettre, un hébergement web a été choisi. Le système a donc été développé à l’aide de scripts HTML, JS et CSS.

Le framework Vue.js est utilisé pour la création de l’interface utilisateur. Ce framework, une fois pris en main, permet de réaliser des interfaces de qualité avec simplicité.

Plusieurs autres API ont été utilisées pour obtenir le résultat escompté. Capacitor (CAPACITOR, 2026) a permis de récupérer la position GPS et les informations de l’appareil connecté. Son utilisation s’est avérée essentielle lors de la phase de calibration et pour l’application de celle-ci en temps réel.

La carte qui permet à l’utilisateur de se situer fait appel à la technologie Leaflet (AGAFONKIN, 2025). Leaflet est une librairie JavaScript *open source* spécialisée dans la création de cartes interactives sur appareils mobiles.

5.2.2 Technologie AR

Il existe plusieurs technologies qui permettent de créer une scène visualisable en réalité augmentée. Une partie de celles-ci sont citées dans la section 2.5. C'est finalement la librairie Three.js (THREE.JS, 2026) qui a été principalement utilisée. Elle permet une grande variété de possibilité grâce à sa riche liste de fonction.

Pour la simulation de la position, il manquait une fonction dans cette librairie. Pour cela, LocAR.js (AR-JS-ORG, 2026) est sollicité. Il s'agit d'une librairie spécialisée sur la réalité augmentée *Location based* qui exploite Three.js. Ces deux sont outils donc parfaitement compatibles.

5.2.3 Gestion des modèles 3D

La gestion du modèle 3D à visualiser est crucial et n'est pas à négliger. En effet, un modèle mal réalisé ou positionné faussera complètement l'expérience. C'est pourquoi, plusieurs outils ont été nécessaires pour obtenir un résultat acceptable.

Tout d'abord, le logiciel *open source* Blender (B. FOUNDATION, s. d.) a été employé pour visualiser et définir le point d'ancrage du modèle. Il permet d'importer et d'exporter un grand nombre de formats différents, dont le glb qui est utilisé dans ce projet.

Certains objets reçus par des bureaux d'architecture contenaient trop de détails. Ceux-ci rendent le fichier lourd et la visualisation moins aisée. Pour améliorer le rendu visuel lors de l'utilisation, les modèles reçus ont été simplifiés au maximum, transformant les maquettes d'architectes (cf. figure 5.8). Pour réaliser cela, le logiciel de modélisation 3D propriétaire de Leica a été utilisé : Cyclone 3DR (GEOSYSTEMS, 2026). Il est largement adopté en ingénierie géomatique pour la manipulation est la création de modèle numérique de terrain.

5.3 Architecture du prototype

Cette section explique plus en détail les différentes fonctions implémentées, ainsi que les interactions entre celles-ci. Des schémas viennent aider à la compréhension.

5.3.1 Moteur de réalité augmentée

Le script chargé de construire et de rendre la scène de réalité augmentée est séparé en trois fonctions distinctes (cf. figure 5.3). La première, *initAREngine()* est le cœur du moteur de rendu. Cette fonction crée la scène à l'aide des différentes fonctions disponibles chez Three.js et locAR.js. Un rendu (*THREE.WebGLRenderer()*), une scène (*THREE.PerspectiveCamera()*), ainsi qu'une caméra (*THREE.Scene()*) doivent être initialisés dès le lancement de l'application. Cette fonction active également la *pop up* qui permet à l'utilisateur d'accepter l'utilisateur des capteurs du smartphone pas le script. Ceci est indispensable pour un bon fonctionnement.

La deuxième fonction est nommée *AREngine()*. Elle fait le lien entre la scène créée et le *mesh* à afficher. Elle est chargée d'importer le *mesh* dans la scène et de gérer les éventuelles erreurs en les signalant à l'utilisateur. Cette fonction prend en entrée la description du modèle 3D à afficher.

Pour charger le modèle 3D, la fonction *CreateMesh()* est sollicitée. Comme son nom l'indique, elle crée ou importe le modèle 3D à visualiser. En entrée, la fonction prend une description de l'objet qui inclut : le type de modèle (flèche ou glb), les coordonnées WGS84 du point d'ancrage, la texture d'affichage (couleur et niveau de transparence) et le chemin vers le fichier, s'il s'agit d'un glb à importer. La fonction gère l'import du modèle en fonction de son type. Si le modèle est un glb, la fonction utilise le *GLTFLoader()* de Three.js pour importer le fichier. S'il s'agit des flèches utilisées lors de la phase de calibration, la fonction crée un ensemble de formes 3D à l'aide des fonctions de Three.js.

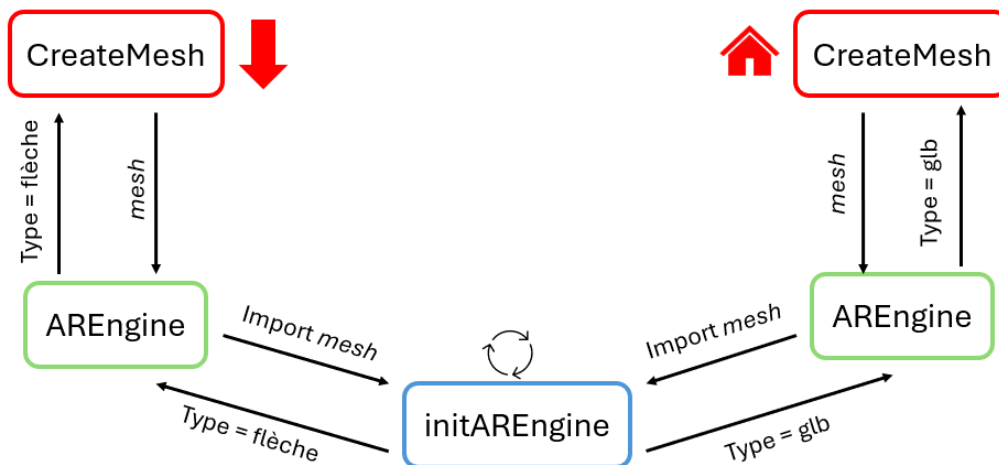
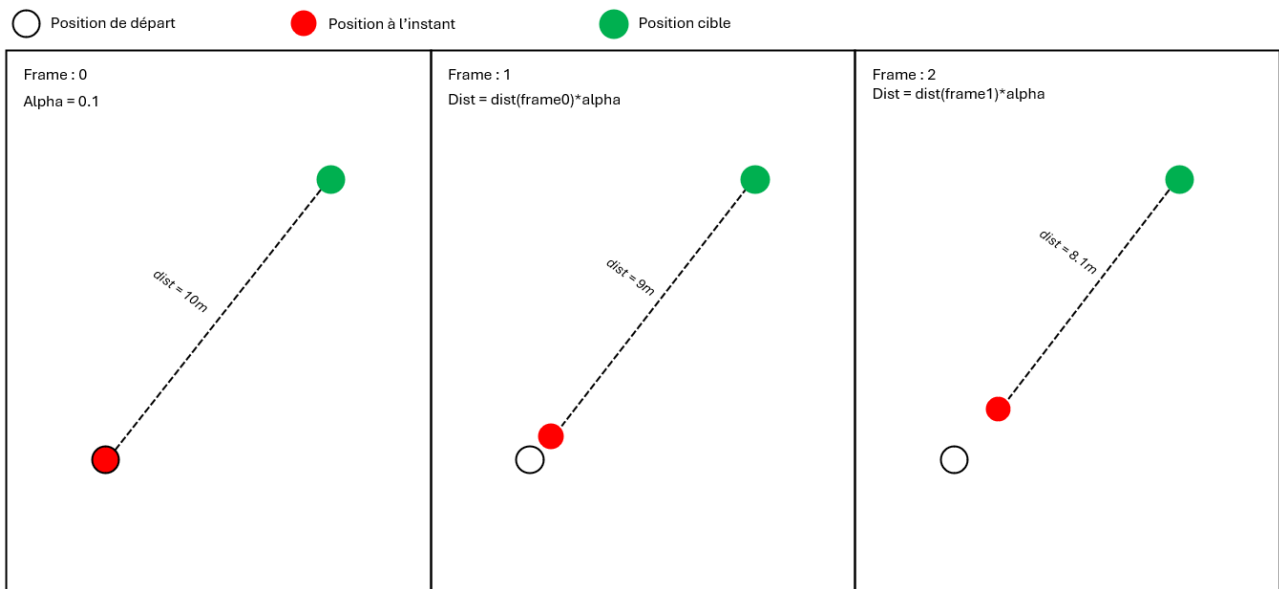


FIGURE 5.3 – Schéma explicatif du fonctionnement du moteur de réalité augmentée.

Lerping

Le *Lerping* est une méthode qui permet de lisser un déplacement le long d'un vecteur en interpolant progressivement la position courante vers une position cible le long du vecteur qui les relie. Cette méthode est utilisée pour rendre les déplacements du modèle lors de la visualisation moins brutale. En effet, la forme visualisée se déplace à chaque réception d'une position GPS. (UNITY, 2026)

Dans la fonction *smoothLerpPosition()*, le paramètre alpha représente la fraction de la distance restante parcourue à chaque itération (*frame*). Par exemple, sur une distance de 10 m et un alpha fixé à 0.1 avec un rendu à 30 fps (*frames per seconde* – images par seconde), l'objet se rapproche de la position cible en parcourant à chaque image 10 % de la distance restante. Le second paramètre est un seuil de distance maximale entre la nouvelle et l'ancienne position pour laquelle le *lerping* est effectué. Dans le cadre de ce projet, ce seuil est fixé à 8 m, tandis que le paramètre alpha a été fixé à 0.01 (1%).

FIGURE 5.4 – Schéma explicatif de la fonction de *lerping*.

5.3.2 Position GPS

L'outil utilisé pour récupérer la position de l'appareil est Capacitor. Comme présenté dans la section 5.2, il s'agit d'une API permettant d'accéder aux informations natives de l'appareil à travers une application web. Il est compatible avec la majorité des appareils mobiles et des systèmes d'exploitation.

L'API *Geolocation* de Capacitor propose une méthode simple pour obtenir la longitude et la latitude de l'utilisateur. En plus de ces coordonnées, elle fournit également des informations sur la précision de la mesure, l'altitude, la vitesse et la direction. La fonction de cette API est nommée *getCurrentPosition()*. Elle peut être accompagnée d'options. La seule qui est utilisée dans le cadre de ce projet est *enableHighAccuracy*. Lorsqu'elle est activée, l'API tente d'obtenir la position la plus précise possible.

Deux autres API Capacitor ont été exploitées. Il s'agit de *Device* et *Core*. La première permet d'obtenir des informations sur l'appareil utilisé, telles que le modèle, le fabricant, le système d'exploitation et la version. La seconde API fournit des informations sur la plateforme sur laquelle l'application s'exécute (iOS, Android, Web, ...).

La fonction nommée *getPosition()* regroupe l'appel aux trois API présentées ci-dessus. Elle est asynchrone et retourne une promesse qui se résout avec un objet contenant les informations de position. Cette fonction est ensuite appelée par d'autres fonctions de l'application qui nécessitent l'obtention de la position de l'utilisateur. Les informations retournées sont :

- La Plateforme (iOS, Android, Web, ...);
- Les coordonnées GPS (Longitude, Latitude);
- La précision de la mesure;
- Un *timestamp* indiquant le moment de la mesure;
- Le modèle de l'appareil.

5.3.3 Calibration

La calibration est une étape techniquement complexe de l'application. Son but d'origine est de corriger la position de l'utilisateur en fonction de mesures faites sur deux points connus. Pour cela, plusieurs fonctions travaillent conjointement. Les étapes de calibration sont détaillées ci-dessous en reprenant ce qui a été présenté dans la section 5.1.

Mesures sur les Points connus

Lors de la première et deuxième étape de la calibration, l'utilisateur est invité à se rendre sur un point connu. Une fois arrivé, il doit confirmer sa position en appuyant sur un bouton. À ce moment, une série de mesures est effectuée durant au minimum cinq secondes. La fonction qui gère cette étape est nommée *runCalibrationPoint()*. Son devoir est d'appeler la fonction *calibrateGps()* et de gérer la mise en forme des données en sortie. Ces données sont ensuite stockées pour être utilisées lors de l'étape suivante et de garder une trace des résultats dans un fichier JSON.

La fonction *calibrateGps()* constitue le maillon central de la chaîne de traitement. Elle est chargée de collecter les positions GPS en appelant la fonction *getPosition()*, présentée dans la section précédente, puis d'en assurer le traitement.

Le processus d'acquisition repose sur une combinaison de conditions d'arrêt, comprenant un critère temporel, correspondant à une durée minimale d'observation, et un critère quantitatif, relatif au nombre minimal d'échantillons collectés. Le calcul n'est validé que lorsque ces deux critères sont simultanément satisfaits. Pour la phase de tests réalisés, la durée minimale a été fixée à cinq secondes, tandis que le seuil minimal d'échantillons requis a été de dix.

La position mesurée en temps réel est ensuite comparée à la position de référence connue. Sur cette base, différents indicateurs statistiques sont calculés : la position moyenne des mesures, la distance d'Haversine (*dHaversine*) entre la position mesurée et la position connue, l'écart-type, ... La formule d'Haversine permet de déterminer la distance du grand cercle entre deux points d'une sphère à partir de leurs longitude et latitude. Il s'agit d'une estimation, car cette formule suppose que la terre est parfaitement ronde. Cette estimation suffit amplement dans ce contexte d'utilisation.

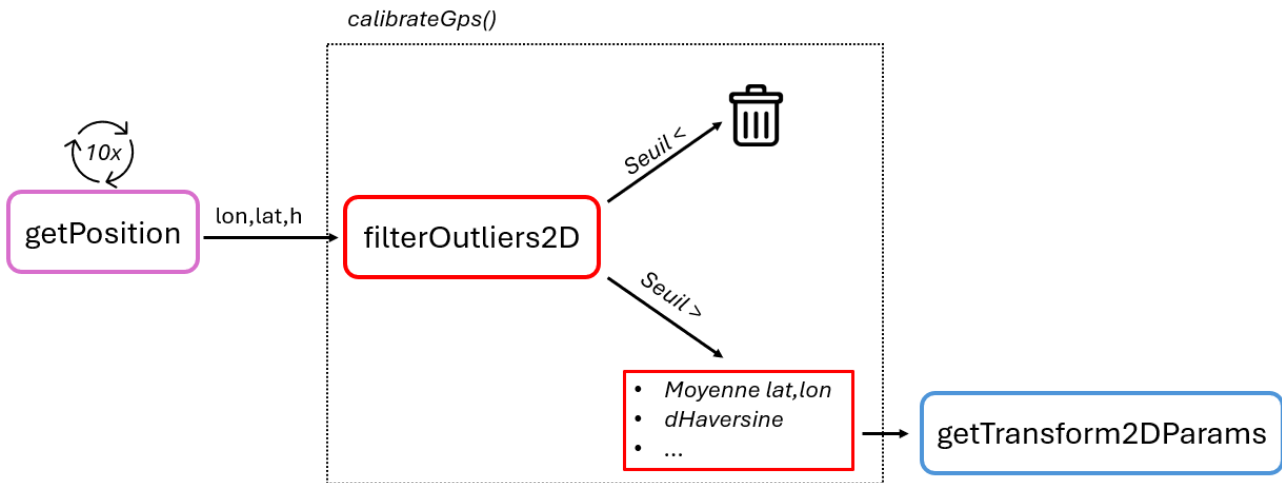


FIGURE 5.5 – Schéma du traitement des mesures utilisées pour la calibration.

Filtrer les *outliers*

La position utilisée dans le calcul des paramètres de transformation est la position mesurée moyennée. Pour éviter que des mesures aberrantes faussent le résultat, un algorithme de filtrage est appliqué après les mesures. L'algorithme utilisé est basé sur la cote Z. Il permet d'identifier et de supprimer les valeurs qui s'écartent significativement de la moyenne de données distribuée normalement.

Pour chaque valeur, une cote Z est calculée. Cette cote Z correspond au nombre d'écarts types séparant une donnée de la moyenne. La formule est la suivante :

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (5.1)$$

avec :

- x représente la valeur observée ;
- μ la moyenne des observations ;
- σ l'écart-type.

Le seuil de filtrage des valeurs aberrantes est fixé à $z_{\text{threshold}} = 2.5$. Ce choix s'appuie sur des considérations statistiques et contextuelles. Sous l'hypothèse d'une distribution approximativement normale des erreurs, un tel seuil, permet de conserver environ 99% des observations tout en excluant les écarts les plus significatifs. (GUILLAUME, 2025b)

Dans le contexte des mesures GPS, le bruit peut être non gaussien et ponctuellement élevé en raison de phénomènes tels que les multi-trajets ou les masques environnementaux. De ce fait, le choix de cette méthode peut être remis en question.

Le filtrage utilisé ne constitue pas une méthode optimale au sens strict. Néanmoins, ce choix se justifie par sa simplicité d'implémentation. Il intervient comme un premier niveau de filtrage, destiné à éliminer les écarts manifestement aberrants, sans prétendre modéliser finement la distribution des erreurs. Bien que non optimal d'un point de vue statistique strict, le filtrage par cote Z constitue un compromis pragmatique adapté aux contraintes du projet.

Application de la transformation

Une fois les deux points connus mesurés, la fonction `startLiveCorrectedFakeGps()` se charge de récolter les paramètres de transformation. Ces paramètres sont ensuite appliqués en temps réel aux positions GPS récolté à l'aide de la fonction importée `getPosition()`. Les fonctions de transformation sont détaillées au prochain sous-chapitre, mais la fonction englobant les différentes étapes se nomme `applyTransform()`. Sa seconde tâche est de simuler la position de l'utilisateur en fonction du résultat post-transformation. En effet, la librairie `LocAR.js` et sa fonction `fakeGps` permet de donner une "fausse" position de l'utilisateur afin d'obtenir un rendu adapté. Cette fonction est appelée une fois la phase de calibration aboutit.

Pour que la fonction `fakeGps` fonctionne, il est nécessaire de stopper la récupération de la position GPS en temps réel. Ceci est réalisé en sollicitant la fonction `stopGps` de `LocAR.js`. Ensuite, la fonction `fakeGps` est appelée à intervalles réguliers (toutes les 1000 ms) avec la position corrigée en entrée. La position de l'utilisateur est ainsi continuellement mise à jour avec la position corrigée, offrant une expérience de réalité augmentée améliorée. Le détail de la transformation est présenté dans la section suivante et est accompagné d'un schéma explicatif (cf. figure 5.7).

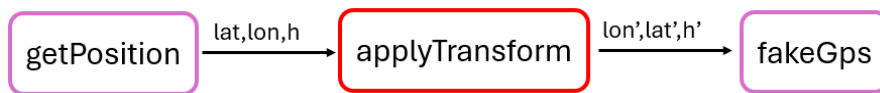


FIGURE 5.6 – Schéma de la correction de la position en temps réel.

5.3.4 Transformation

La transformation appliquée est inspirée d'une Helmert 2D. Cette transformation de similitude est définie par une translation 2D (tx, ty) , une rotation (θ) et un facteur d'échelle (k) . Le recours à une transformation à quatre paramètres permet une estimation complète à partir de seulement deux points de référence. Ce choix permet de limiter les contraintes imposées aux utilisateurs et constitue un avantage déterminant dans le contexte de l'application. (GUILLAUME, 2025b)

Une transformation de similitude de ce type est uniquement utilisable avec des coordonnées cartésiennes. Dans notre cas, les coordonnées en entrée de la calibration sont des coordonnées en WGS84. Il s'agit d'un système de coordonnées ellipsoïdales (longitude λ , latitude φ). Il est donc nécessaire de les convertir. Pour ce faire, la fonction `ell2cart()` applique les équations suivantes : (GUILLAUME, 2025a)

$$\begin{aligned}
x(\lambda, \varphi, h) &= (R_N + h) \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda \\
y(\lambda, \varphi, h) &= (R_N + h) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda \\
z(\lambda, \varphi, h) &= [R_N (1 - e^2) + h] \cdot \sin \varphi
\end{aligned} \tag{5.2}$$

$$R_N(a, e, \varphi) = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi}}$$

avec :

- R_N qui représente le rayon de courbure de la section normale à l'ellipsoïde.

Dès que les coordonnées sont converties en cartésiennes, les paramètres de la transformation peuvent être calculés. Ces paramètres sont :

- La translation en X (tx) ;
- La translation en Y (ty) ;
- La rotation (θ) ;
- Le facteur d'échelle (k).

Une fois les deux points de calibration mesurés sur le terrain, la fonction *getTransform2dParams()* est appelée pour calculer les paramètres de transformation. Elle utilise les coordonnées cartésiennes des points mesurés et des points connus pour déterminer les paramètres de la transformation 2D. La méthode employée repose sur la résolution de plusieurs équations :

$$\begin{aligned}
\Delta x &= x_{mes,2} - x_{mes,1} \\
\Delta y &= y_{mes,2} - y_{mes,1} \\
\Delta X &= x_{connu,2} - x_{connu,1} \\
\Delta Y &= y_{connu,2} - y_{connu,1} \\
k &= \frac{\sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2}}{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}} \\
\theta &= \arctan\left(\frac{\Delta Y}{\Delta X}\right) - \arctan\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) \\
tx &= x_{connu,1} - k \cdot (\cos \theta \cdot x_{mes,1} - \sin \theta \cdot y_{mes,1}) \\
ty &= y_{connu,1} - k \cdot (\sin \theta \cdot x_{mes,1} + \cos \theta \cdot y_{mes,1})
\end{aligned} \tag{5.3}$$

avec :

- Δx la différence en x entre les deux points mesurés ;
- Δy la différence en y entre les deux points mesurés ;
- ΔX la différence en x entre les deux points connus ;
- ΔY la différence en y entre les deux points connus.

Une fois les paramètres calculés, ils sont fixes pour toute la durée de la session en cours. Ils sont utilisés pour corriger la position de l'utilisateur en temps réel. La fonction principale *applyTransform()* prend en entrée les coordonnées ellipsoïdales (lon, lat, h) et les paramètres de transformation issue des mesures faites au préalable. Les résultats de cette fonction sont les coordonnées ellipsoïdales transformées. Pour chaque position recueillie en temps réel, elle applique les étapes suivantes :

1. Conversion des coordonnées ellipsoïdales (lon, lat, h) en coordonnées cartésiennes (x, y, z) à l'aide de la fonction *ell2cart()*;
2. Application de la transformation 2D (*transfo2D()*) aux coordonnées cartésiennes en utilisant les paramètres de transformation calculés précédemment ;
3. Conversion des coordonnées cartésiennes transformées (x', y', z') en coordonnées ellipsoïdales (lon', lat', h') à l'aide de la fonction *cart2ell()*.

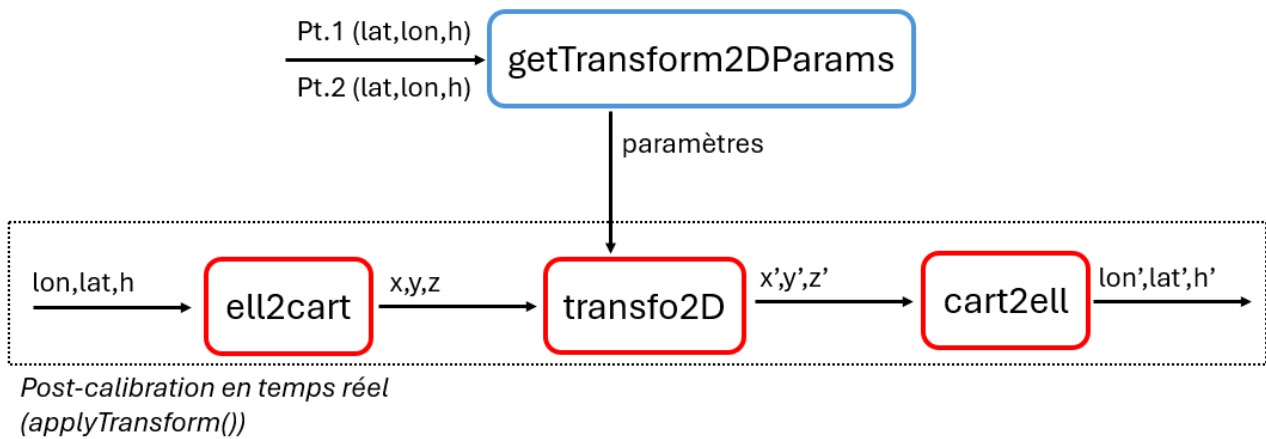


FIGURE 5.7 – Schéma explicatif des interactions entre les fonctions de transformation.

5.3.5 Fonctionnement résumé

Pour résumer, l'ordre d'activation des fonctions principales lors de l'utilisation de l'application est le suivant :

1. Initialisation du moteur de réalité augmentée avec la fonction *initAREngine()*;
2. Lancement de la phase de calibration avec affichage des flèches en AR. Pour cela, appel de la fonction *AREngine()* avec en entrée la description des flèches ;
3. Pour chaque point connu, mesures des positions GPS en appelant la fonction *getPosition()* et traitement des données avec la fonction *calibrateGps()*;
4. Calcul des paramètres de transformation avec la fonction *getTransform2d* et application de ces paramètres en temps réel avec la fonction *startLiveCorrectedFakeGps()*;
5. Après la calibration, appel de la fonction *AREngine()* avec en entrée la description du modèle 3D à visualiser.

5.4 Modèles 3D

Les modèles 3D utilisés dans l'application sont des *mesh* au format glb. Ce format est une version binaire du glTF. Comme expliqué dans la section 2.5.4, ce format est particulièrement adapté à une utilisation en réalité augmentée, car il est optimisé pour le web et permet une bonne compression des données tout en conservant une qualité visuelle acceptable. De ce fait, la transmission et le rendu des modèles sont plus rapides, ce qui améliore l'expérience utilisateur.

5.4.1 Simplification

Les données des trois modèles m'ont été transmis par des bureaux d'architecture partenaires du projet Ronquoz 21. Le modèle du bâtiment *Swiss Innovation Park* contenait beaucoup trop de détails pour une visualisation en AR. Afin d'obtenir un fichier léger, il a été simplifié en gardant uniquement le gabarit externe de l'ouvrage avec un minimum de triangle possible. Concernant les deux autres modèles (cf. figures 3.5 et 3.4), ils proviennent d'un autre bureau d'architecture, mais d'un unique fichier. Ce fichier représente une scène virtuelle du futur Parc des Câbles. La télécabine et le mobilier urbain ont été isolés de cette scène, puis simplifiés.

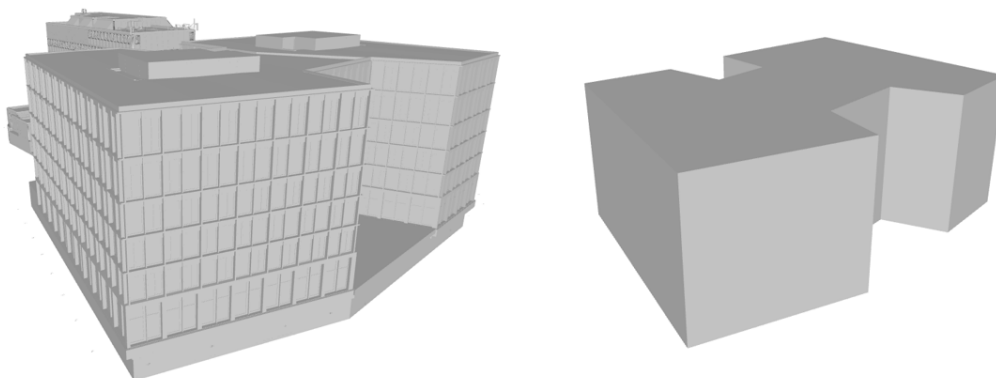


FIGURE 5.8 – Modèles 3D du *Swiss Innovation Park* avant et après simplification.

5.4.2 Géoréférencement

Les modèles au format glb sont géoréférencés à l'aide d'un point d'ancrage qui est défini lors de l'import dans l'application AR (cf. section 5.3). L'import du *mesh* se fait avec LocAR.js : `add(mesh, lon, lat, h)`. Le rendu de la scène sur l'écran de l'utilisateur sera ensuite calculé en fonction de la position du point d'ancrage et la position GPS du smartphone. Le point d'ancrage doit donc être donnée en coordonnées ellipsoïdales WGS84, afin que cela corresponde avec le positionnement du smartphone. Le point d'ancrage correspond à la position de l'origine (0,0) du modèle. Par exemple, si le centroïde est l'origine du modèle, le centroïde sera placé aux coordonnées ellipsoïdales définies lors de l'import du modèle. (cf. figure 5.9)

L'altimétrie connaît une gestion tout autre. En effet, la planimétrie du modèle est donnée de manière absolue lors de l'import, tandis que l'altimétrie renseignée est relative à la position du smartphone. Lors de la visualisation, le plan de référence, qui correspond à l'altitude 0 de la scène, est placé à l'altitude du smartphone. Pour résumer, la position du smartphone détermine la hauteur du plan de référence altimétrique. C'est-à-dire que si le smartphone bouge de haut en bas, la scène suivra. En résumé, le h donnée lors de l'import du modèle correspond à la hauteur relative par rapport au plan de référence. Dans le contexte de ce projet, le point d'ancrage a été placé au niveau du sol des modèles et sa hauteur h a été fixée à -1.6 m lors de l'import. Cette hauteur correspond à une estimation de la hauteur moyenne d'un smartphone tenu en main par un utilisateur debout. (cf. figure 5.9)

Comme mentionné précédemment dans le chapitre 5.2, le logiciel utilisé pour la visualisation et la gestion du point d'ancrage des modèles 3D est Blender. Il permet aussi de représenter l'orientation de celui-ci. Aucune modification n'a été nécessaire sur les projets reçus, mais il est important de savoir que l'axe Y de Blender correspond au nord réel. Une mauvaise orientation du modèle pourrait complètement fausser le rendu, et donc l'expérience.

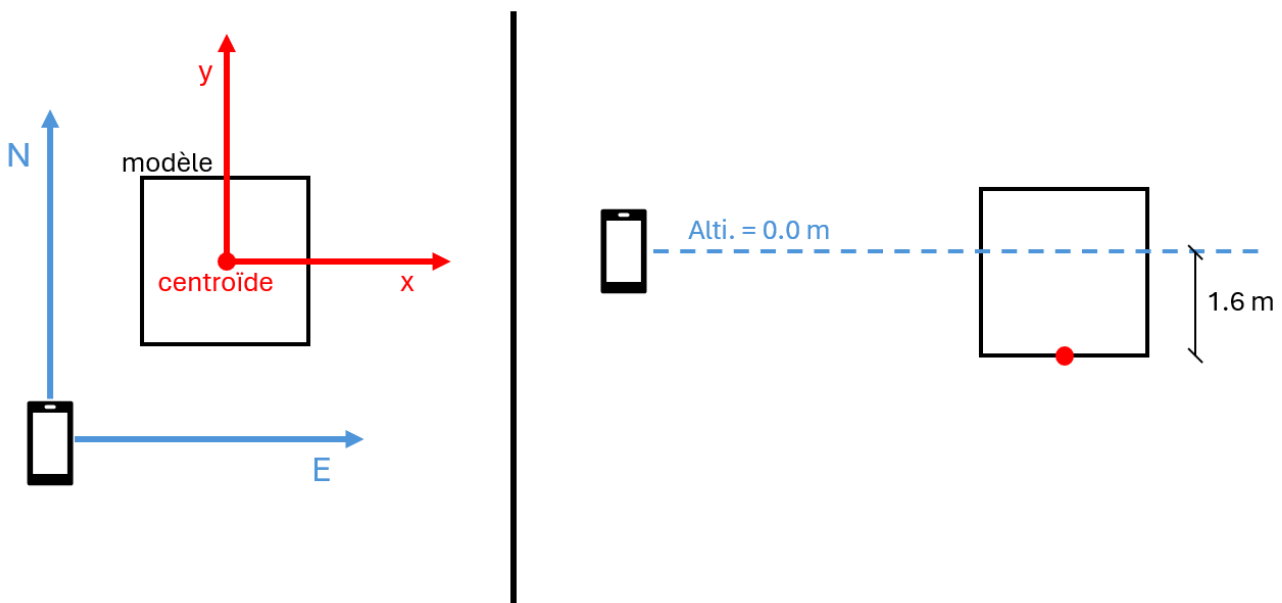


FIGURE 5.9 – Schéma explicatif du géoréférencement d'un modèle 3D, avec à gauche une vue en situation et de profil à droite.

5.5 Méthodes de validation

Pour évaluer la qualité et l'efficacité de l'application développée, plusieurs méthodes de validation ont été mises en place. Ces méthodes visent à recueillir des données quantitatives et qualitatives des performances du système, ainsi que sur l'expérience utilisateur. Elles incluent un questionnaire présenté après chaque utilisation, ainsi que des données récoltées lors de celles-ci, qui permettront d'évaluer la qualité de l'application et de la méthode proposée.

5.5.1 Évaluation du prototype

L'évaluation de la qualité de l'application s'est basée sur plusieurs sources de données, comme décrit dans l'introduction de cette section. La première source est un questionnaire en ligne. Une fois l'expérience terminée, chaque participant en a complété un. Celui-ci est divisé en plusieurs sections. La première partie recueille des informations démographiques de base : l'âge, le sexe et le niveau d'expérience avec la technologie mobile et la réalité augmentée. La seconde partie évalue l'utilisabilité du système à travers un questionnaire de type SUS (*System Usability Scale*) (WIKIPEDIA, 2025b). La troisième partie se concentre sur l'aspect visuel et le ressenti lors de l'expérience. Chaque utilisateur évalue l'intégration du modèle 3D dans son environnement ou le niveau de contrainte de la phase de calibration. Enfin, une section ouverte permet aux participants de fournir des commentaires supplémentaires et des suggestions d'amélioration.

La seconde source est une base de données chargée d'enregistrer les différentes interactions de l'utilisateur avec l'application, ainsi qu'un *timestamp* pour chaque action permettant une évaluation temporelle. Les éléments enregistrés sont :

- Le lancement de l'application ;
- Le résultat des mesures sur chaque point lors de la calibration ;
- Les paramètres de transformation calculés ;
- Les boutons appuyés par l'utilisateur ;
- L'arrêt de la session ;
- Un condensé en json du *tracking* GPS.

Ce *tracking* GPS a également été mis en place pour enregistrer la position de l'utilisateur en appelant la fonction *getPosition()* chaque cinq secondes. Ces données de positionnement permettent d'évaluer la précision du positionnement durant l'expérience, la trajectoire suivie par l'utilisateur, ...

Les données calculées à l'aide du tracking sont les suivantes (cf. figure 6.8) :

- La distance totale parcourue durant l'expérience ;
- L'emplacement de point d'arrêt ;
- Le temps passé sur l'application.

5.5.2 Enregistrement du suivi de l'utilisation

Afin de récolter les données d'utilisation de l'application, un système de *tracking* a été développé en langage python et javascript. Ce système permet de créer une base de données SQLite, si celle-ci n'existe pas, et de poster des enregistrements dans une table dédiée. Chaque enregistrement correspond à une action de l'utilisateur, accompagnée d'un *timestamp*. Les actions

sont des interactions avec l'interface, par exemple appuyer sur un bouton.

Le script python est hébergé sur le même serveur que l'application web. Celui-ci est lancé en arrière-plan et écoute, sur un port dédié, les requêtes entrantes. Les requêtes sont envoyées et formatées par la fonction JS `logEvent()`. Cette fonction est appelée à chaque action mentionnée précédemment. Elle envoie une requête POST au script python avec les informations de l'action à enregistrer. Le script traite la requête et insère un nouvel enregistrement dans la base de données SQLite.

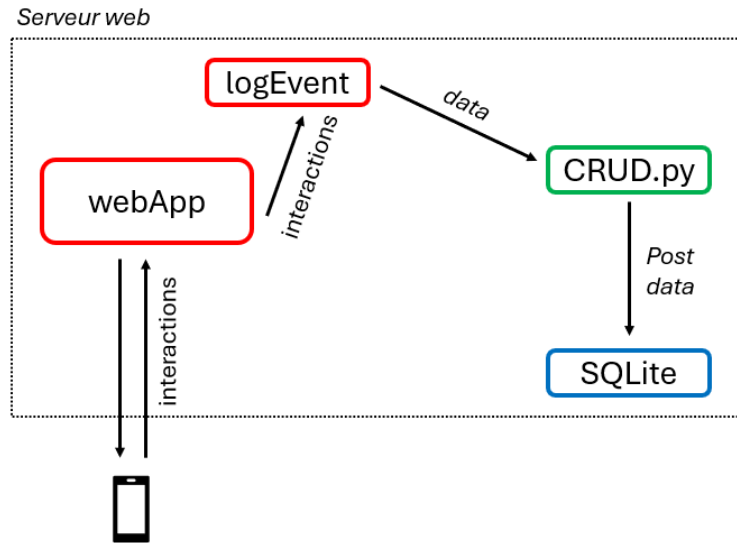


FIGURE 5.10 – Fonctionnement schématique de l'enregistrement des données d'utilisation.

Chapitre 6

Synthèse des résultats

Ce chapitre présente les résultats du questionnaire présenté aux utilisateurs ayant testé le prototype de l'application. Le questionnaire était séparé en trois parties distinctes qui ont toutes un objectif différent. Tous les résultats du questionnaire sont consultables dans les annexes de ce document.

6.1 Présentation du processus de tests

6.1.1 Sélection des participants

Les participants ont été recrutés par différents biais. La plupart d'entre eux viennent du milieu de la géomatique, de l'architecture ou de l'urbanisme. Certains sont des collègues de travail, d'autres des étudiants en géomatique. Un appel à participation a également été lancé dans mon entourage familial et amical pour diversifier les profils. Ce projet vise la création d'un prototype accessible au plus grand nombre. La diversité des profils est donc importante pour évaluer cet objectif. L'expérience a rassemblé 30 personnes.

6.1.2 Procédure des tests

Le test d'utilisateur est une étape essentielle pour évaluer le prototype développé et recueillir le retour des utilisateurs sur l'utilisation de la réalité augmentée dans un contexte de projet urbain. Comme présenté dans la section 2.6, il existe des contraintes d'accessibilité aux différents capteurs des smartphones lors d'une application web. Pour cadrer l'environnement des tests, ceux-ci se sont déroulés sur mon smartphone personnel, un iPhone 14 et le navigateur Brave. Un encadrant était donc présent avec chaque participant pour toute la durée de l'expérience afin de les guider, répondre à leurs questions, noter leurs différentes remarques. Celles-ci ont été prises en compte dans l'évaluation finale.

Chaque participant a été invité à se rendre à proximité de la zone du test. Après une brève introduction sur la nature de leur présence, les objectifs du test et le déroulement de celui-ci, ils étaient libres d'utiliser l'application web. Lors de l'introduction, une instruction importante

concernant l'évaluation du prototype a été donnée. Il leur a été explicitement demandé d'évaluer le prototype tel qu'il était présenté, sans interprétation ni projection sur un projet qui pourrait être réalisé ultérieurement.

6.2 Retours des utilisateurs

6.2.1 Questionnaire

Profil des utilisateurs

Comme présenté dans la section 5.5.1, le questionnaire commençait par des questions visant à établir le profil de l'utilisateur. Les profils recueillis se révèlent globalement proches du mien. Bien que l'objectif ait été de constituer un échantillon diversifié, une catégorie apparaît néanmoins surreprésentée, à savoir l'âge des participants. Ce constat doit toutefois être nuancé, dans la mesure où l'âge déclaré correspond à des classes d'âge relativement larges.

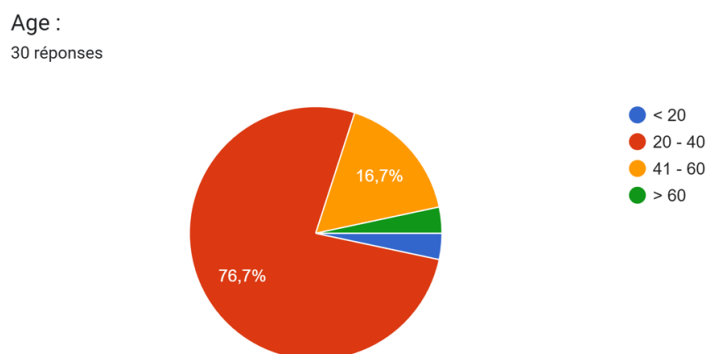


FIGURE 6.1 – Répartition de l'âge des participants.

À l'inverse, le niveau de formation des participants apparaît relativement homogène, avec une sous-représentation des personnes ne disposant pas d'un diplôme de niveau secondaire ou tertiaire. Cette distribution peut s'expliquer en partie par l'âge des participants, majoritairement supérieur à vingt ans. En Suisse, la grande majorité des adultes de plus de vingt ans (environ 85%) est en effet titulaire d'au moins un diplôme du degré secondaire. Cette proportion diminue toutefois au sein des générations plus anciennes (OFS, 2025). Dans ce contexte, les personnes sans formation post-obligatoire apparaissent comme insuffisamment représentées dans l'échantillon, ce qui limite la portée des résultats pour cette catégorie de population.

Niveau de formation :
30 réponses

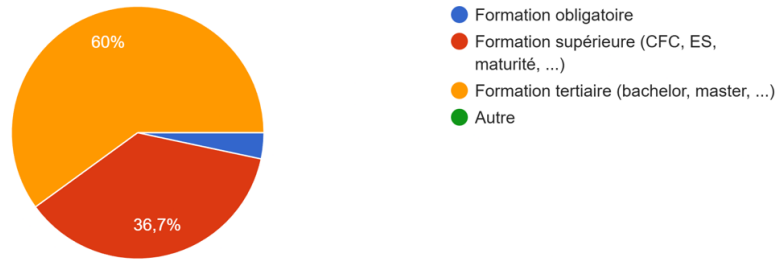


FIGURE 6.2 – Répartition du niveau de formation des participants.

Concernant la fréquence d'utilisation de la 3D, les différentes catégories de répondants sont bien représentées. Cette dimension est particulièrement importante, car, comme mentionné dans l'introduction, ce prototype s'adresse à un public large et vise à améliorer la compréhension spatiale des projets présentés. En effet, leur interprétation sous forme de plans peut s'avérer complexe pour certains individus. À ce titre, l'étude menée par T. Chassin montre que 20% des personnes interrogées présentent de faibles capacités de représentation spatiale (CHASSIN et al., 2022). Une répartition relativement homogène des profils permet de prendre en compte à la fois des utilisateurs initiés et des novices en matière de 3D. Les réponses sur le contexte d'utilisation sont aussi bien réparties.

Fréquence d'utilisation de la 3D :
30 réponses

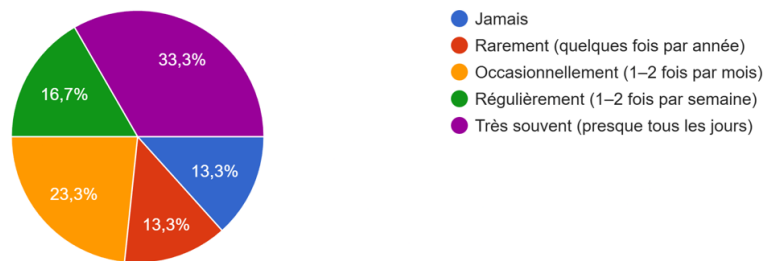


FIGURE 6.3 – Répartition de la fréquence d'utilisation de la 3D entre les participants.

Évaluation du système (SUS)

L'évaluation du système a été menée à travers un questionnaire de type SUS (*System Usability Scale*). Il permet en dix questions tournées positivement ou négativement de noter un système. Chacune des questions est notée entre 1 et 5, 1 étant synonyme de désaccord total et 5 d'accord total. La note finale est calculée avec une méthode différente entre les questions positives et les négatives. La moyenne de toutes les évaluations permet de qualifier l'acceptabilité générale du système. (WIKIPEDIA, 2025b)

Le système a été évalué avec une note moyenne de 76.7, ce qui, d'après l'étude de Bangor, Kortum et Miller BANGOR et al., 2008, est acceptable et serait qualifié entre "bon" et "excellent". En regardant la répartition des résultats, on remarque aisément que les utilisateurs sont satisfaits du système, avec une majorité de notes plus élevée que 70.5.

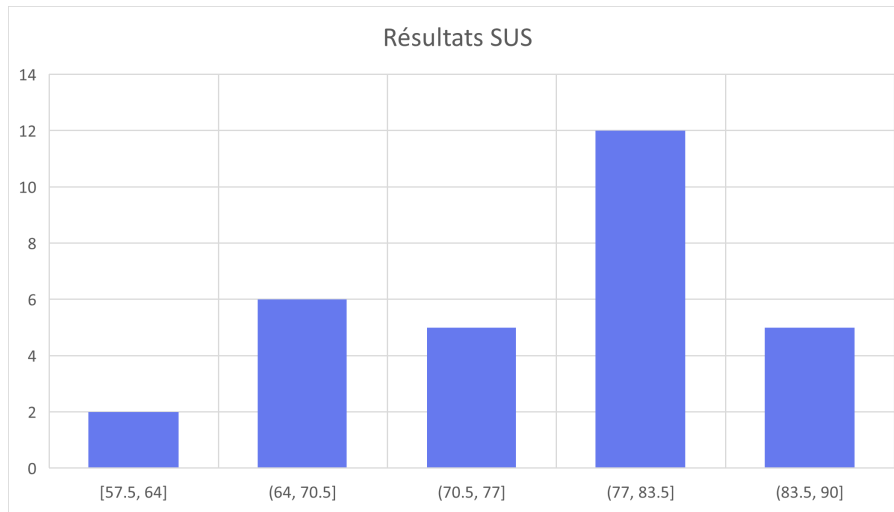


FIGURE 6.4 – Histogramme des résultats de l'évaluation du système selon un questionnaire SUS.

La majorité des réponses à cette partie du questionnaire présentent des tendances relativement similaires entre les participants. Des pics de réponses se dégagent, traduisant l'existence de consensus parmi les sondés. La première question se distingue par une concentration des réponses autour de la valeur 3, correspondant à la note médiane. Dans ce contexte, la dispersion des réponses sur l'ensemble des modalités rend difficile l'établissement de conclusions claires en l'absence de données complémentaires.

Je pense que je vais utiliser ce système fréquemment.
30 réponses

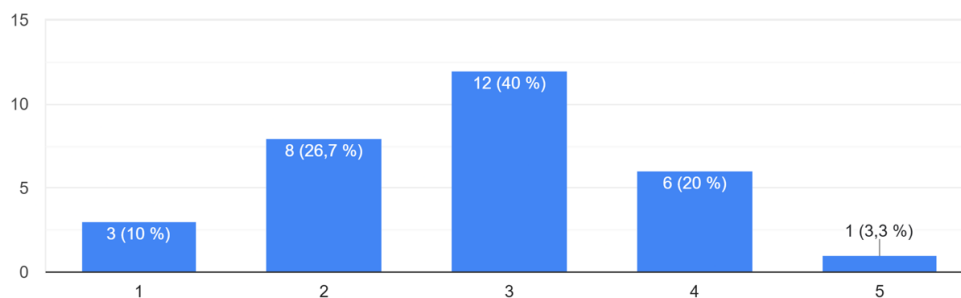


FIGURE 6.5 – Résultats de la première question du SUS.

Évaluation de l'expérience

La dernière section de question portait sur l'expérience et le ressenti de l'utilisateur. Ces informations sont importantes pour évaluer plus précisément certains aspects de la visualisation et

du prototype. Il a été demandé de noter entre un et cinq une affirmation. Tout comme pour le SUS, la note de 1 était synonyme de désaccord total et 5 d'accord total.

Sur les cinq questions posées, il y en a deux qui ressortent avec une majorité bien définie dans les réponses. Il s'agit de la deuxième question qui affirme que la méthode présentée permet une bonne compréhension du projet et de la cinquième question demandant si la personne seraient susceptibles d'utiliser ce type de visualisation pour d'autres projets si celle-ci était disponible. La majorité des personnes ont noté entre 4 et 5.

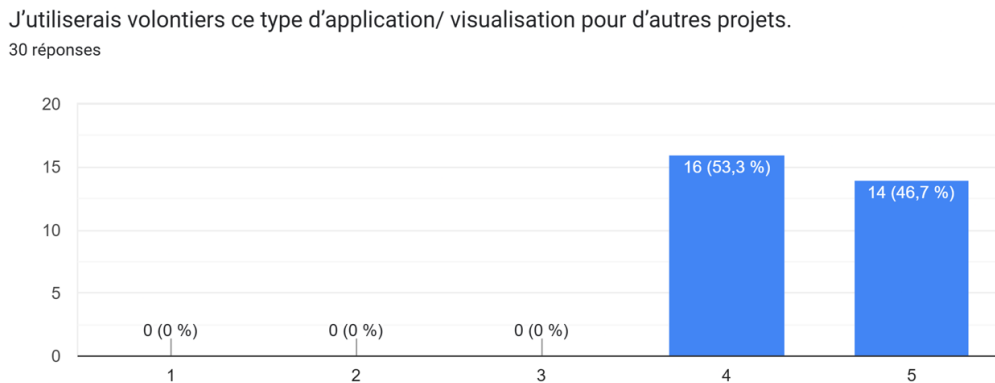


FIGURE 6.6 – Résultats de la cinquième question de l'évaluation de l'expérience.

Les trois autres questions présentent des résultats bien moins homogènes. Le meilleur exemple pour illustrer cela est la quatrième question. Elle affirme que la phase de calibration représente une contrainte importante pour l'utilisation de l'application. Avec 18 personnes ayant noté entre 1 et 2, et 12 entre 3 et 5, il est difficile de tirer une conclusion claire de ces réponses. La phase de calibration évoquée est mentionnée dans de nombreux retours oraux et écrits. Ceux-ci démontrent que des améliorations sont possibles et serait souhaitables. Néanmoins, pour certaines personnes, elle ne représente aucune contrainte importante.

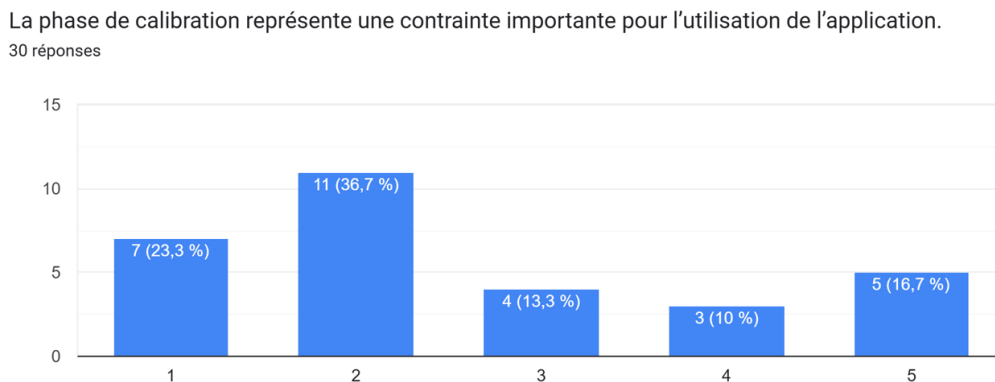


FIGURE 6.7 – Résultats de la question sur la contrainte que représente la phase de calibration.

6.2.2 Retours oraux, écrits et comportementaux

Cette sous-section présente la tendance des retours reçus. Pour rappel, l'ensemble de ces retours sont disponibles dans les annexes de ce rapport.

Les commentaires écrits et oraux sont sensiblement les mêmes. Un encadrant était présent lors des tests ce qui a facilité l'interaction directe et les utilisateurs commentaient spontanément l'expérience. Plusieurs éléments ressortent nettement.

La première concerne la phase de calibration. Le processus dans sa globalité manquait de clarté. Sans les instructions de l'encadrant, des erreurs auraient été commises. L'imprécision des flèches censées mener aux points fixes compliquait la tâche. Cette méthode de navigation a également été remise en question par plusieurs personnes. Selon certains retours, l'utilisation de l'AR pour cette étape n'est pas la meilleure solution.

Le rendu de la scène a aussi été remis en question. Selon la plupart des utilisateurs, la profondeur est difficile à apprécier, ainsi que la position en 3D des objets. Cette difficulté peut donner un résultat trompeur. L'imprécision de la géolocalisation absolue du smartphone a également impacté la qualité de l'expérience.

L'apparence du bâtiment connaît quelques retours négatifs. En effet, certaines personnes mentionnent la difficulté de discerner la forme du modèle. Les arêtes ne sont pas assez visibles par rapport aux façades. Toutes ces remarques rendent l'expérience trop approximative selon certains.

Mais il n'y a pas eu que des remarques négatives. Toutes les personnes ont validé l'idée du projet. Lorsque le GPS du smartphone est stable, l'immersion est plutôt bonne. Les utilisateurs se déplacent volontiers dans la scène pour varier les points de vue et bien comprendre le projet (cf. figure 6.8). La visualisation de la liaison câblée a particulièrement bien été reçue par les participants. Les grands ronds sur la figure ci-dessous représentent les arrêts enregistrés durant l'expérience. En remarque qu'ils sont le plus fréquent à deux emplacements, dont une zone proche du passage de la télécabine. Il a été relevé que l'AR permet une meilleure compréhension du projet et de son impact qu'une vue en 2D sur un plan.

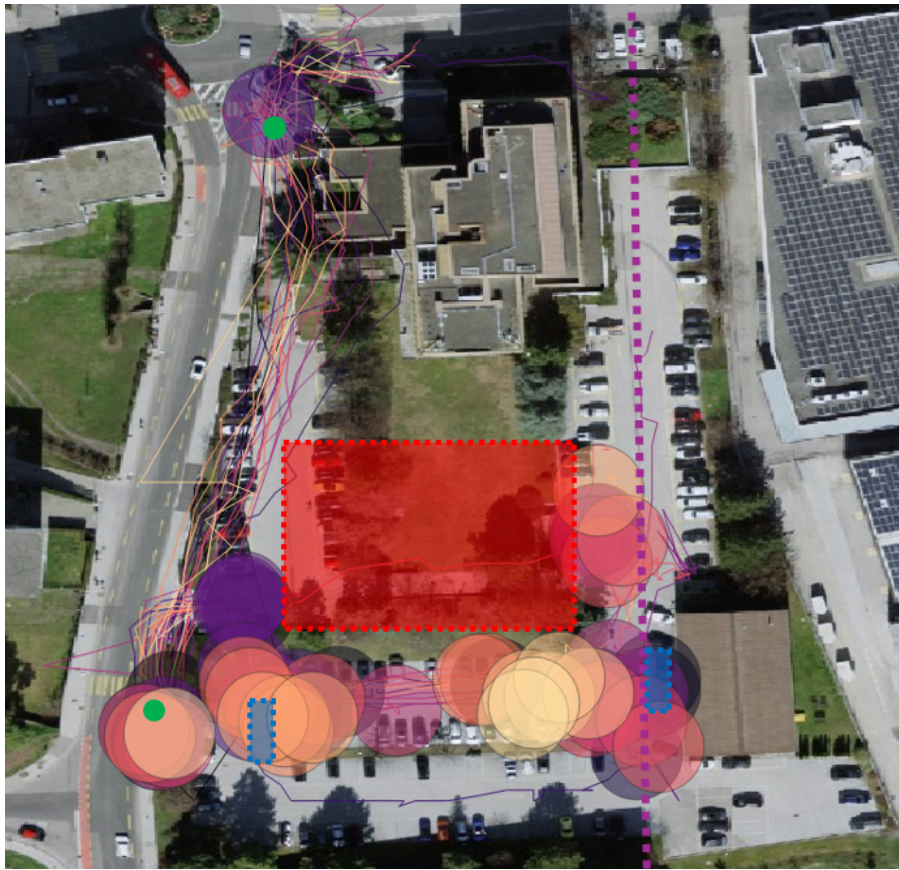


FIGURE 6.8 – Situation avec les itinéraires empruntés durant les différents tests, ainsi que les éventuels arrêts. Il y a également l'emplacement approximatif des points de référence (vert), le bâtiment (rouge), le mobilier urbain (bleu) et la liaison câblée (mauve).

La sobriété de l'interface a été positivement reçue. Une fois la calibration terminée, la visualisation est très simple et accessible.

Le comportement observé chez les participants durant l'expérience traduit une approche majoritairement ludique de l'activité. Les utilisateurs ont manifesté un enthousiasme perceptible et un intérêt marqué pour le dispositif, se traduisant notamment par une recherche active d'interaction avec la visualisation. Cette attitude s'est exprimée par des déplacements volontaires autour de la scène, des tentatives répétées de changement de point de vue et une exploration attentive des éléments virtuels intégrés à l'environnement réel. Ces comportements suggèrent un engagement positif des utilisateurs et confirment l'attractivité du dispositif dans le cadre de l'expérience menée.



FIGURE 6.9 – Un utilisateur durant le test.

6.3 Performances techniques

Les performances techniques sont représentées par la précision de la géolocalisation du smartphone. Comme indiqué précédemment, des données de tracking ont été enregistrées pour chaque session à un intervalle de cinq secondes. Malheureusement, quelques sessions n'ont pas de tracking enregistrés. Une erreur de serveur a empêché le suivi de sept sessions. En plus des coordonnées WGS84, Capacitor permet de récupérer la précision du positionnement GPS donnée par le smartphone. La précision planimétrique a été conservée pour chaque position est rangée dans l'histogramme ci-dessous.

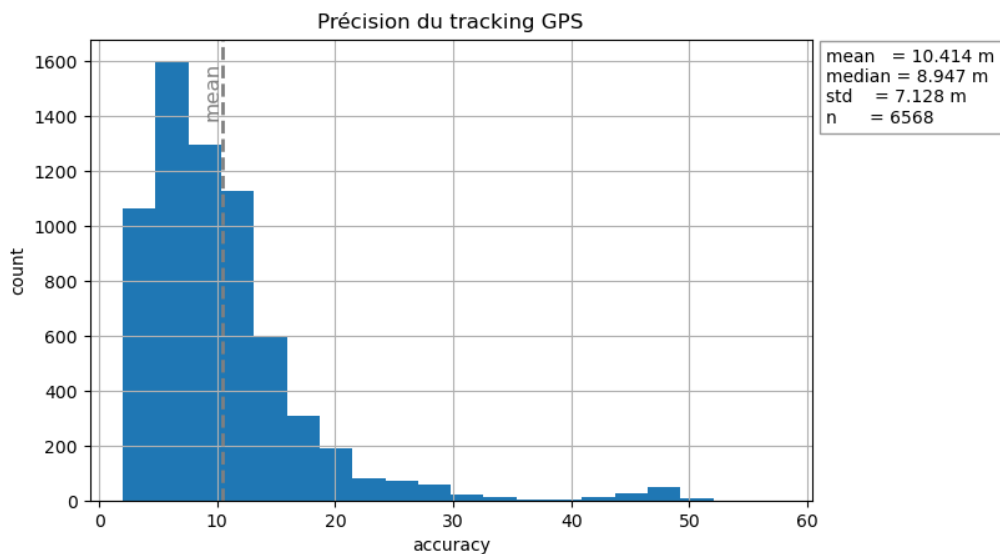


FIGURE 6.10 – Histogramme de la précision de la géolocalisation du smartphone.

Cette valeur de précision est une estimation calculée par le *hardware* de l'appareil. Cette information est intéressante, mais son origine étant trop incertaine, ne permet pas de tirer des conclusions. Pour qualifier la précision de la localisation, une distance a été mesurée entre le point connu et les mesures faites durant la phase de calibration. Cette distance et une moyenne des mesures réalisée par point et par session. Le résultat vient de la formule d'Haversine, comme mentionné dans la section 5.3.

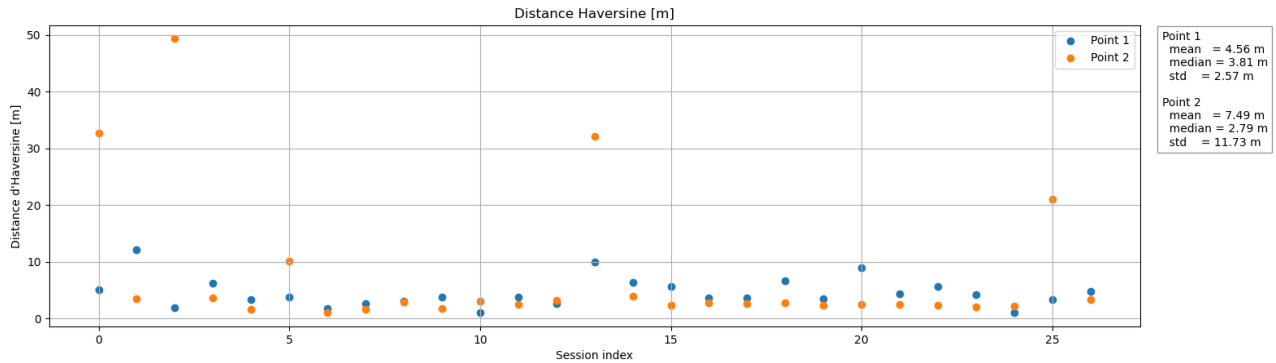


FIGURE 6.11 – Écarts planimétriques mesurés durant la phase de calibration.

L'altimétrie a aussi été enregistrée durant la calibration. Non pas la précision, mais la moyenne des mesures faites sur chaque point fixe. En les illustrant sur un graphique, il est possible de comparer les différents résultats et de se rendre compte de la dispersion des mesures verticales.

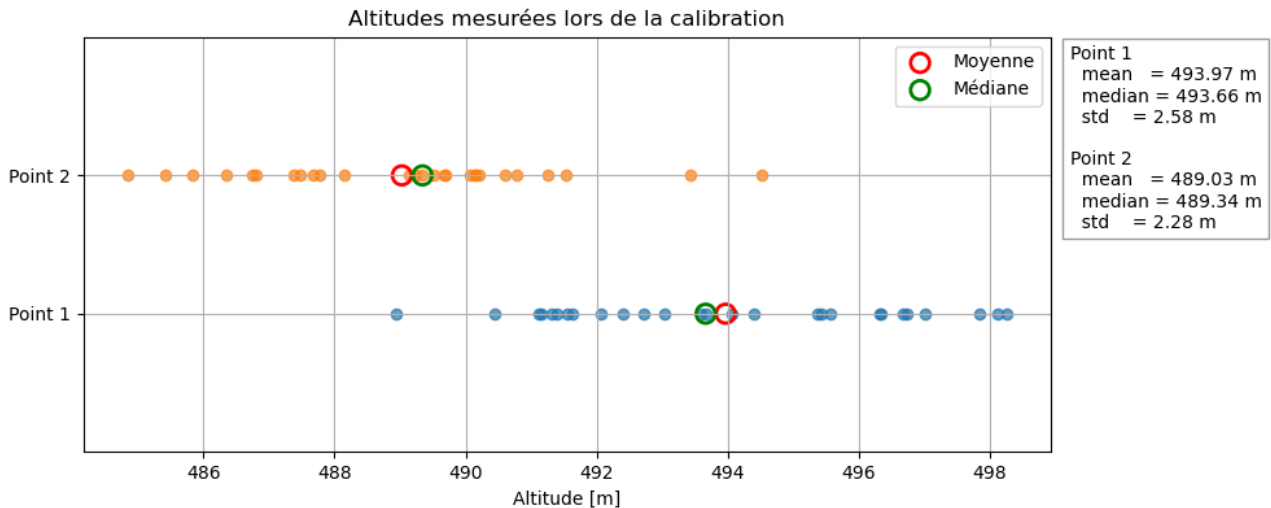


FIGURE 6.12 – Moyenne altimétrique par session et par point fixe durant la calibration.

Chapitre 7

Discussion

Le chapitre 4.2 a permis de formuler un ensemble d'hypothèses relatives au comportement du système étudié. Les données collectées lors des phases de test rendent possible une vérification empirique de ces hypothèses. Ce chapitre présente les analyses effectuées, en discute la portée et propose une interprétation des résultats obtenus.

Tous les résultats du questionnaire sont consultables dans les annexes de ce document.

7.1 Analyse des résultats

Afin de chiffrer la corrélation entre plusieurs réponses, la méthode statistique de Spearman a été utilisée (NUMIQO, 2026). Cette corrélation de rang examine la relation entre deux variables, qui seront plusieurs réponses aux questions. La corrélation de Spearman est souvent utilisée dans le but d'évaluer les relations comprenant des variables ordinales, c'est-à-dire des variables dont les modalités peuvent être ordonnées, sans supposer une relation linéaire ni des intervalles réguliers entre les valeurs. Plus la valeur du coefficient de Spearman (ρ) est proche de 1 ou -1 , plus la corrélation sera forte. Une valeur négative signifie une relation négative entre les deux variables, tandis qu'une valeur positive indique une relation positive. Le tableau ci-dessous donne une lecture de la valeur de corrélation :

Valeur de ρ	Force de la corrélation
$0.0 < \rho < 0.1$	Absence de corrélation
$0.1 \leq \rho < 0.3$	Corrélation faible
$0.3 \leq \rho < 0.5$	Corrélation modérée
$0.5 \leq \rho < 0.7$	Corrélation élevée
$0.7 \leq \rho \leq 1.0$	Corrélation très élevée

TABLEAU 7.1 – Interprétation de la force de la corrélation selon le coefficient de Spearman

Un second indicateur est calculable avec ρ . Il s'agit du test de significativité des coefficients de corrélation (*p-value*). Ce nombre permet de tester si le coefficient de corrélation est signi-

ficativement différent de zéro sur la base de l'échantillon collecté. Une valeur faible démontre une bonne significativité statistique du résultat, tandis qu'une valeur élevée (>0.05) démontre une faible significativité. Il est important de mentionner que la taille de l'échantillon influence ce résultat. Dans le cas de cette étude, l'échantillon de trente personnes donnera une valeur souvent élevée de la *p-value*. De ce fait, les résultats sont interprétés de manière exploratoire.

7.1.1 H1 - Le profil d'utilisateur a une influence sur l'utilisation et l'utilisabilité de l'application.

H1.1 - Le profil de l'utilisateur n'influence pas l'utilisabilité.

Pour vérifier cette sous-hypothèse, il est nécessaire de comparer les données du profil de l'utilisateur, ainsi que le résultat du SUS. Toutes ces informations proviennent du questionnaire donné après le test.

Concernant l'âge des participants, il est difficile d'obtenir un résultat valable. 77% des testeurs ont entre 20 et 40 ans. Cela représente une trop grande majorité, ce qui ne permet pas d'évaluer l'effet de l'âge de l'utilisateur sur l'utilisabilité. De ce fait, ces données ne seront pas appliquées durant ces évaluations.

En revanche, La question sur le niveau de formation présente un résultat plus avantageux pour une évaluation. En effet, 60% des sondés sont issus d'une formation tertiaire, 30% d'une formation supérieur tandis que 3.3% de la formation obligatoire. Les résultats de l'analyse de Spearman suggèrent une tendance négative faible entre le niveau de formation et le score SUS, indiquant que des niveaux de formation plus élevés pourraient être associés à des évaluations légèrement plus critiques. Néanmoins, cette relation n'est pas statistiquement significative ($\rho = -0.20$, *p-value* = 0.28) et doit être interprétée avec prudence.

L'évaluation de la fréquence d'utilisation de la 3D avec le SUS est également très intéressante. Les réponses sont extrêmement variées avec une bonne homogénéité (cf. graphiques en annexe). Au niveau statistique, les résultats ne suggèrent aucune corrélation entre ces deux paramètres, mais une relation non-significative ($\rho = 0.04$, *p-value* = 0.84).

Le contexte d'utilisation n'a également aucune influence et une significativité très faible avec un résultat statistique de ($\rho = 0.11$, *p-value* = 0.57).

Les commentaires oraux et écrits viennent confirmer cette hypothèse. Les quelques remarques portant sur le prototype et son interface dépendent de la sensibilité et de l'expérience de chacun. Un architecte aura d'autres attentes qu'un employé de commerce ou un étudiant. Elles ne se limitent pas au niveau de formation ou à l'âge, par exemple.

En conclusion, le profil de l'utilisateur ne semble pas avoir influencé le score SUS, et donc l'utilisabilité du système.

Variables de profil	ρ	<i>p-value</i>
Niveau de formation	-0.20	0.28
Fréquence d'usage de la 3D	0.04	0.84
Contexte d'utilisation	0.11	0.57

TABLEAU 7.2 – Résultats de l'analyse de Spearman entre les indicateurs du profil et l'utilisabilité.

H1.2 - Le profil de l'utilisateur influence l'utilisation.

La manière de décrire le profil est connu. L'utilisation est définie par la durée de l'utilisation, la distance parcourue et les arrêts enregistrés durant l'expérience. Ces deux paramètres sont calculés à partir du *tracking*.

Tout d'abord, l'impact de différents paramètres du profil sur la durée est analysée.

L'analyse de Spearman entre le niveau de formation et la durée semble montrer une corrélation négative faible, avec un $\rho = -0.21$. Une interprétation de ce résultat est que les personnes plus formées utilisent moins longtemps ce système. Cependant, la valeur de *p-value* montre que cette association n'est pas statistiquement significative, car elle est égal à 0.30. De ce fait, on ne peut pas conclure que le niveau de formation influence la durée d'utilisation.

Une analyse croisée entre la durée d'utilisation et la fréquence d'utilisation de la 3D démontre une corrélation presque nulle, avec $\rho = -0.06$. Il n'y aurait vraisemblablement pas de lien de corrélation entre ces deux paramètres. Cette association n'est pas statistiquement significative, car *p-value* = 0.76.

Les dernières réponses liées au profil étudiées avec la durée sont celles du contexte d'utilisation de la 3D. l'analyse de Spearman démontre une corrélation proche de zéro et un résultat fortement attribuable au hasard ($\rho = -0.06$, *p-value* = 0.78).

Variables de profil	ρ	<i>p-value</i>
Niveau de formation	-0.21	0.30
Fréquence d'usage de la 3D	-0.06	0.76
Contexte d'utilisation	-0.06	0.78

TABLEAU 7.3 – Résultats de l'analyse de Spearman entre les indicateurs du profil et l'utilisabilité.

Les analyses statistiques entre les réponses du profil et la distance parcourue suivent le même procédé qu'avec la durée d'utilisation. Afin d'éviter une trop forte redondance, les résultats sont présents dans le tableau ci-dessous. Le seul résultat statistiquement significatif et l'association niveau de formation et la distance parcourue. La corrélation est négative et modérée, ce qui indique que les utilisateurs disposant d'un niveau de formation plus élevé tendent à parcourir des distances moindres.

Variables de profil	ρ	<i>p-value</i>
Niveau de formation	-0.46	0.03
Fréquence d'usage de la 3D	-0.03	0.89
Contexte d'utilisation	-0.29	0.18

TABLEAU 7.4 – Résultats de l'analyse de Spearman entre les indicateurs du profil et la distance parcourue.

Les données du *tracking* ont permise de déterminer le nombre d'arrêts réalisé par session, ainsi que leur durée totale. Ces données ont été analysées avec le profil des utilisateurs. Les résultats de l'analyse de Spearman sont représentés dans le tableau ci-dessous. Aucune corrélation n'a été détectée et ces résultats ne semble pas être statistiquement significatif.

Variables de profil	Temps total des arrêts	Nombre d'arrêts
Niveau de formation	$\rho = 0.08, p = 0.71$	$\rho = 0.08, p = 0.68$
Fréquence d'usage de la 3D	$\rho = 0.06, p = 0.76$	$\rho = 0.07, p = 0.75$
Contexte d'utilisation	$\rho = 0.04, p = 0.86$	$\rho = -0.04, p = 0.85$

TABLEAU 7.5 – Résultats de l'analyse de Spearman entre les indicateurs du profil et les arrêts.

Conclusions

Parmi les variables caractérisant le profil des participants, le niveau de formation est celui avec la corrélation la plus élevée dans l'ensemble de ces trois analyses réalisées. Toutefois, seule l'association avec la distance parcourue se trouve être statistiquement significative.

Ces résultats issus des données du *tracking* doivent néanmoins être interprétés avec prudence. Ils dépendent directement de la qualité du géoréférencement fourni par le smartphone. Bien qu'un tri ait été réalisé au préalable, ces données restent entachées par une imprécision pouvant dépasser le mètre.

7.1.2 H2 - L'AR améliore la compréhension du projet.

H2.1 - Le profil de l'utilisateur n'influence pas la compréhension.

Pour évaluer cette affirmation, les données sur le profil, ainsi que la réponse à la deuxième question basée sur l'expérience, sont utilisées.

Le niveau de formation est le premier élément évalué. Statistiquement, les résultats suggèrent une corrélation quasi nulle et une relation qui n'est pas statistiquement significative ($\rho = -0.09$, *p-value* = 0.62).

Les conclusions pour l'évaluation de la fréquence d'utilisation de la 3D sont similaires, avec une corrélation quasi nulle et une relation qui n'est pas statistiquement significative ($\rho = 0.02$, *p-value* = 0.94).

Le contexte d'utilisation des technologies 3D donne un résultat semblable, avec $\rho = -0.04$ et $p\text{-value} = 0.82$.

En conclusion, le profil de l'utilisateur ne semble pas avoir d'influence sur la compréhension du projet urbain lors de la visualisation.

Variables de profil	ρ	$p\text{-value}$
Niveau de formation	-0.09	0.62
Fréquence d'usage de la 3D	0.02	0.84
Contexte d'utilisation	-0.04	0.82

TABLEAU 7.6 – Résultats de l'analyse de Spearman entre les indicateurs du profil et la compréhension du projet.

H2.2 - L'usage de l'AR permet une meilleure perception de l'insertion du projet dans son environnement.

La seconde sous-hypothèse, qui traite de la compréhension du projet, évalue l'utilisation de la réalité augmentée et l'insertion du projet dans son environnement. Uniquement les réponses à la troisième question de l'expérience sont utilisées. Aucune évaluation croisée est nécessaire.

Les avis sont mitigés avec un faible majorité pour la note de 4 (36.7%). Pour rappel, une note élevée indique un accord avec l'affirmation. À l'inverse, une note faible indique un désaccord. Les retours oraux permettent de mieux comprendre la nature de ces réponses.

En effet, l'intégration de la maquette dans l'environnement est principalement influencée par la texture, la stabilité de sa localisation et la capacité à estimer la position en 3D du futur ouvrage.

Concernant la texture du bâtiment, certains utilisateurs l'ont trouvée pas assez réelle, tandis que d'autres ont préféré un rendu "projet". Au-delà de la couleur des façades, une mise en évidence des arrêtes a été suggérée, permettant ainsi d'éventuellement améliorer la compréhension de la forme de la maquette. Ces commentaires ne concernaient ni la télécabine ni le mobilier urbain, exempt de toutes incompréhensions lié à l'apparence extérieure.

La stabilité de la localisation, quant à elle, était variable d'une session à une autre. La plupart des utilisateurs ont connu une bonne stabilité du modèle. Une bonne stabilité permet de vivre une expérience plus immersive et une meilleure compréhension du futur projet et de son intégration dans l'environnement.

Pour finir, la capacité de placer les maquettes dans l'espace était compliqué pour tout le monde. Aucunement à cause d'un niveau de formation ou d'une expérience trop faible, mais à cause d'une perception de la profondeur difficile. En effet, le rendu AR est donné sur un écran de smartphone en 2D. La notion de profondeur de la scène et le gabarit réel des projets visualisés était difficile à appréhender.

Pour résumer, les avis ont divergé pour ces trois points. Cela a influencé le résultat final. La majorité des personnes ont estimé qu'une note entre 3 et 4 était correcte. L'intégration de la maquette était donc moyenne, avec des améliorations possibles.

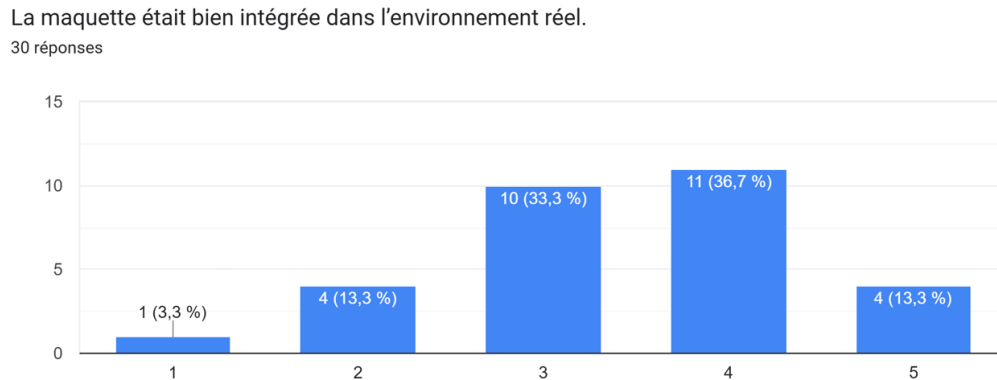


FIGURE 7.1 – Résultats de la troisième question qui porte sur l'évaluation de l'expérience.

Conclusions

La deuxième question sur l'expérience affirme que la méthode de visualisation testée permet une bonne compréhension du projet. Cette question permet d'ajouter des données supplémentaires sur la conclusion de cette hypothèse. Ses résultats sont très favorables, avec les résultats suivants : 5 – 30% ; 4 – 53.3% ; 3 – 16.7%.

En conclusion, la réalité augmentée semble avoir un effet positif sur la compréhension et l'intégration d'un projet urbain. Des améliorations sont toutefois envisageables pour obtenir une meilleure intégration de la maquette dans son environnement. L'ajout d'un algorithme de gestion de l'occlusion, comme mentionnée dans la section 2.7.2, pourrait améliorer cette intégration. Au niveau des résultats statistiques, ils ne reflètent pas une tendance générale, car la valeur des *p-value* est trop élevée ce qui rend les résultats trop impactés par le hasard.

7.1.3 H3 - La calibration est contraignante pour l'utilisateur.

H3.1 - La calibration a un impact négatif sur l'acceptabilité du système.

Cette première sous hypothèse évalue les résultats du SUS et de la question n°4 de l'expérience.

Au niveau des résultats de la question individuelle, les résultats sont répartis sur l'ensemble des réponses possibles, avec une majorité de réponses entre 1 et 2. Ceci indique que la calibration ne représente pas une contrainte importante pour l'utilisation, selon 60% des sondés. Afin d'évaluer la corrélation entre le SUS et cette question individuelle, une étude statistique a été réalisée à l'aide de la méthode décrite en introduction de ce chapitre est utilisée.

Les résultats démontrent une corrélation négative modérée à forte entre ces deux paramètres, car $\rho = -0.50$. Cela indique qu'un niveau de contrainte plus élevé tend à être associé à des

scores d'utilisabilité plus faibles. La *p-value* associée à ce coefficient est égal à 0.005, ce qui rend cette association statistiquement significative. Ces résultats sont cohérents avec les commentaires qualitatifs recueillis lors des tests, plusieurs participants ayant mentionné que la phase de calibration était perçue comme complexe et perfectible.

H3.2 - La calibration décourage la réutilisation potentielle.

Une analyse croisée entre la quatrième et la cinquième question de l'expérience est la méthode utilisée pour l'évaluer.

La quatrième question a déjà été traité dans la sous-hypothèse précédente.

Les résultats de la cinquième question sont homogènes et positifs. La totalité des personnes ont noté entre 4 et 5 leur réutilisation potentielle de ce système. Ceci fait écho aux commentaires récoltés, qui sont positifs quant à la méthode proposée.

Statistiquement, Un ρ égal à -0.26 indique qu'il existe une corrélation négative faible entre la réutilisation potentielle et la contrainte ressentie par la calibration. Une *p-value* égal à 0.159 indique que cette association n'est pas statistiquement significative.

Conclusions

Malgré des avis mitigés sur la contrainte ressentie par la phase de calibration, les résultats montre qu'elle a eu un impact plutôt négatif sur l'expérience des utilisateurs. L'analyse de Spearman démontre que le résultat du SUS est impactée négativement par cette calibration, contrairement à la réutilisation potentielle. Les commentaires, quant à eux, démontrent une perfectibilité certaine de cette étape.

En conclusion, la phase de calibration telle que présentée semble avoir eu un effet négatif sur l'expérience générale.

7.1.4 H4 - L'acceptabilité de la technologie est positive.

H4.1 - L'intention de réutilisation est liée à la compréhension perçue du projet.

Les réponses de la deuxième et de la cinquième question sur l'expérience nous permettent de l'étudier.

Les réponses à ces deux questions sont plutôt encourageantes et homogènes avec une majorité située entre 4 et 5. Statistiquement, la corrélation positive est considérée comme faible avec $\rho = 0.19$. Quant à la *p-value*, sa valeur de 0.320 nous dit que cette association n'est pas statistiquement significative. D'après ces résultats, l'intention de réutilisation n'est que peu impacté par la compréhension du projet.

H4.2 - La familiarité avec les technologies 3D n'influence pas l'acceptabilité de la méthode proposée.

Les réponses de la fréquence d'utilisation de la 3D, ainsi que les résultats du SUS permettent d'évaluer sa concordance.

L'analyse statistique indique une corrélation pratiquement nulle, avec $\rho = -0.04$ et que cette association n'est statistiquement pas significative, car $p\text{-value} = 0.838$. La familiarité avec la 3D ne semble pas affecter l'acceptabilité de la méthode.

H4.3 - Une intégration perçue comme bonne du modèle dans l'environnement réel n'influence pas l'acceptabilité de la méthode.

La question numéro 3 sur l'expérience, ainsi que les réponses au SUS sont utilisées pour cette sous-hypothèse.

Comme décrit dans la sous-hypothèse 2.2, les réponses sont très hétérogènes pour cette question. Statistiquement, la corrélation entre ces deux questions est quasiment nulle, tandis que l'association n'est pas statistiquement significative. Le résultat est le suivant : $\rho = 0.08$; $p\text{-value} = 0.678$. Ceci semble indiquer que la qualité de l'intégration du modèle dans l'environnement réel n'a pas impacté l'acceptabilité de la méthode.

H4.4 - Une distance parcourue plus importante est associée à une acceptabilité accrue de l'utilisateur.

Pour l'évaluation, les données du tracking ont permis de calculer une distance parcourue pour les sessions. Malheureusement, suite à quelques erreurs de serveur, seules 23 sessions ont un tracking qui a fonctionné. Ces distances sont étudiées avec le score SUS.

Ces distances parcourues varient sensiblement d'un utilisateur à l'autre. La distance minimale parcourue est d'environ 150 mètres, tandis que la plus grande atteint presque 500 mètres. Ceci peut s'expliquer de différentes manières. Par exemple, l'intérêt de l'utilisateur pour le projet ou le temps dont il dispose pour effectuer le test. Ces explications ne sont que supposées.

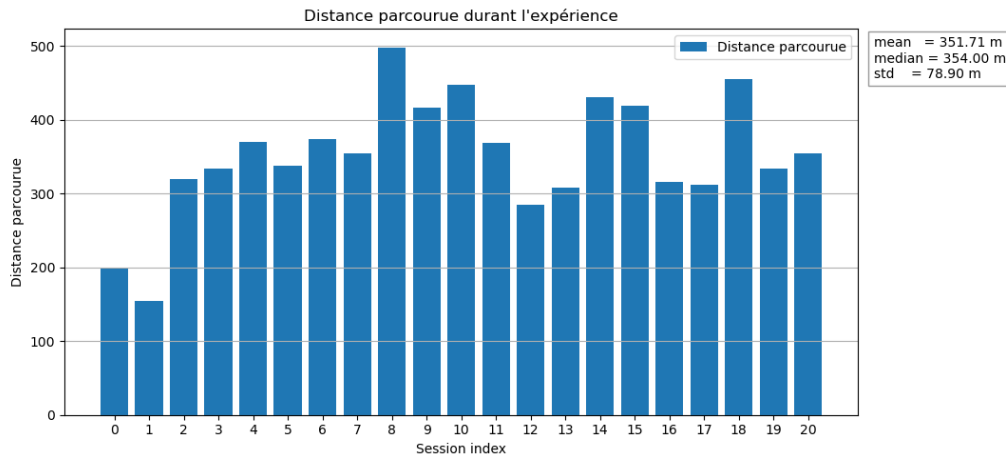


FIGURE 7.2 – Distance parcourue par utilisateurs durant l'expérience.

Au niveau statistique, la corrélation positive entre ces deux paramètres peut être qualifiée modérée, car $\rho = 0.39$. Leur association est très proche d'être statistiquement significative avec $p\text{-value} = 0.068$. Ces résultats indiquent que la distance parcourue peut être associée avec une bonne acceptabilité du système, mais ce n'est pas une généralité.

Conclusions

Parmi les associations testées dans ces hypothèses, seule la distance parcourue et l'acceptabilité ont une légère corrélation.

Les résultats des différentes données évaluées indiquent une bonne acceptabilité de la méthode de visualisation proposée. En effet, l'intention de réutilisation est forte et la compréhension du projet est améliorée. L'intégration du modèle peut être perfectionnée, d'après le résultat mitigé de la question numéro 3.

Les commentaires oraux peuvent également apporter des éléments de réponses sur l'acceptabilité de l'AR pour une visualisation de projets urbains. Des améliorations sont possibles en termes de texture pour le modèle du bâtiment. La perception de la profondeur est aussi un élément à améliorer.

Malgré cela, les retours généraux sur cette méthode sont bons. Elle apporte réellement une aide pour la compréhension des volumes et du gabarit de ces projets. L'aspect ludique et facile d'utilisation a été largement exprimé par les utilisateurs.

7.2 Portée et interprétation des résultats

Les résultats présentés doivent être interprétés avec prudence compte tenu du caractère exploratoire de l'étude. Certaines relations observées, notamment entre le niveau de formation et la distance parcourue, suggèrent des tendances qui peuvent être interprétées comme des indices d'une visualisation plus détaillée du projet proposé par les utilisateurs les plus formés. À l'inverse, la plupart des analyses de Spearman démontre une absence de corrélation significative

entre d'autres variables. Les résultats issus du questionnaire est une source d'information riche.

Néanmoins, la portée de ces résultats reste toutefois limitée au cadre de l'expérimentation menée. L'échantillon de participants, bien que suffisant pour une analyse exploratoire, ne permet pas une généralisation directe à l'ensemble des utilisateurs potentiels. Les profils ne sont pas assez variés, comme nous montrent les résultats sur l'âge ou même le niveau de formation. De plus, les comportements observés sont susceptibles d'être influencés par des facteurs non contrôlés, tels que l'environnement d'utilisation, la familiarité préalable avec les technologies 3D, la familiarité avec le projet ou encore les conditions matérielles propres aux dispositifs mobiles.

Certains éléments d'analyse proviennent du *tracking* du smartphone. Comme mentionné précédemment, ces données sont entachées d'une imprécision de plusieurs mètres et doivent être interprétées prudemment. D'après les données enregistrées, l'altitude vraie d'environ dix mètres en altimétrie, et l'erreur moyenne en planimétrie est d'environ cinq mètres (cf. figures 6.12 et 6.11).

Ces éléments invitent à considérer les résultats non comme des conclusions définitives, mais comme des indications permettant d'orienter des travaux futurs et d'affiner les hypothèses relatives à l'usage d'applications de réalité augmentée dans des contextes de projets urbain, ou plus largement d'aménagement du territoire.

Chapitre 8

Conclusion

Les objectifs de ce projet étaient multiples. Il s'agissait, dans un premier temps, de développer un prototype accessible sur mobile, sous la forme d'une application web simple d'utilisation, afin de s'adresser à un public aussi large que possible. Un second objectif consistait à examiner si la réalité augmentée permettait d'améliorer la compréhension d'un projet urbain. Enfin, ce travail visait à analyser l'acceptabilité d'une telle méthode dans le cadre de la visualisation de projets d'aménagement du territoire. Les analyses menées ont permis d'évaluer dans quelle mesure le prototype développé répond à ces différents objectifs.

L'accessibilité du prototype constitue l'un des points centraux de ce travail. Elle est définie ici par la simplicité d'accès et d'usage du système. Le choix d'une approche web permet un accès direct à la visualisation, sans installation préalable, ce qui contribue à abaisser les barrières techniques à l'utilisation. Cette approche favorise ainsi une diffusion élargie de l'outil auprès de publics variés.

L'acceptabilité a aussi été évaluée à travers une hypothèse en utilisant les données du *tracking* et les réponses à différentes questions. Les résultats indiquent une bonne acceptabilité de la méthode de visualisation proposée et un attrait marqué pour cette méthode de visualisation. En effet, l'intention de réutilisation est forte et la compréhension du projet est améliorée. Les observations comportementales et les retours oraux vont dans le même sens, révélant un intérêt élevé tant pour le projet présenté que pour la technologie employée. D'après le questionnaire, 83% des participants estiment que la visualisation en réalité augmentée facilite la compréhension du projet. Ces résultats confirment les conclusions de l'étude de SRI, 2025, qui souligne que l'AR permet de proposer des visualisations immersives favorisant la compréhension des projets d'aménagement.

Ces résultats sont particulièrement encourageants au regard des travaux de T.Chassin, qui mettent en évidence que 20% des personnes interrogées présentent de faibles capacités de représentation spatiale (CHASSIN et al., 2022). Dans ce contexte, la réalité augmentée apparaît comme une alternative pertinente aux plans traditionnels en deux dimensions. Les retours oraux confirment en effet une représentation spatiale facilitée grâce à l'AR.

La simplicité d'usage, ou utilisabilité, a été évaluée à l'aide du SUS (*System Usability Scale*). Les résultats obtenus indiquent une appréciation comprise entre bonne et excellente du prototype. L'analyse de l'hypothèse 1.1 montre par ailleurs que le profil des utilisateurs n'influence pas significativement l'utilisabilité perçue. Ces résultats sont corroborés par les retours oraux recueillis lors des phases de test, renforçant l'idée d'une prise en main globalement intuitive du système.

Un autre objectif lié à la visualisation était de proposer une expérience immersive. Les résultats de la question portant sur l'expérience immersive sont toutefois plus contrastés. Les retours qualitatifs et quantitatifs ont permis d'identifier plusieurs limitations : la lisibilité des modèles peut être améliorée, la précision du géoréférencement reste insuffisante, l'absence de gestion de l'occlusion limite la perception de la profondeur, et une implémentation approximative de l'altitude du modèle peut fausser le rendu. Ces éléments sont déterminants, car ils peuvent induire l'utilisateur en erreur et nuire à l'immersion.

Dans le domaine de l'aménagement du territoire, les enjeux sont souvent élevés, en particulier sur les plans économique et juridique. La précision et la fidélité de la représentation par rapport au projet réel constituent dès lors des exigences fondamentales. Une mauvaise compréhension du projet par les citoyens peut conduire à des oppositions ou à des recours, entraînant des retards et une augmentation des coûts.

De manière générale, une représentation fidèle et une bonne compréhension des projets sont essentiels en aménagement du territoire. La réalité augmentée apparaît comme un outil prometteur dans ce contexte. Plusieurs travaux soulignent que la visualisation en AR contribue à une meilleure appréhension des impacts potentiels des projets et favorise la transparence des processus décisionnels (REAYER, 2023).

Bien que l'accessibilité du prototype soit jugée bonne, certaines limites subsistent. L'utilisation de l'application nécessite un smartphone équipé de capteurs récents, ce qui peut exclure une partie de la population et introduire un risque de discrimination numérique. Cette disparité d'accès pourrait créer des inégalités entre les utilisateurs potentiels.

Enfin, des questions d'ordre légal ont également été mises en évidence. L'expérimentation s'est déroulée sur un terrain privé, sur lequel les utilisateurs se déplaçaient librement. En cas d'accident, la responsabilité du propriétaire du terrain pourrait être engagée, ce qui souligne l'importance de considérer les aspects juridiques lors de la mise en œuvre de dispositifs de réalité augmentée *in situ*.

Chapitre 9

Perspectives

9.1 Améliorations possibles

La méthode présentée permet d’offrir une première représentation du projet visualisé. En l’état, elle autorise la visualisation d’éléments pour lesquels une précision élevée n’est pas requise. Toutefois, dans le domaine de l’aménagement du territoire, les enjeux sont généralement importants, notamment sur le plan économique, ce qui confère à la précision et à la fidélité de la représentation du projet un caractère prioritaire. Dans ce contexte, il apparaît difficile d’envisager l’utilisation du prototype dans un cadre opérationnel.

Les perspectives d’amélioration du projet sont néanmoins nombreuses. Les résultats des évaluations menées permettent d’en identifier plusieurs, ouvrant la voie à des évolutions susceptibles d’accroître la pertinence et la fiabilité du dispositif proposé.

Tout d’abord, l’amélioration de la représentation des maquettes et de leur position est primordiale pour obtenir une expérience totalement immersive et représentative du futur projet. Une bonne représentation et une bonne immersion du modèle dans l’environnement permettent à l’utilisateur d’avoir une vision proche du projet fini. Pour se rapprocher de cela, il est nécessaire : d’améliorer le géoréférencement du smartphone, d’ajouter un algorithme de gestion de l’occlusion, corriger l’azimut du smartphone, modifier la texture du bâtiment.

La phase de calibration est également perfectible. Les différentes remarques et les résultats de l’analyse mettent en avant le manque de compréhension de la méthode proposée. En effet, un tutoriel ou des explications plus poussées auraient permis d’améliorer l’accessibilité de cette étape. Le choix de l’utilisation de points limites a aussi été remise en question. Leur emplacement souvent difficile à repérer pour les non-initiés peut compliquer leur recherche. Cette phase représente la plus grosse contrainte. Dans l’idéale, elle serait supprimée si les smartphones étaient équipés de capteurs de meilleure qualité.

Plusieurs utilisateurs cherchaient l’interaction avec le smartphone durant la visualisation. Le bouton affichant les informations pourrait être supprimé. Cliquer sur un modèle visible pourrait

remplacer ce bouton en affichant les informations relatives à celui-ci.

Des personnes ont aussi mentionné la possibilité de masquer des éléments ou de modifier leur apparence. Ajouter un gestionnaire de couches permettrait de proposer plusieurs représentations d'un même projet. Le choix incomberait à l'utilisateur d'afficher la maquette selon ses préférences.

La situation présente sur la page principale pourrait suivre l'orientation du smartphone, dans le but d'aider davantage l'utilisateur à se repérer dans la scène. L'ajout de l'emprise des projets visualisés sur cette situation pourrait améliorer l'estimation de leur positionnement en profondeur dans la scène.

La section 7.2 met en lumière la limite de la portée des résultats. L'échantillon réduit des participants ne permet pas une généralisation directe avec l'ensemble des utilisateurs potentiels. Le manque de représentation de certains profils est également une limite de ce projet.

9.2 Nouveaux cas d'usages et d'études

La réalité augmentée permet une bonne immersion et une meilleure compréhension de projets urbains. Une fois la méthode améliorée, elle pourrait être utilisée dans bon nombre de domaines de l'aménagement du territoire ou de la construction.

Comme mentionné dans le chapitre sur la réalité augmentée, cet outil pourrait transformer les modalités d'interactions entre les professionnels, les administrations et les citoyens. Elle améliore la communication en proposant une visualisation immersive. Cette représentation contribue à une meilleure appréhension des impacts potentiels et participe au renforcement de la transparence du processus décisionnel.

Les porteurs de projets, qu'ils soient privés ou publics, seraient positivement impactés par l'ajout d'une expérience immersive par réalité augmentée en promotion de leurs projets. Une meilleure communication et une amélioration de l'immersion et de la compréhension pour les citoyens pourrait être bénéfique. Des études et articles existent sur ce sujet, mais l'impact réel n'est pas quantifié et est difficile d'imaginer.

En suisse, énormément de projets subissent des oppositions et des recours, ce qui retarde la réalisation des projets de constructions (ARE, 2025). Il serait intéressant d'étudier l'impact d'une méthode de communication basée sur la réalité augmentée sur le nombre des oppositions.

La représentation d'immeubles peut également être utilisée dans la vente. Un client pourrait plus aisément se projeter. S'agissant d'un achat financièrement important, améliorer la compréhension et l'immersion de ses clients serait un bénéfice pour l'agent. En effet, la représentation sur plan est un problème pour une partie de la population.

Bibliographie

- AGAFONKIN, V. (2025). Leaflet is an open-source JavaScript library for interactive maps. <https://leafletjs.com/>
- AR, G. (2025, octobre). GAMMA AR | Augmented reality solution for building projects. <https://gamma-ar.com/>
- ARE. (2025). Oppositions et recours sont devenus un obstacle majeur aux projets immobiliers en Suisse. <https://www.news.admin.ch/fr/newsb/mPv5zis1PLFFizEIFaMOA>
- AR-JS-ORG. (2026). LocAR.js A standalone location-based AR project within the AR.js organisation. <https://github.com/AR-js-org/locar.js?tab=readme-ov-file>
- BALGRIST UNIVERSITY HOSPITAL. (s. d.). *First holographically navigated spine surgery*. <https://www.balgrist.ch/en/research/research-units/augmented-reality/>
- , B. (2025, septembre 22). *Transforming Learning Environments : 3 Examples of AR Education*. <https://www.classvr.com/resource-hub/blog/transforming-learning-environments-3-examples-of-augmented-reality-in-education/>
- BANGOR, A., KORTUM, P. T., & MILLER, J. T. (2008). An empirical evaluation of the system usability scale. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 24(6), 574, 594.
- BRANDXR. (2025). 2025 Augmented Reality in Retail & E-Commerce Research Report Executive Summary [Accessed : October 8, 2025]. <https://www.brandxr.io/2025-augmented-reality-in-retail-e-commerce-research-report>
- BUDI, R., & BEHNAM, S. (2022, novembre 18). *The Usability of Augmented Reality*. <https://www.nngroup.com/articles/ar-ux-guidelines/>
- CAPACITOR. (2026). Capacitor by Ionic is Cross-platform apps with web technology. <https://capacitorjs.com/>
- CAPUANO, V., XU, L., & BENAVIDES, J. E. (2023). Smartphone MEMS Accelerometer and gyroscope Measurement Errors : laboratory testing and analysis of the effects on positioning performance. *Sensors*, 23(17), 7609.
- CHASSIN, T., INGENSAND, J., CHRISTOPHE, S., & TOUYA, G. (2022). Experiencing virtual geographic environment in urban 3D participatory e-planning : A user perspective. *Landscape and Urban Planning*, 224, 104432.
- DAVID. (2025, juillet). How AR improves urban planning and public engagement. <https://www.augmentecture.com/blog/how-ar-improves-urban-planning-and-public-engagement/>
- FIELD, S. (2025, mai 2). *Augmented Reality in Entertainment & Media*. <https://rockpaperreality.com/insights/ar-use-cases/augmented-reality-in-entertainment-media/>

- FOUNDATION, B. (s. d.). Blender, the free and open source 3D creation software Blender.org.
<https://www.blender.org/>
- FOUNDATION, I. D. (2025, mai 1). *What is Augmented Reality (AR) ?* <https://www.interaction-design.org/literature/topics/augmented-reality>
- GARCIA, C. (2024, octobre 3). *Best Practices for Designing User-Friendly AR/VR Interfaces in Apps*. <https://appmaster.io/blog/user-friendly-ar-vr-app-interfaces>
- GEOSPATIAL, T. (s. d.). Trimble SiteVision. <https://geospatial.trimble.com/en/products/software/trimble-sitevision>
- GEOSYSTEMS, L. (2026). Leica Cyclone 3DR. <https://leica-geosystems.com/fr-ch/products/laser-scanners/software/leica-cyclone/leica-cyclone-3dr>
- GOOGLE. (2025, novembre 3). La profondeur ajoute du réalisme. <https://developers.google.com/ar/develop/depth?hl=fr>
- GUILLAUME, S. (2025a, juin 15). Éléments de géodésie.
- GUILLAUME, S. (2025b, juin 15). Méthodes d'estimation et réseaux géodésiques.
- HAMANN, M. (2024, novembre 28). *Augmented reality frameworks in comparison*. <https://thespatialstudio.de/en/blog/ar-frameworks-in-comparison>
- HERZOG DE MEURON. (2019). Ronquoz 21 [Projet architectural, site officiel].
- J, C., & J, C. (2025, mars 31). *What is Augmented Reality (AR) ? Its Impact on Web Design*. <https://www.wazile.com/blog/what-is-augmented-reality-ar-its-impact-on-web-design/>
- JOHNSON, P. (2025, avril 8). *The best web AR Marketing*. <https://rockpaperreality.com/insights/web-ar/the-best-web-ar-marketing-examples/>
- MANN, S., & FUNG, J. (2020). Wearable Augmented Reality : A Review of Smart Glasses for Everyday Use. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 26(12), 3635-3648.
- MEEGLE. (2025, octobre 24). *Game engine for augmented reality*. https://www.meegle.com/en_us/topics/game-engine/game-engine-for-augmented-reality
- NAARG, T. (2024, juillet 5). *Augmented Reality Localization : A New Era in Geolocation*. <https://www.naargmedia.com/augmented-reality-localization/>
- NUMIQO. (2026). <https://numiqo.fr/tutorial/spearman-correlation>
- OFS. (2025). Niveau de formation et compétences, Office fédéral de la statistique (OFS). <https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/education-science/niveau-formation.html>
- QIAO, X., REN, P., DUSTDAR, S., LIU, L., MA, H., & CHEN, J. (2019a). Web AR : A Promising Future for Mobile Augmented Reality—State of the Art, Challenges, and Insights. *Proceedings of the IEEE*, 107(4), 651-666.
- QIAO, X., REN, P., DUSTDAR, S., LIU, L., MA, H., & CHEN, J. (2019b). Web AR : A Promising Future for Mobile Augmented Reality—State of the Art, challenges, and Insights. *Proceedings of the IEEE*, 107(4), 651-666.

- REAVEN, K. (2023). Augmented reality as a participation tool for youth in urban planning processes : Case study in Oslo, Norway. *Frontiers in Virtual Reality*, 4.
- RYFFEL, M., ZÜND, F., AKSOY, Y., MARRA, A., NITTI, M., AYDIN, T. O., & SUMNER, B. (2017). *A MOBILE AUGMENTED REALITY APPLICATION FOR INTERACTIVE PAINTING RECOLORING*. ETH Zurich. <https://gtc.inf.ethz.ch/research/augmented-and-virtual-reality-research/behind-the-art.html>
- SAMSYUDIN, I. (2024). Native Apps vs. Progressive Web Apps : A Comparative Analysis of User Experience and Development Costs. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. <https://ssrn.com/abstract=5039280>
- SARLIN, P.-E., DUSMANU, M., SCHÖNBERGER, J. L., SPECIALE, P., GRUBER, L., LARSSON, V., MIKSIK, O., & POLLEFEYS, M. (2022). LaMAR : Benchmarking Localization and Mapping for Augmented Reality. *ECCV*.
- SCHMIDT, R. (2023, juillet). Integrating Augmented Reality (AR) into Web Development. <https://appmaster.io/blog/augmented-reality-web-development>
- SETTIMI, A., GAMERRO, J., & WEINAND, Y. (2025). *Augmented Carpentry : Computer Vision-assisted Framework for Manual Fabrication*. arXiv : 2503.07473 [cs.R0]. EPFL. <https://arxiv.org/abs/2503.07473>
- SRI, Y. (2025, août). AR Revolutionizing Urban Planning : A Dynamic Paradigm Shift – VPRC. <https://vprc.in/ar-and-vr/ar-revolutionizing-urban-planning-a-dynamic-paradigm-shift/>
- TELYAI. (2025, février). What are the challenges in exploring augmented reality in architectural projects? A comprehensive overview -. <https://jscottsmith.com/what-are-the-challenges-in-exploring-augmented-reality-in-architectural-projects-a-comprehensive-overview/>
- THREE.JS. (2026). Three.js, JavaScript 3D library. <https://threejs.org/>
- UNITY, t. (2026). Unity Scripting API : Vector3.Lerp. <https://docs.unity3d.com/6000.3/Documentation/ScriptReference/Vector3.Lerp.html>
- vGIS INC. (2025, août). Excavation damage prevention, locates, and as-built powered by AR and AI. <https://www.vgis.io/>
- VIDANOVIC, M. (2025, mars 17). *AI, AR, and VR : The Future of Web Design User Experience*. <https://gotchamobi.com/resources/blog/the-future-of-web-design/>
- VILLE DE SION. (s. d.). <https://www.sion.ch/projets/71257>
- VILLE DE SION. (2023, décembre). *Ronquoz 21, Plan guide v1*. Ville de Sion. https://www.sion.ch/_docn/5393986/Rapport_PGv1-FINAL_optimise4582.pdf
- WAN, Z., SUN, S., MENG, F., & YAN, Y. (2024). How Augment Reality Support Public Participation in the Urban Design Decision-Making : A ten - year literature review. *eCAADe Proceedings*, 2.
- WIKIPEDIA. (2025a, septembre). ARTag. <https://en.wikipedia.org/wiki/ARTag>
- WIKIPEDIA. (2025b, décembre). System usability scale. https://en.wikipedia.org/wiki/System_usability_scale

YOU, E. (2026). <https://vuejs.org/>

ZHOU, F., DUH, H.-B. L., & BILLINGHURST, M. (2022). Trends in Augmented Reality Research : A Bibliometric Analysis (2000-2021). *Journal of Computer-Based Learning*, 48, 100-115.

Annexes

Scripts

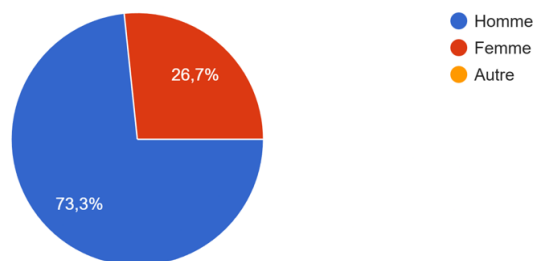
Lien vers les scripts de l'application : github.com/romaindlz/tm-ar-deployment

Lien vers les scripts d'analyses : github.com/romaindlz/tm_analyses

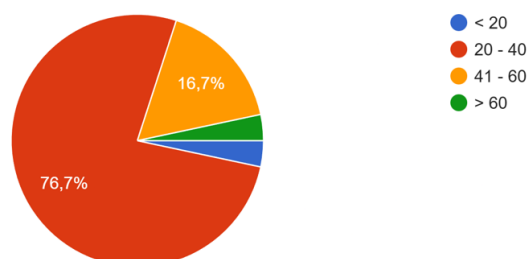
Réponses au questionnaire

Profils de l'utilisateur

Sexe :
30 réponses

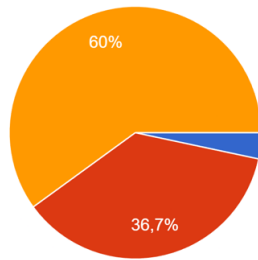


Age :
30 réponses



Niveau de formation :

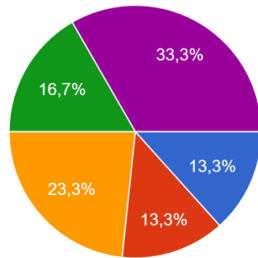
30 réponses



- Formation obligatoire
- Formation supérieure (CFC, ES, maturité, ...)
- Formation tertiaire (bachelor, master, ...)
- Autre

Fréquence d'utilisation de la 3D :

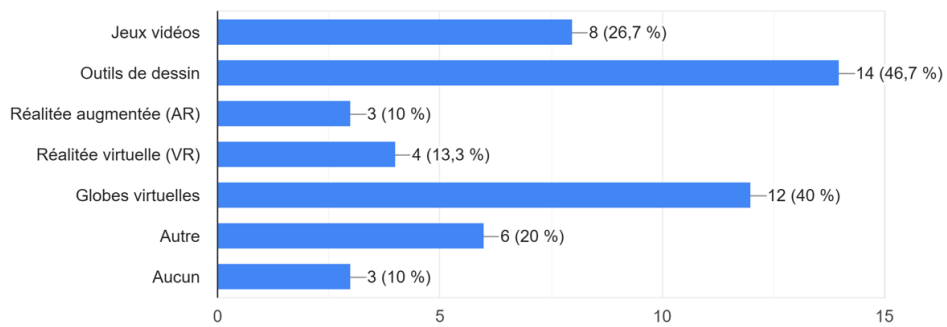
30 réponses



- Jamais
- Rarement (quelques fois par année)
- Occasionnellement (1-2 fois par mois)
- Régulièrement (1-2 fois par semaine)
- Très souvent (presque tous les jours)

Contexte d'utilisation de la 3D :

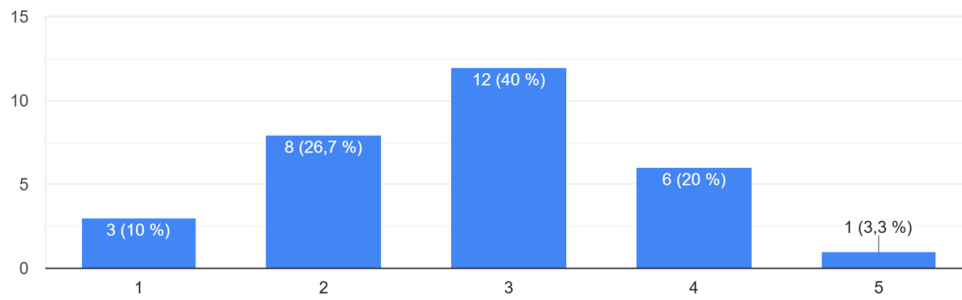
30 réponses



SUS

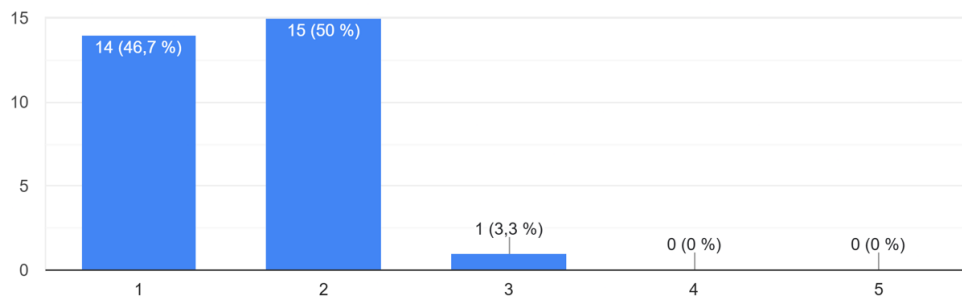
Je pense que je vais utiliser ce système fréquemment.

30 réponses



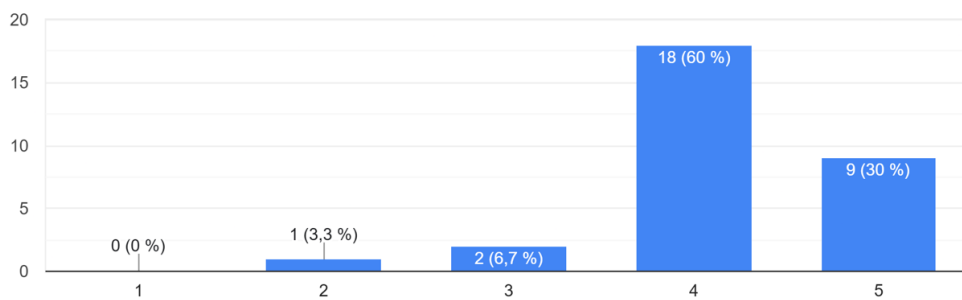
Je trouve ce système inutilement complexe.

30 réponses



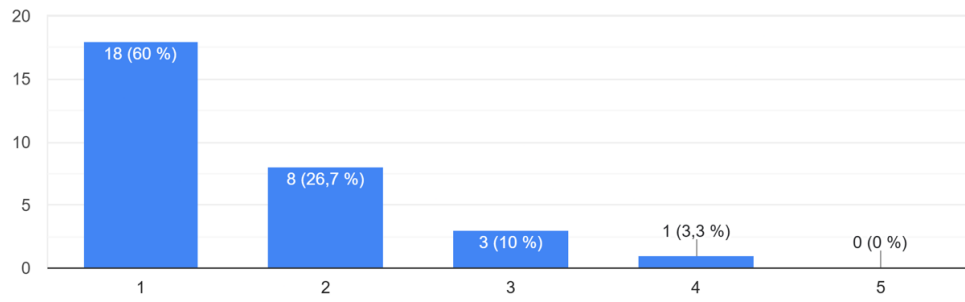
Je pense que ce système est facile à utiliser.

30 réponses



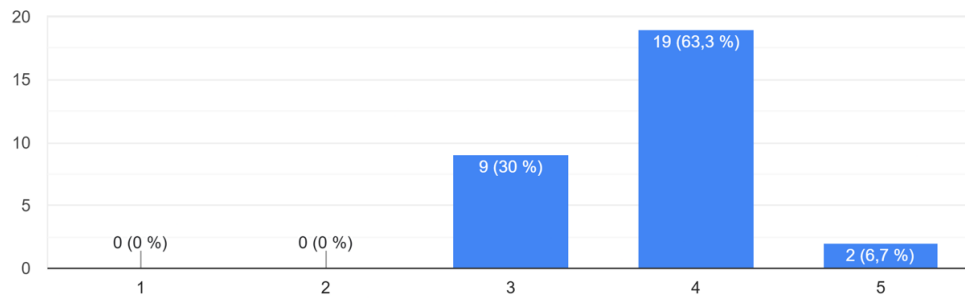
Je pense que j'aurai besoin de l'aide d'un technicien pour être capable d'utiliser ce système.

30 réponses



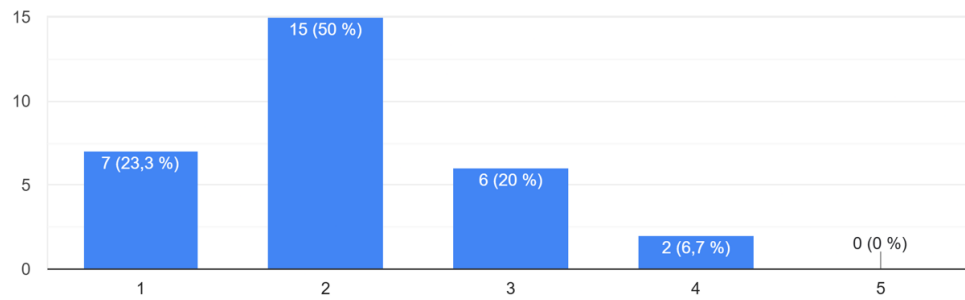
J'ai trouvé que les différentes fonctions de ce système ont été bien intégrées.

30 réponses



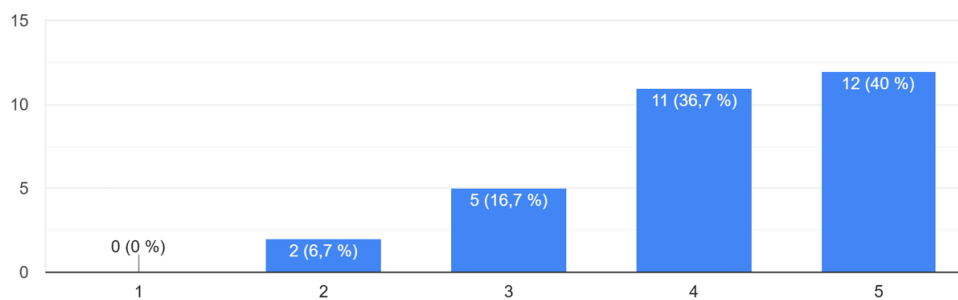
Je pense qu'il y a trop d'incohérence dans ce système.

30 réponses



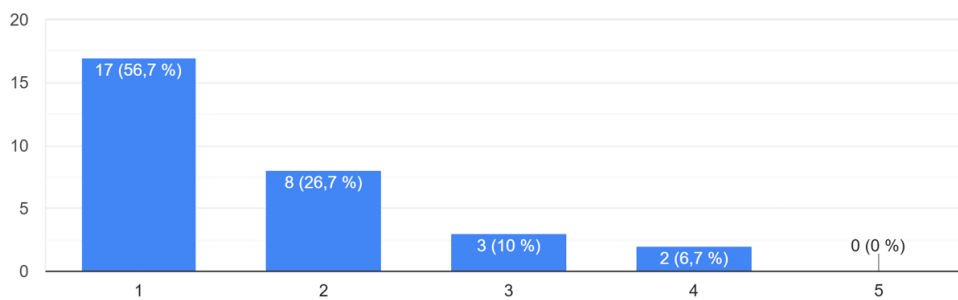
J'imagine que la plupart des gens seraient capables d'apprendre à utiliser ce système très rapidement.

30 réponses



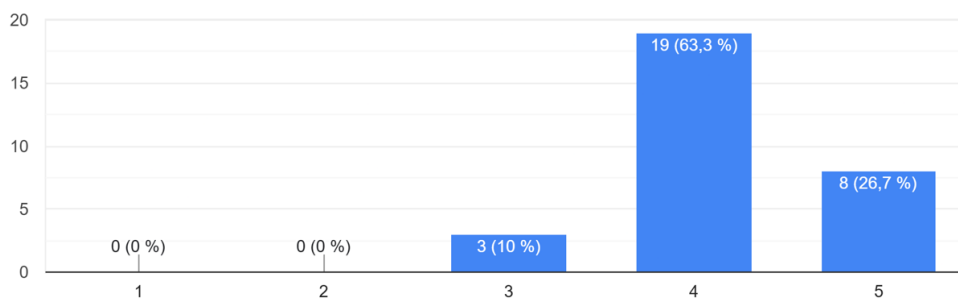
J'ai trouvé le système peu pratique à utiliser.

30 réponses



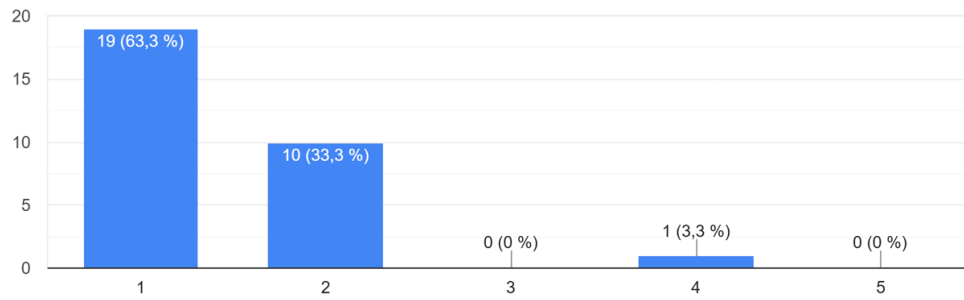
Je me sentais très confiant en utilisant ce système.

30 réponses



J'ai besoin d'apprendre beaucoup de choses avant de pouvoir utiliser ce système.

30 réponses



Expérience

L'application était fluide pendant l'utilisation.

30 réponses

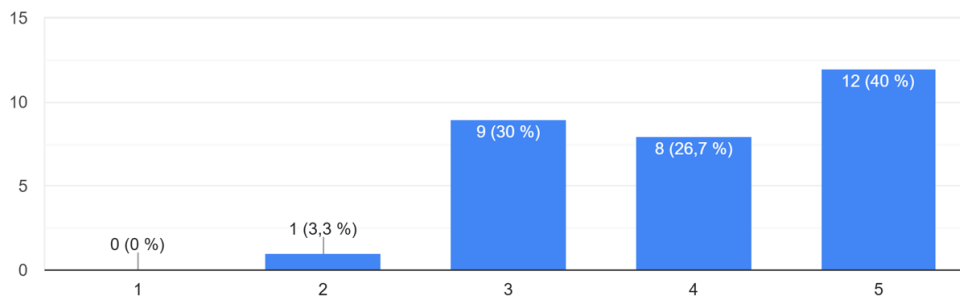


FIGURE 9.1 – Question n°1 sur l'expérience.

Cette méthode de visualisation/ technologie permet une bonne compréhension du projet.

30 réponses

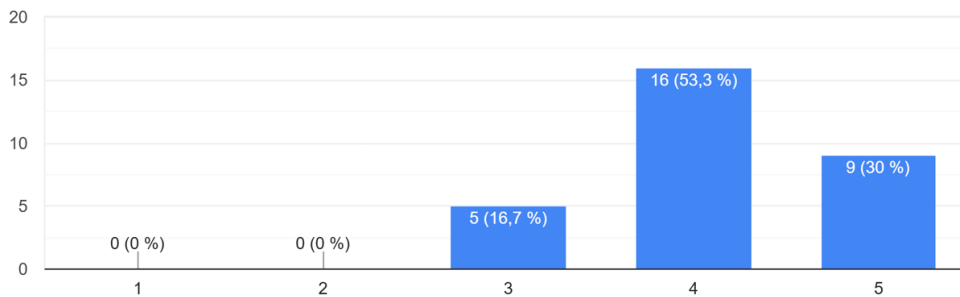


FIGURE 9.2 – Question n°2 sur l'expérience.

La maquette était bien intégrée dans l'environnement réel.

30 réponses

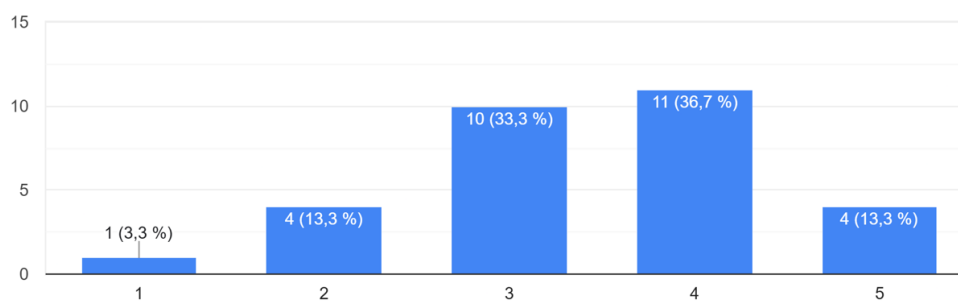


FIGURE 9.3 – Question n°3 sur l'expérience.

La phase de calibration représente une contrainte importante pour l'utilisation de l'application.

30 réponses

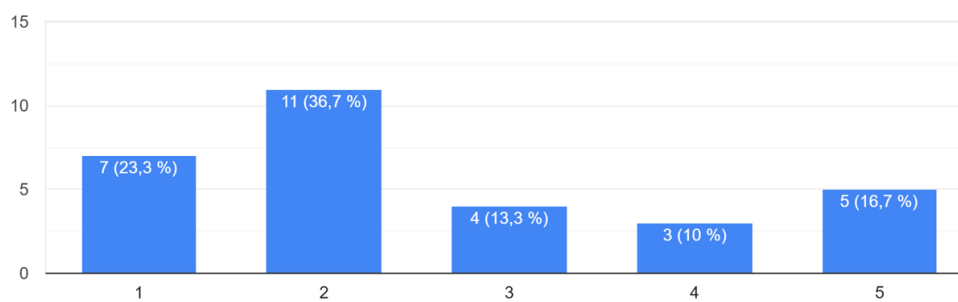


FIGURE 9.4 – Question n°4 sur l'expérience.

J'utiliserais volontiers ce type d'application/ visualisation pour d'autres projets.

30 réponses

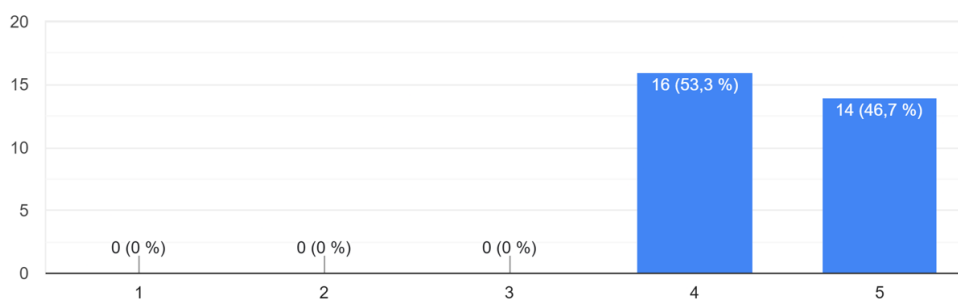


FIGURE 9.5 – Question n°5 sur l'expérience.