

Optimisation des processus de préfabrication des ossatures en bois grâce à la réalité augmentée: impact sur l'efficacité et l'expérience utilisateur

Auteur : Bourdouch, Rodrigue

Promoteur(s) : Leclercq, Pierre

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil des constructions, à finalité spécialisée en "civil engineering"

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/23313>

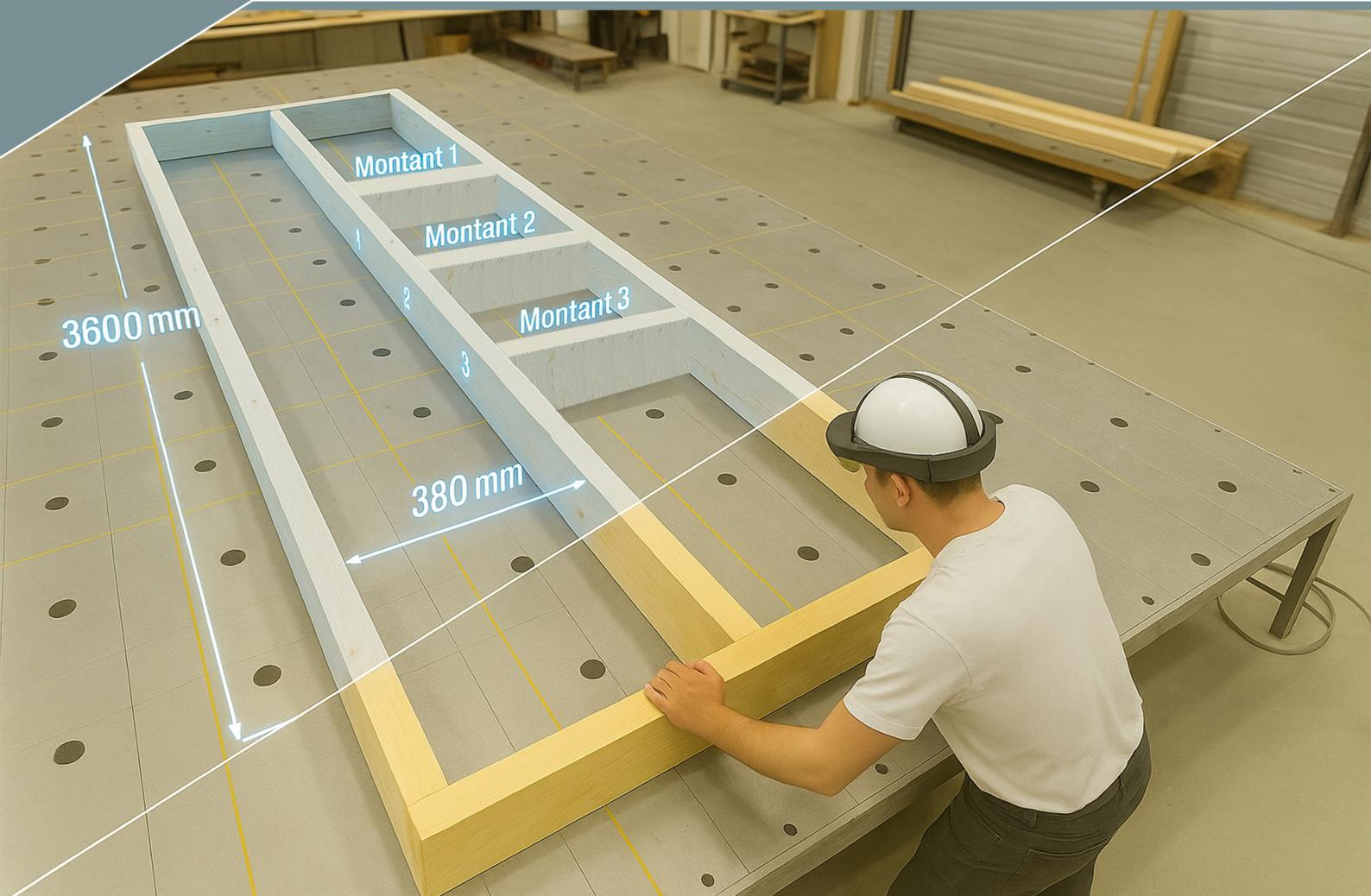
Avertissement à l'attention des usagers :

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

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

Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du grade de :
Ingénieur Civil des constructions

Année académique : 2024-2025



Optimisation des processus de préfabrication des ossatures en bois grâce à la réalité augmentée : impact sur l'efficacité et l'expérience utilisateur

Optimisation des processus de préfabrication des ossatures en bois grâce à la réalité augmentée : impact sur l'efficacité et l'expérience utilisateur

Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du grade de :
Ingénieur Civil des constructions

Auteur :

BOURDOUCH Rodrigue

Promoteur :

LECLERCQ Pierre

Composition du jury :

FRANCOIS Bertrand (Président du jury – ULiège)

GRONIER Guillaume (Luxembourg Institute of Science and Technology)

LECLERCQ Pierre (Promoteur – ULiège)

MATAGNE Lionel (Membre extérieur – Sabem)

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Pierre Leclercq, mon promoteur, pour son accompagnement tout au long de ce travail. Ses conseils avisés et nos nombreuses discussions m'ont permis d'avancer et de mieux structurer ma réflexion.

Je remercie également Monsieur Lionel Matagne, de l'entreprise Sabem, pour son engagement pré-cieux. Sans lui, la mise en œuvre des différentes technologies testées n'aurait pas été possible.

Mes remerciements vont également à l'entreprise Sabem, qui m'a accueilli avec bienveillance et a fait preuve d'une grande ouverture en me permettant de réaliser divers essais. Je remercie tout particulièrement Monsieur Michael Lapagne, ainsi que Christophe, Sébastien et Stéphane, pour leur accueil dans l'atelier et leur implication dans l'expérimentation des technologies de réalité augmentée.

Je souhaite également remercier le Dr. Reséndiz-Villaseñor et Monsieur Gaëtan Duyckaerts pour nos échanges enrichissants, qui ont nourri ma réflexion et apporté un éclairage complémentaire à mon travail.

Un grand merci à l'entreprise WoodTec Fankhauser pour le prêt du casque de réalité augmentée, ainsi qu'à l'entreprise Elyotec pour l'essai réalisé dans le cadre de ce projet.

Je remercie vivement Monsieur Guillaume Gronier d'avoir accepté de faire partie du jury.

Enfin, je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à mes amis et à ma famille pour leur soutien indéfectible tout au long de ce travail. Un merci tout particulier à Camille pour sa relecture attentive et pour les longues discussions qui ont nourri et enrichi ce travail.

Résumé

Le secteur de la construction, longtemps en retard sur le plan de la numérisation, est aujourd’hui confronté à des enjeux cruciaux de productivité et de durabilité. La préfabrication des ossatures bois, en plein essor, représente une réponse pertinente à ces défis, en combinant efficacité, rapidité d’exécution et réduction de l’impact environnemental.

Déjà largement adoptée dans des secteurs comme l’aéronautique, l’automobile ou la santé, la réalité augmentée (RA) s’invite désormais dans le domaine de la construction, et plus particulièrement dans la préfabrication bois. Dans ce contexte, ce travail de fin d’études explore son apport potentiel dans l’optimisation des processus de production.

Menée en collaboration avec l’entreprise SABEM, l’étude repose sur une démarche expérimentale. Trois technologies ont été testées dans un environnement réel : un casque de RA (HoloLens 2), un projecteur laser (RA spatiale) et un dispositif mobile (smartphone). L’objectif était de mesurer la valeur ajoutée de ces outils, tant en termes de performance technique que d’expérience utilisateur, à travers un processus de conception centré sur l’opérateur.

Les résultats montrent que la RA peut faciliter le positionnement des éléments, réduire les erreurs humaines et offrir un gain de temps considérable dans les étapes de construction. En parallèle, un logiciel a été développé pour automatiser certaines tâches récurrentes du processus.

Ce travail ouvre la voie à une réflexion plus large sur les conditions nécessaires à l’intégration durable de la RA dans la construction bois, et sur les perspectives concrètes d’industrialisation numérique du secteur.

Summary

The construction sector, historically lagging behind in terms of digitalization, now faces major challenges related to productivity and sustainability. The off-site prefabrication of timber frame components, a growing trend in construction, offers a relevant response by combining efficiency, fast execution, and reduced environmental impact.

Already widely proven in industries such as aerospace, automotive, and healthcare, augmented reality (AR) is now making its way into the construction sector, particularly in timber prefabrication. In this context, this study investigates the potential contribution of AR to optimizing production processes.

Conducted in collaboration with the company SABEM, the study follows an experimental approach. Three technologies were tested in a real manufacturing environment : an AR headset (HoloLens 2), a laser projector (spatial AR), and a mobile device (smartphone). The objective was to assess the added value of these tools in terms of both technical performance and user experience, using a user-centered design process.

Results show that AR can facilitate the positioning of components, reduce human errors, and provide significant time savings during the construction phases. In parallel, a custom software tool was developed to automate certain repetitive tasks in the workflow.

This work opens the door to a broader reflection on the sustainable integration of AR in timber construction, and on the key conditions required for its large-scale adoption as part of the sector’s digital transition.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Contexte	1
1.2	Objectif de recherche	3
1.3	Méthodologie	4
2	Revue de littérature	7
2.1	La construction en bois	7
2.1.1	Historique et avantage du bois	7
2.1.2	Note sur les essences de bois et leur classification	8
2.1.3	Les systèmes constructifs de la construction en bois	8
2.2	Réalité augmentée	13
2.2.1	Distinctions et classifications des réalités numériques	13
2.2.2	Historique de la réalité augmentée	14
2.2.3	Exploration des dispositifs actuels de réalité augmentée	15
2.2.3.1	Smartphones et tablettes avec applications RA (Monitor-based)	16
2.2.3.2	Casques et lunettes de réalité augmentée	16
2.2.3.3	Projecteurs et dispositifs de réalité augmentée spatiale	17
2.2.4	La RA dans la construction (AEC)	18
2.3	La RA dans la construction en bois	21
2.3.1	Technologie adoptée	22
2.3.2	Cadre d'application	22
2.3.3	Utilisateurs :	23
2.3.4	Tolérance de fabrication Précision de la réalité augmentée	23
2.4	L'expérience utilisateur "UX"	26
2.4.1	L'intérêt de l'expérience utilisateur dans ce travail	26
2.4.2	Les 5 phases du processus UX	27
3	Expérimentation	29
3.1	Planification	29
3.1.1	Définition du cadre pratique	29
3.1.2	Définition des objectifs	30
3.1.2.1	Objectifs de l'entreprise	30
3.1.2.2	Objectifs du travail	30
3.1.3	Ressources, outils et utilisateurs	30
3.2	Exploration	32
3.2.1	Entretien et observation des méthodes de travail	32
3.2.2	Entretien avec les dessinateurs	39
3.2.3	Retour d'expérience d'entreprises sur la réalité augmentée	39
3.3	Idéation	40
3.3.1	Casque de réalité augmentée	40
3.3.1.1	Contexte	40

TABLE DES MATIÈRES

3.3.1.2	Préparation et mise en place	40
3.3.1.3	Affichage des éléments	41
3.3.1.4	Observations et contraintes	41
3.3.1.5	Conclusion	42
3.3.2	Projection laser (réalité augmentée spatiale)	42
3.3.2.1	Préparation et mise en place	42
3.3.2.2	Affichage des éléments	43
3.3.2.3	Observations et contraintes	43
3.3.2.4	Conclusion	43
3.3.3	Appareil mobile (smartphone)	44
3.3.3.1	Préparation et mise en place	44
3.3.3.2	Affichage des éléments	44
3.3.3.3	Observations et contraintes	44
3.3.3.4	Conclusion	45
3.4	Génération	46
3.4.1	Interface et fonctionnalités du logiciel	47
3.4.2	Casque de réalité augmentée	48
3.4.2.1	Disponibilité	49
3.4.2.2	Précision	49
3.4.2.3	Port des EPI (sécurité)	52
3.4.2.4	Conclusion sur le test utilisateur à réaliser avec le casque	52
3.4.3	Projection laser (réalité augmentée spatiale)	53
3.4.3.1	Disponibilité	53
3.4.3.2	Nature du test utilisateur	53
3.4.3.3	Mise en place	54
3.4.3.4	Adaptation du logiciel de traitement des fichiers DXF aux spécificités des caissons à deux hauteurs	56
3.5	Évaluation Expérimentation	59
3.5.1	Expérimentation du casque de réalité augmentée	59
3.5.1.1	Présentation du test utilisateur	59
3.5.1.2	Phase 1 : Apprentissage	60
3.5.1.3	Phase 2 : Caisson réel avec assistance	61
3.5.1.4	Phase 3 : Caisson réel sans assistance	63
3.5.2	Casque de réalité augmentée : Observations et analyses	65
3.5.2.1	Questionnaire UX	65
3.5.2.2	Analyse des critères d'évaluation	65
3.5.2.3	Erreurs et problèmes fréquents rencontrés	68
3.5.2.4	Analyse des performances	68
3.5.2.5	Pistes d'amélioration	69
3.5.3	Expérimentation de la projection laser	72
3.5.3.1	Présentation du test utilisateur	72
3.5.4	Projection laser : Observations et analyses	75
3.5.4.1	Questionnaire UX	75
3.5.4.2	Analyse des critères d'évaluation	75
3.5.4.3	Analyse des performances	77
3.5.4.4	Pistes d'amélioration	78
3.5.5	Évaluation comparative des systèmes de RA	79
3.5.5.1	Comparaison des contraintes d'usage : Casque de réalité augmentée vs. Projecteur laser	79
3.5.5.2	Analyse économique : coûts d'investissement et rentabilité	81

TABLE DES MATIÈRES

4 Conclusions et perspectives	84
4.1 Conclusions	84
4.2 Limites	85
4.3 Perspectives	86
Annexes	87
4.4 Annexe chapitre 2	87
4.4.0.1 Les essences de bois et leur classification	87
4.4.0.2 Les types de bois utilisés en construction	87
4.5 Annexe chapitre 3	87
4.5.0.1 Programme de traitement de fichier DXF	87
4.5.0.2 Protocole de test du casque de réalité augmentée	92
4.5.0.3 Questionnaire UX casque de réalité augmentée	95
4.5.0.4 Fascicule d'utilisation du laser	101
4.5.0.5 Questionnaire UX laser de projection	106

Table des figures

1.1	Vue d'ensemble du cadre méthodologique (a) et de la chronologie du projet (b)	4
2.1	Représentation schématique du système constructif poteaux-poutres	9
2.2	Représentation schématique du système constructif en madriers.	9
2.3	Représentation schématique du système constructif en panneaux préfabriqués en bois massif (CLT)	10
2.4	Représentation schématique du système constructif en panneaux préfabriqués en bois massif (CLT)	11
2.5	Le continuum Réalité-Virtualité, Adapté de Milgram (1996)	13
2.6	Comparaison entre réalité augmentée (AR), réalité virtuelle (VR) et réalité mixte (MR). source : https://okss17.tistory.com/197	14
2.7	Le premier casque de réalité augmentée, développé par Ivan Sutherland en 1968. Source : https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/1476589.1476686	15
2.8	Casque de réalité augmentée utilisé dans l'assemblage chez Boeing (1992). Source : image reproduite depuis Ali & Rahaman (2022), d'après Mizell, D. (1992) https://www.researchgate.net/publication/363915436	15
2.9	Utilisation de smartphone avec application de RA	16
2.10	Utilisation d'un casque de réalité augmentée	17
2.11	Utilisation d'un projecteur laser (réalité augmentée spatiale)	17
2.12	Représentation des cinq phases du processus de conception centré utilisateur, adapté de Lallemand et Gronier (2015), appliqué ici à l'expérimentation de la réalité augmentée. .	27
3.1	Atelier de fabrication des ossatures	29
3.2	Table de montage	32
3.3	Premier plan de montage	33
3.4	Premiers montants de l'ossature	33
3.5	Renforts en OSB	34
3.6	Second plan de montage	34
3.7	Panneaux intérieurs	35
3.8	Pare-vapeur	35
3.9	Retournement du caisson	36
3.10	Isolation	36
3.11	Panneau extérieur	36
3.12	Troisième plan de montage	37
3.13	Pare pluie	37
3.14	Lattage	38
3.15	Fichier testé durant l'essai du casque de réalité augmentée	41
3.16	Décalage et distorsion rencontrés durant l'essai du casque de réalité augmentée	41
3.17	Photo prise durant l'essai du laser	42
3.18	Graphique de comparaison des coordonnées mesurées et théoriques sur les 9 points du modèle	45

LISTE DES FIGURES

3.19	Interface du logiciel de traitement de fichier DXF	47
3.20	Protocole d'expérimentation du casque de réalité augmentée	48
3.21	Évolution du protocole :Disponibilité du casque	49
3.22	Vues depuis le casque HoloLens 2 lors du calibrage : positionnement de l'axe de référence et interface de réglage manuel.	50
3.23	Représentation des points mesurés avec écart amplifié $\times 50$ par rapport aux points réels .	51
3.24	Évolution du protocole : Port du casque de sécurité	52
3.25	Évolution de l'autonomie des opérateurs durant l'expérimentation	53
3.26	Images de l'installation technique du projecteur laser dans l'atelier de Sabem.	54
3.27	Interface du logiciel pour le laser	55
3.28	Télécommande opérateur	56
3.29	Vue d'un caisson composé de deux structures à deux hauteurs (400 [mm] et 220 [mm]) .	57
3.30	Plans de montage du caisson "Test"	61
3.31	Plans affichés dans le casque pour le montage du premier caisson	62
3.32	Plans affichés dans le casque pour le montage du second caisson	62
3.33	Plans affichés dans le casque pour le montage du caisson	64
3.34	Résultats moyens par critère UX pour chaque utilisateur et moyenne globale.	65
3.35	Plan du caisson (MOB 58), construit pour le test de la projection laser	73
3.36	Résultats moyens par critère UX pour chaque utilisateur et moyenne globale.	75
4.1	Translation des entités du fichier	89
4.2	Traçage du trait du milieu des montants	89
4.3	Emplacement du trait de positionnement du montant	90
4.4	Représentation de la nomination donnée aux zones	91
4.5	Protocole de test du casque de réalité augmentée (Page 1/3)	92
4.6	Protocole de test du casque de réalité augmentée (Page 2/3)	93
4.7	Protocole de test du casque de réalité augmentée (Page 3/3)	94
4.8	Questionnaire UX du casque de réalité augmentée (Page 1/3) de l'utilisateur 1	95
4.9	Questionnaire UX du casque de réalité augmentée (Page 2/3) de l'utilisateur 1	96
4.10	Questionnaire UX du casque de réalité augmentée (Page 3/3) de l'utilisateur 1	97
4.11	Questionnaire UX du casque de réalité augmentée (Page 1/3) de l'utilisateur 2	98
4.12	Questionnaire UX du casque de réalité augmentée (Page 2/3) de l'utilisateur 2	99
4.13	Questionnaire UX du casque de réalité augmentée (Page 3/3) de l'utilisateur 2	100
4.14	Extrait du fascicule d'utilisation du projecteur laser (1/5)	101
4.15	Extrait du fascicule d'utilisation du projecteur laser (2/5)	102
4.16	Extrait du fascicule d'utilisation du projecteur laser (3/5)	103
4.17	Extrait du fascicule d'utilisation du projecteur laser (4/5)	104
4.18	Extrait du fascicule d'utilisation du projecteur laser (5/5)	105
4.19	Questionnaire UX du laser de projection (Page 1/3)	106
4.20	Questionnaire UX du laser de projection (Page 2/3)	107
4.21	Questionnaire UX du laser de projection (Page 3/3)	108

Liste des tableaux

2.1	Ecart maximal pour les éléments horizontaux (panneaux) selon la norme de l'"EN1995-3"	24
3.1	Écarts entre les mesures relevées et les coordonnées théoriques sur les 9 points	44
3.2	Coordonnées relevées des neuf points de contrôle projetés	50
3.3	Commentaires des opérateurs et taux d'utilisation du casque	63
3.4	Taux d'utilisation du casque et commentaires	64
3.5	Tableau de suivi des caissons testés avec le système laser	74
3.6	Comparaison des contraintes d'usage	81
3.7	Comparaison économique des systèmes	83

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte

Le secteur de la construction est l'un des piliers de l'économie, générant à lui seul environ 9% du PIB de l'UE (Eurostat, 2023).

Cependant, au-delà de son importance économique, il joue également un rôle majeur dans le réchauffement climatique, représentant environ 21% des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale (2023 Global Status Report for Buildings and Construction, 2024). Ce constat met en évidence l'urgence de moderniser le secteur pour réduire son empreinte carbone.

Malgré ces enjeux, ce secteur a du mal à suivre le rythme des autres secteurs en matière de croissance et d'innovation. Sa productivité moyenne n'a progressé que de 1% par an au cours des 20 dernières années, un chiffre bien inférieur aux 2,8% de l'économie mondiale et aux 3,6% du secteur manufacturier (McKinsey & Company, 2017).

L'une des principales raisons de ce retard est l'adoption limitée des nouvelles technologies. Si l'on compare à l'industrie manufacturière, qui a largement intégré l'automatisation et l'optimisation des processus, le secteur de la construction utilise encore majoritairement des méthodes traditionnelles et une numérisation limitée. En effet, ce secteur fait partie des industries les moins numérisées au monde, selon l'indice de numérisation du McKinsey Global Institute (MGI) (McKinsey & Company, 2017).

Cette faible adoption technologique s'explique par la structure même du secteur qui, à la différence des industries manufacturières, où les processus sont standardisés, implique une multitude d'acteurs (architectes, ingénieurs, sous-traitants, fournisseurs) qui travaillent sur des projets uniques avant de se disperser par la suite (Wuni et al., 2024). Cette fragmentation freine l'intégration des innovations.

Pourtant, de nombreuses technologies susceptibles d'aider ce secteur voient le jour, comme par exemple l'impression 3D, la construction modulaire, la robotisation, l'automatisation ou encore l'intelligence artificielle.

Toutefois, le caractère traditionnel et conservateur du secteur, le manque de personnel qualifié, les coûts d'investissement élevés, ainsi que la complexité des projets et l'absence de coordination globale entre les acteurs sont des éléments qui ralentissent fortement l'adoption de ces technologies (Wuni et al., 2024).

Parmi les différents secteurs, la construction en bois se distingue de plus en plus comme une alternative durable et est en pleine expansion.

Comparé aux matériaux traditionnels à base de minéraux, le bois joue un rôle clé dans la diminution

des émissions de CO_2 grâce à sa capacité à stocker le carbone (Huang et al., 2024 ; UNECE, 2023).

L'intérêt grandissant pour ce secteur se reflète notamment dans la hausse significative du nombre de publications scientifiques sur le sujet. Cela montre qu'il existe un attrait accru de l'industrie pour des solutions de construction plus écologiques (Huang et al., 2024).

Cette dynamique soulève une question cruciale :

Quelle sera la première innovation à s'imposer à grande échelle dans ce secteur ?

Dans le même temps, une autre technologie pourrait jouer un rôle clé dans cette transition : la réalité augmentée (RA). Déjà adoptée dans des secteurs de pointe comme l'aéronautique, la médecine et l'automobile, elle s'implante de plus en plus dans les processus d'assemblage, de fabrication et de formation des professionnels.

Si la réalité augmentée a prouvé son efficacité dans ces domaines, pourquoi ne pourrait-elle pas révolutionner également le secteur de la construction, et plus particulièrement celui de la construction en bois ?

1.2 Objectif de recherche

Suivant ce qui a été exposé dans la problématique, les deux questions transversales auxquelles ce travail tentera de répondre sont :

- 1) " La réalité augmentée peut-elle améliorer les processus du secteur ou, au contraire, ne pas apporter de bénéfices concrets ? "
- 2) " Est-ce que les professionnels de la construction percevront-ils un réel intérêt à l'utilisation de la réalité augmentée et seront-ils prêts à l'adopter au quotidien ? "

Dans un premier temps, la méthodologie suivie sera exposée afin de replacer chronologiquement les étapes réalisées dans ce travail.

Dans un second temps, l'état de l'art visera à apporter la théorie nécessaire dans les différentes facettes de la problématique. À savoir :

- Premièrement, la construction bois, dans le but de comprendre les particularités de ce secteur tant au niveau de son évolution que des méthodes qui sont actuellement employées.
- Ensuite, la réalité augmentée afin de la définir et explorer ses origines et les endroits qui exploitent le plus cette technologie.
- Pour finir, ces deux facettes seront croisées pour explorer les atouts que la réalité augmentée a apportés dans le secteur de la construction en bois.
- Enfin, c'est l'aspect d'expérience utilisateur qui sera introduit dans l'état de l'art et qui aura pour objectif d'apporter la théorie nécessaire pour répondre à la seconde question de la problématique.

C'est ensuite sur base d'une étude expérimentale réalisée dans une entreprise de construction spécialisée dans le bois que ce travail cherchera à évaluer l'impact que la réalité augmentée peut avoir sur l'optimisation des processus tout en abordant l'aspect d'expérience utilisateur.

L'objectif final sera de déterminer si cette technologie peut prendre sa place dans la construction bois, tant d'un point de vue technique qu'en termes d'expérience utilisateur, et si elle peut s'y implanter durablement.

1.3 Méthodologie

Cette section propose une vue d'ensemble de la méthodologie déployée pour mener à bien ce travail. La figure suivante illustre deux éléments complémentaires qui ont structuré ce travail.

Sur la figure suivante se trouve, à gauche, le schéma méthodologique présente les différentes étapes du processus suivi pour la réalisation du TFE. Ce cadre, inspiré de la conception centrée utilisateur, a guidé la démarche adoptée et sera détaillé dans les sections suivantes.

Et à droite, la ligne du temps permet de visualiser la chronologie des phases du projet, depuis les premières recherches exploratoires en juin 2024 jusqu'aux expérimentations finales menées en mai 2025. Elle met en évidence l'articulation entre les étapes du processus et les contraintes temporelles liées au contexte de l'expérimentation réalisée dans une entreprise de construction .

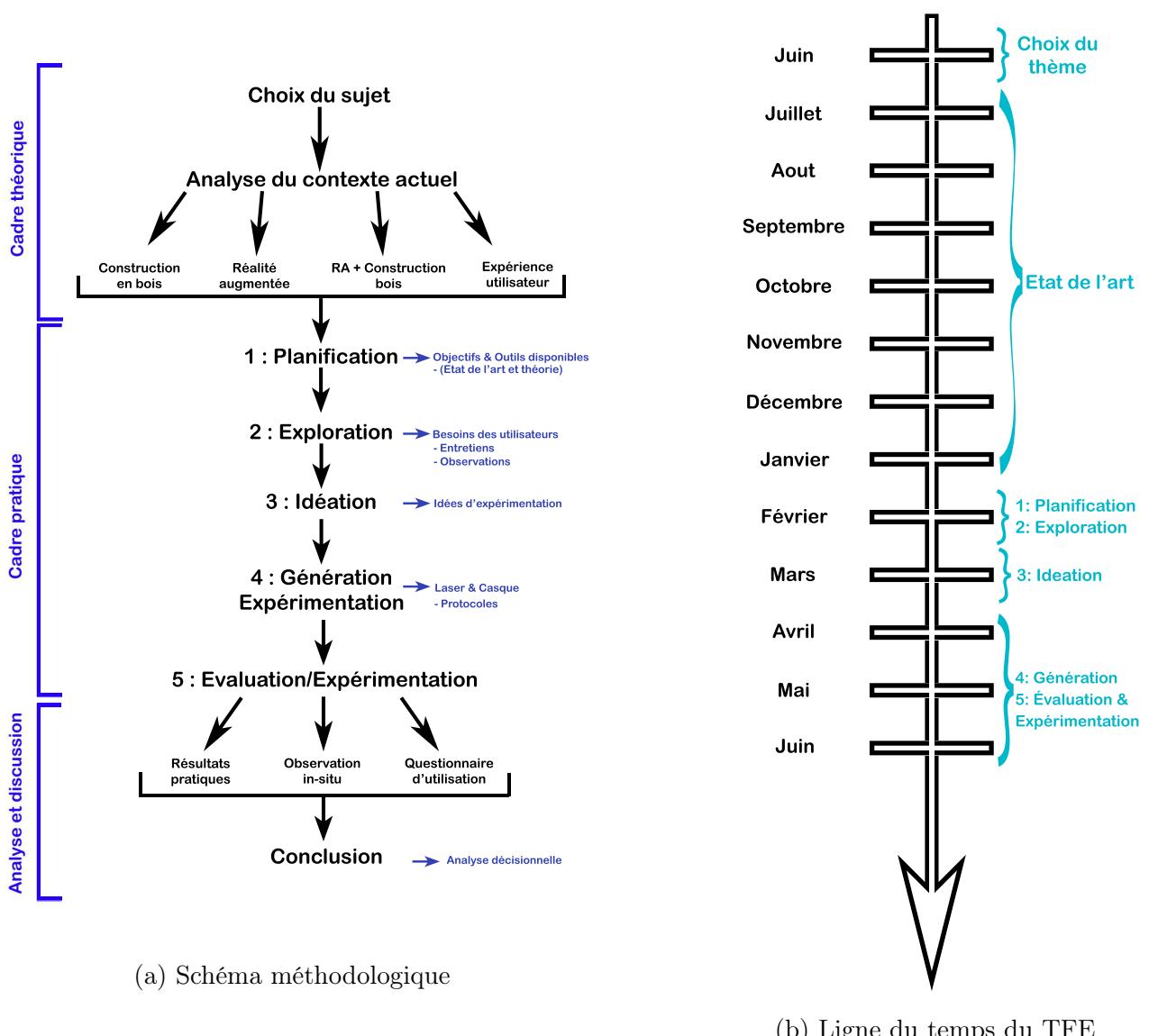


FIGURE 1.1 – Vue d'ensemble du cadre méthodologique (a) et de la chronologie du projet (b).

Terrain d'expérimentation

Le travail a été engagé durant le mois de juin 2024, lorsque l'entreprise SABEM, qui sera présentée plus en détail par la suite (voir 3.1.1), a exprimé son souhait de tester la réalité augmentée au sein de son atelier de préfabrication. Des essais préliminaires, portant sur l'utilisation de casques de réalité augmentée et de systèmes de projection laser dans l'atelier, avaient déjà été menés par l'entreprise. Bien que les résultats aient été peu concluants, celle-ci souhaitait néanmoins poursuivre les expérimentations.

En parallèle, démarrait le projet WAL4XR, financé par la Région Wallonne. Ce projet a pour objectif de développer des solutions immersives et interactives basées sur la réalité étendue (XR), regroupant réalité virtuelle, augmentée et mixte. Il vise à répondre aux enjeux des industries modernes en facilitant la collaboration, la formation, la maintenance et le prototypage dans des environnements numériques enrichis.

Le LUCID, laboratoire de recherche de la Faculté des Sciences appliquées de l'Université de Liège, développe des méthodes et outils innovants pour le design et l'apprentissage du design dans des domaines variés tels que l'architecture, l'ingénierie ou encore les activités collaboratives. Il participe au projet en tant que responsable de l'axe « XR4Users », centré sur l'expérience utilisateur et l'acceptabilité des technologies XR. Il est chargé de spécifier les besoins des utilisateurs, de coordonner les tests des démonstrateurs, et d'analyser les usages dans des contextes hybrides mêlant espaces physiques et virtuels.

C'est dans ce contexte qu'a débuté la première phase, consacrée à la construction de l'état de l'art. Très vite, la notion d'« expérience utilisateur » a été introduite afin d'évaluer l'impact de l'intégration de la réalité augmentée dans le secteur de la construction, encore peu digitalisé.

Ainsi, de juin 2024 à janvier 2025, la recherche documentaire s'est articulée autour de quatre thématiques principales :

- La construction en bois
- La réalité augmentée
- La réalité augmentée dans la construction en bois
- L'expérience utilisateur

Cette recherche a permis de faire le point sur les études existantes et de créer des liens entre ces quatre thématiques.

La phase pratique a débuté en février 2025 et a été développée selon le processus de conception issu du livre de Lallemand et Gronier (2015), afin d'orienter au maximum cette phase vers les utilisateurs. Ce processus, découpé en cinq étapes, a été choisi pour garantir une solution centrée sur les besoins réels des utilisateurs, avec l'objectif de proposer une solution viable à long terme.

La phase pratique s'est déroulée entre février et juin, en fonction des disponibilités de Sabem et du calendrier global du travail. Elle n'a donc pas pu commencer plus tôt, ni se prolonger au-delà de la date de remise du TFE.

Le mois de février a été consacré aux deux premières phases du processus pratique :

- La phase de planification, centrée sur la découverte des techniques de production actuelles et l'identification des objectifs visés par l'utilisation de la réalité augmentée.
- La phase d'exploration, visant principalement à recenser les besoins des utilisateurs.

Le mois de mars a été principalement dédié à la phase d'idéation, avec la réalisation de premiers

tests et l'identification de nouvelles contraintes à prendre en compte pour les expérimentations futures.

Les phases 4 et 5 ont été entamées à partir du 28 mars (date de réception du casque de RA) et se sont poursuivies jusqu'au début du mois de juin. Ces étapes ont été consacrées à l'élaboration des protocoles, ainsi qu'à la mise en place des phases d'expérimentation.

Il est important de souligner que des allers-retours ont dû être réalisés entre les différentes phases, et que le processus n'a pas été linéaire pour deux raisons principales :

1. Le travail s'est déroulé au sein d'une entreprise, ce qui a impliqué de planifier les entretiens, essais et observations en fonction des disponibilités de celle-ci. Il était essentiel de ne pas perturber la production, et de s'appuyer sur les projets en cours pour construire l'étude, sans imposer de contraintes extérieures.
2. Les technologies testées ont été rendues disponibles de manière progressive, à des dates qui n'étaient pas fixées à l'avance. Au début de la phase pratique, en février, aucun accord n'avait encore été conclu avec les fournisseurs des équipements de réalité augmentée. Ainsi, chaque décision a été prise au fil de l'avancement et des opportunités, en fonction de l'évolution de l'expérimentation.

Chapitre 2

Revue de littérature

La section suivante constitue une introduction théorique aux quatre axes principaux de ce travail : la construction bois, la réalité augmentée, l'utilisation de la réalité augmentée dans la construction bois, ainsi que l'expérience utilisateur. Ces thématiques, bien que distinctes, sont étroitement liées dans le cadre de cette recherche.

Étant donné le caractère pluridisciplinaire du sujet, cette revue de littérature vise à introduire les différentes thématiques abordées, afin que chaque lecteur puisse se familiariser avec les autres domaines traités et en comprendre les enjeux.

- La construction en bois ([2.1](#))
- La réalité augmentée ([2.2](#))
- La réalité augmentée dans la construction en bois ([2.3](#))
- L'expérience utilisateur "UX" ([2.4](#))

2.1 La construction en bois

La section suivante vise à contextualiser la construction en bois en retraçant l'origine du matériau et son utilisation actuelle en Belgique. Après avoir présenté les essences de bois et leurs caractéristiques, l'accent sera mis sur les systèmes constructifs, en particulier la construction à ossature bois. Ce dernier point fera l'objet d'une analyse un peu plus approfondie, car il constitue le cœur de ce travail.

2.1.1 Historique et avantage du bois

Le bois est utilisé dans la construction depuis plus de 10 000 ans. Cependant, en raison des nombreux préjugés existants sur la construction en bois et de l'émergence de la maçonnerie, ce matériau a été de moins en moins utilisé, pour finalement être employé principalement en charpente (Buildwise, 2013).

Toutefois, avec la crise pétrolière de 1970, le secteur de la construction a commencé à réutiliser le bois, car il s'agit du seul matériau renouvelable et biodégradable.

Par la suite, l'utilisation du bois a également été encouragée lors du sommet de Rio en juin 1992 et par celui de Kyoto en 1997 (Gauzin-Müller, 1999).

Outre l'aspect écologique du bois et le fait qu'il stocke du CO_2 , ce qui permet de réduire l'effet de serre, le matériau bois a de nombreux avantages, tant du point de vue technique que pour sa résistance élevée.

En effet, le bois est un matériau facile à travailler, ce qui fait qu'il peut être aussi bien adapté à des utilisations artisanales qu'industrielles. D'autant plus que sa légèreté permet de construire des éléments à la fois peu massifs et résistants (Gauzin-Müller, 1999).

Dans la construction, il se retrouve pratiquement toujours dans des éléments préfabriqués, et c'est cet aspect de la préfabrication qui permet de réduire les délais de construction tout en conservant la flexibilité architecturale que le bois peut apporter.

Ce sont ces nombreux avantages qui justifient son regain d'intérêt dans le secteur de la construction. Par exemple, en Belgique, le nombre d'entreprises actives dans ce domaine est passé de 100 en 2011 à 150 en 2022, témoignant d'un essor significatif du secteur (Hout Info Bois, 2023).

2.1.2 Note sur les essences de bois et leur classification

Des informations complémentaires sur les essences de bois (résineux et feuillus), leurs propriétés mécaniques ainsi que les principaux types de produits en bois utilisés en construction sont disponibles en annexe (voir [4.4.0.1](#)).

Ces éléments, bien que non essentiels à la compréhension du cœur du travail, peuvent être utiles pour contextualiser certains termes techniques employés dans le TFE.

2.1.3 Les systèmes constructifs de la construction en bois

Ce travail se focalise sur la construction en ossature bois, et plus particulièrement sur les opportunités offertes par la préfabrication pour optimiser les processus de fabrication. Dans cette perspective, et afin d'explorer le potentiel de la réalité augmentée comme technologie émergente dans ce domaine, cette section vise à différencier les principaux systèmes constructifs actuellement utilisés dans la construction en bois.

Quatre systèmes constructifs principaux sont recensés :

- Le système poteaux-poutres
- La construction en madriers
- La construction en panneaux préfabriqués en bois massif (CLT)
- La construction à ossature en bois

Ces systèmes s'appuient sur l'utilisation de produits spécifiques provenant de l'industrie du bois, mentionnés précédemment.

La section suivante décrira ces différents systèmes en précisant les secteurs où ils sont le plus utilisés ainsi que les principaux produits qu'ils emploient. Une attention particulière sera accordée à la 'construction à ossature en bois', car c'est sur ce système constructif que portera la partie pratique.

Le système poteaux-poutres

Ce système constructif est le moins utilisé en Belgique, avec seulement 1,33 % des nouvelles constructions en 2022, dont 1,20 % dans le secteur résidentiel (Hout Info Bois, 2023). Le principe de ce système est illustré dans la figure suivante (2.1).

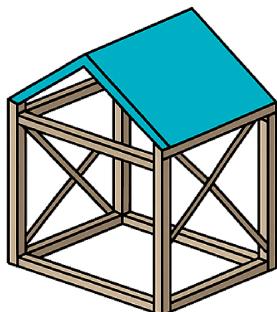


FIGURE 2.1 – Représentation schématique du système constructif poteaux-poutres

1. Principe

Cette méthode consiste à concevoir une structure ouverte avec un nombre limité d'éléments porteurs de grande section. Les poteaux verticaux sont disposés selon une trame avec des espacements réguliers et significatifs (de 0,9 m à plusieurs mètres) et sont reliés par des poutres horizontales. Les charges des planchers et de la toiture se concentrent ainsi sur ces éléments.

2. Type de produit utilisé

Les poteaux et les poutres sont fabriqués en bois massif ou en bois contrecollé (lamellé-collé, poutres composites, etc.).

Selon la portée à couvrir, ce système peut nécessiter des sections pouvant être conséquentes, d'autant plus qu'aucun élément structurel intermédiaire n'est présent.

3. Secteur d'utilisation

Ce mode de construction est principalement caractérisé par de grands volumes et de larges ouvertures, ce qui le rend mieux adapté pour les bâtiments industriels, tertiaires ou éducatifs, qu'ils soient de forme simple ou plus complexe (Buildwise, 2013).

La construction en madriers

Ce système constructif reste peu répandu en Belgique car il ne représente en 2022 que 2,57 % des nouvelles constructions et 7,43 % des réalisations dans le secteur résidentiel (Hout Info Bois, 2023). Le principe de ce système est représenté dans la figure suivante (2.2).

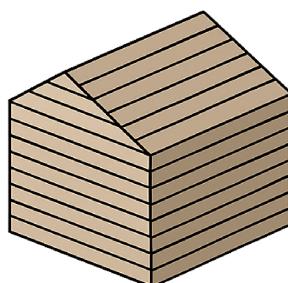


FIGURE 2.2 – Représentation schématique du système constructif en madriers.

1. Principe

Ce système repose sur l'assemblage de rondins ou de madriers à mi-bois selon deux méthodes de pose :

- l'empilement horizontal ;
- la juxtaposition verticale.

L'empilement horizontal consiste à superposer des pièces de bois pour former un mur massif dans lequel chaque élément est placé horizontalement au-dessus du précédent (Buildwise, 2013).

2. Type de produit utilisé

Les bois utilisés sont généralement des bois massifs qui sont entaillés afin de s'emboîter les uns dans les autres. Toutefois, il existe aussi des produits transformés, comme les "madriers sandwichs", qui intègrent une couche d'isolation au cœur du madrier afin d'améliorer le confort thermique du bâtiment.

3. Secteur d'utilisation

Le bois massif empilé est principalement utilisé dans les régions forestières du nord de l'Europe où il est souvent associé à l'image du « chalet de montagne », il reste moins répandu dans nos régions.

La construction en panneaux préfabriqués en bois massif (CLT)

La construction en panneaux préfabriqués en bois massif est un système en plein essor en Belgique. En 2022, elle représentait 13,23% des nouvelles constructions et 0,84 % de celles du secteur résidentiel (Hout Info Bois, 2023). Une représentation schématique de ce principe est proposée dans la figure suivante (2.3).

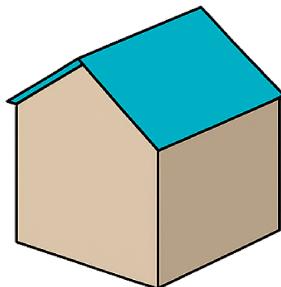


FIGURE 2.3 – Représentation schématique du système constructif en panneaux préfabriqués en bois massif (CLT)

1. Principe

Ce système constructif est relativement récent puisqu'il est apparu dans les années 1990. Le principe repose sur l'assemblage de planches de bois massif croisées où chacune est orientée à 90° par rapport au sens du grain.

2. Type de produit utilisé

Le CLT est composé de planches de bois massif disposées en couches croisées (généralement 3, 5, 7 ou 9) qui sont assemblées à l'aide de colles structurelles haute performance.

3. Secteur d'utilisation

Les dimensions des panneaux sont conçues pour s'adapter à une grande variété d'éléments, avec par exemple, la possibilité d'intégrer directement des ouvertures lors de la fabrication.

Le CLT est principalement utilisé dans la construction de grands bâtiments puisque le secteur résidentiel est le plus souvent à la recherche de solutions plus économiques et priviliege donc des

sections de bois standard disponibles sur le marché.

Un atout majeur du CLT réside dans la réduction significative du nombre d'éléments constructifs à assembler, ce qui accélère considérablement le processus de montage.

La construction à ossature en bois

La construction à ossature bois représente la majeure partie du marché de la construction bois. En 2022, elle a constitué 82,88 % des nouvelles constructions et 90,54 % des nouvelles constructions dans le secteur résidentiel (Hout Info Bois, 2023). La logique constructive du système est exposée dans la figure suivante (2.4).

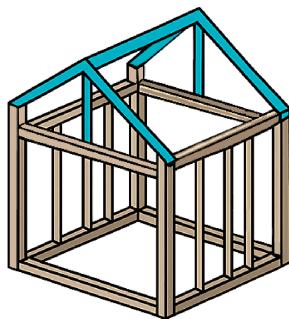


FIGURE 2.4 – Représentation schématique du système constructif en panneaux préfabriqués en bois massif (CLT)

1. Principe

Ce système constructif se caractérise par l'utilisation de montants (éléments verticaux) et de traverses (éléments horizontaux) disposés à intervalles réguliers. L'intervalle entre les montants est réduit en raison des dimensions des panneaux d'ossature, ce qui entraîne l'utilisation de sections plus petites. Les panneaux d'ossature sont cloués ou agrafés aux cadres en bois et ont pour rôle de rigidifier la structure en agissant comme contreventement. Les espaces générés entre les montants sont généralement remplis d'isolant afin d'améliorer les performances thermiques et de compenser les faiblesses induites par les montants et les traverses.

2. Type de produit utilisé

Les sections de bois vont varier selon la nature de l'ossature à construire. Ce type de système constructif utilise principalement du bois brut mais, pour des ossatures de plus grande envergure (lorsque les charges à reprendre ou la hauteur sont importantes), des sections en bois lamellé-collé peuvent être utilisées.

3. Secteur d'utilisation

Si ce système a su s'imposer et devenir le système le plus utilisé, c'est principalement grâce à sa capacité à pouvoir être facilement préfabriqué.

La préfabrication a fait ses preuves dans l'ensemble des secteurs de la construction, car elle permet de réaliser des éléments dans un environnement stable, protégé des aléas climatiques et garantissant des conditions de travail constantes, propices à la précision d'exécution.

Les ossatures préfabriquées présentent également un contrôle qualité significativement meilleur et une réduction importante des déchets (Buildwise, 2023).

Une fois préfabriquées, les ossatures n'ont plus qu'à être assemblées les unes avec les autres sur site pour former les murs, les planchers,...

Les ossatures seront pratiquement toujours construites selon le même principe. Ce principe sera détaillé plus tard dans la partie pratique, où les étapes de production d'un caisson d'ossature en bois "classique" seront expliquées (voir [3.2.1](#)).

Cependant, la méthode de fabrication d'une même ossature peut varier complètement d'une entreprise à l'autre. Le facteur à l'origine de cette différence provient des machines utilisées. Certaines entreprises sont complètement automatisées, utilisant des bras robotiques et des ponts de montage dans leur production. Dans ce type de fonctionnement, les opérateurs ont pour rôle de contrôler les machines.

D'autres entreprises sont moins, voire pas du tout automatisées ; ce sont donc les opérateurs qui mènent l'ensemble des tâches de fabrication, comme le clouage, le vissage, le positionnement des montants ou encore la prise de mesures.

2.2 Réalité augmentée

2.2.1 Distinctions et classifications des réalités numériques

Avant d'aborder la **réalité augmentée**, il est essentiel de revenir sur la **réalité virtuelle**, plus connue du grand public. Cette comparaison aide à mieux situer les technologies immersives entre monde réel et monde virtuel.

Le terme **réalité virtuelle** est souvent utilisé pour désigner différentes technologies, qui offrent pourtant des expériences variées, mais sont regroupées sous l'appellation "VR".

Pour mieux distinguer ces technologies, il est essentiel de revenir à l'origine et à la signification du terme réalité virtuelle.

Le **réel** correspond à tout ce qui existe et nous entoure, indépendamment de notre volonté. C'est l'interaction que nous entretenons avec ce réel qui définit notre réalité empirique. La **réalité**, de façon plus globale, provient de l'interaction entre nous et le monde. De ce fait, elle est propre à chacun et dépend des interactions vécues (Chagnon, 2020).

Le terme **virtualité**, dans le contexte des technologies modernes, désigne des environnements ou des expériences créés numériquement. Ceux-ci offrent des interactions et des perceptions qui ne sont pas présentes dans la réalité physique immédiate (Cattan, 2021).

La réalité virtuelle se définit à travers l'interaction entre ces deux concepts.

Selon Milgram et Kishino (1994), un environnement de Réalité Virtuelle se définit comme un espace numérique immersif dans lequel l'utilisateur peut interagir. Ce monde artificiel peut simuler des environnements réels ou imaginaires, mais aussi dépasser les lois physiques habituelles, en modifiant des concepts fondamentaux tels que l'espace, le temps ou la matérialité.

Selon le degré d'immersion dans l'environnement qui peut être complètement digital ou complètement réel, d'autres notions introduisant la réalité sont établies. Une distinction est ainsi établie entre la réalité virtuelle (VR ou RV), la réalité augmentée (AR ou RA) et la réalité mixte (MR ou RM). Ces 3 notions étant communément regroupées sous le terme Réalité étendue.

Le continuum réalité-virtualité, décrit par Milgram en 1996, permet de visualiser les différentes interactions entre ces notions. La figure ci-dessous en donne une représentation visuelle (2.5).

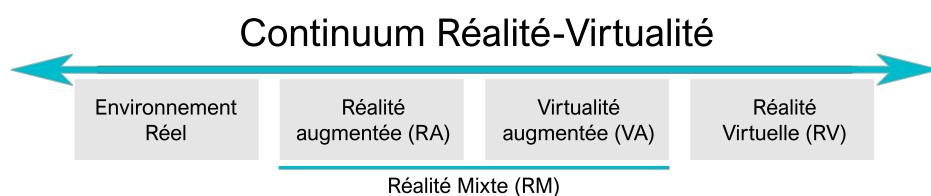


FIGURE 2.5 – Le continuum Réalité-Virtualité, Adapté de Milgram (1996)

La différence entre la réalité augmentée et la réalité mixte réside dans la manière dont les entités virtuelles interagissent avec le monde réel.

Si l'ajout d'entités virtuelles permet uniquement d'améliorer la perception du monde réel sans modifier son essence et que l'interaction avec ces entités vise seulement à enrichir l'observation, il est question de **réalité augmentée** (Fuchs, 2018, p. 28).

Tandis que si l'ajout d'entités virtuelles permet de créer un environnement hybride combinant monde réel et éléments virtuels, où l'utilisateur peut interagir avec ces derniers, cela relève de la **réalité mixte** (Fuchs, 2018, p. 28).

Cette distinction entre les différentes formes de réalité numériques est synthétisée dans la figure suivante (2.6), qui propose une représentation visuelle comparative entre réalité augmentée, réalité virtuelle et réalité mixte.



FIGURE 2.6 – Comparaison entre réalité augmentée (AR), réalité virtuelle (VR) et réalité mixte (MR).
source : <https://okss17.tistory.com/197>

Les concepts présentés précédemment s'appliquent principalement aux expériences rendues possibles par les casques de réalité augmentée ou mixte. Cependant, la réalité augmentée couvre un champ plus large. Il existe d'autres approches, comme la **réalité augmentée spatiale (SAR)**, qui enrichit des objets physiques à l'aide d'images projetées directement dans l'environnement de l'utilisateur, et non uniquement dans son champ de vision. Par exemple, ces images peuvent être projetées sur des objets réels à l'aide de projecteurs lumineux ou intégrées dans l'environnement grâce à des écrans plats (Raskar et al., 1999).

L'avantage de la réalité augmentée spatiale réside dans sa capacité à offrir une expérience collective, en opposition à l'immersion individuelle que propose un casque. Elle permet ainsi à plusieurs utilisateurs d'explorer ensemble un objet, aussi bien visuellement que par des interactions physiques, et ce, en temps réel (Calixte, Leclercq, 2017).

2.2.2 Historique de la réalité augmentée

La première trace de la réalité augmentée, qui ne portait pas encore ce nom à l'époque, remonte à 1968, lorsque le pionnier de l'infographie Ivan Sutherland et ses étudiants ont développé le premier visiocasque.

En raison de son poids, il devait être suspendu au plafond et a été surnommé, à juste titre, « l'épée de Damoclès ». Ce dispositif, représenté dans la figure suivante (2.7), incluait déjà un système de suivi de la tête et utilisait des optiques transparentes (Sutherland, 1968).

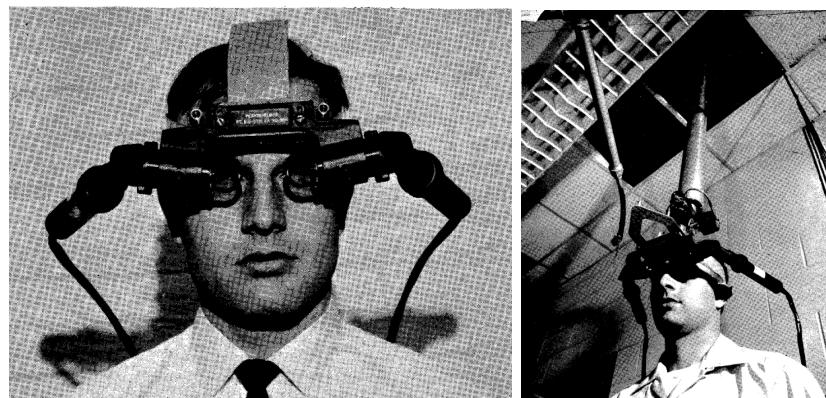


FIGURE 2.7 – Le premier casque de réalité augmentée, développé par Ivan Sutherland en 1968.
Source : <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/1476589.1476686>

C'est en 1992 que le terme « réalité augmentée » est apparu pour la première fois, à l'occasion du développement d'un casque par David Mizell pour l'entreprise Boeing (illustré à la figure suivante 2.8). Celui-ci visait à aider les ouvriers lors de l'assemblage de faisceaux de câbles (Adam, 1993).



FIGURE 2.8 – Casque de réalité augmentée utilisé dans l'assemblage chez Boeing (1992).
Source : image reproduite depuis Ali & Rahaman (2022), d'après Mizell, D. (1992) <https://www.researchgate.net/publication/363915436>

La réalité augmentée a poursuivi son développement, donnant lieu à l'émergence de nouveaux moyens d'expérimentation, tels que le premier système autonome portable de réalité augmentée fonctionnant sur un PocketPC (HP), associé à une caméra directement connectée à l'appareil. Ce dispositif peut être considéré comme un précurseur des tablettes modernes, dans la mesure où il associait portabilité, interface tactile et capacités de traitement graphique (Wagner & Schmalstieg, 2003).

2.2.3 Exploration des dispositifs actuels de réalité augmentée

Les avancées se sont poursuivies au fil des années, avec pour objectif constant de rendre l'utilisation de la réalité augmentée plus intuitive, portable et intégrée au quotidien. Aujourd'hui, la réalité augmentée peut être expérimentée principalement de trois façons : à travers des dispositifs mobiles (smartphones et tablettes), des casques de réalité augmentée, ou encore par projection spatiale, également appelée réalité augmentée spatiale (SAR).

2.2.3.1 Smartphones et tablettes avec applications RA (Monitor-based)

Dans le cas des smartphones ou tablettes, des applications peuvent être utilisées pour expérimenter la RA. Celles-ci fonctionnent en utilisant la caméra de l'appareil afin de capturer l'environnement réel. L'image détectée passe ensuite par des algorithmes de vision pour détecter les surfaces et permettre à l'appareil de se positionner dans l'environnement.

Il utilise ses capteurs tels que l'accéléromètre, le gyroscope ou encore le GPS pour pouvoir réagir aux mouvements et se repositionner dans l'espace.

Certains smartphones ou tablettes incluent des capteurs LiDAR qui utilisent des impulsions laser pour mesurer les distances et créer des nuages de points 3D, ce qui leur permet d'augmenter la précision. Certaines applications utilisent des marqueurs QR code qui sont reconnus par l'application et servent de points d'ancrage, permettant de positionner les objets virtuels avec précision en utilisant le QR code comme axe d'origine du repère. Ce dispositif est illustré dans la figure suivante (2.9).

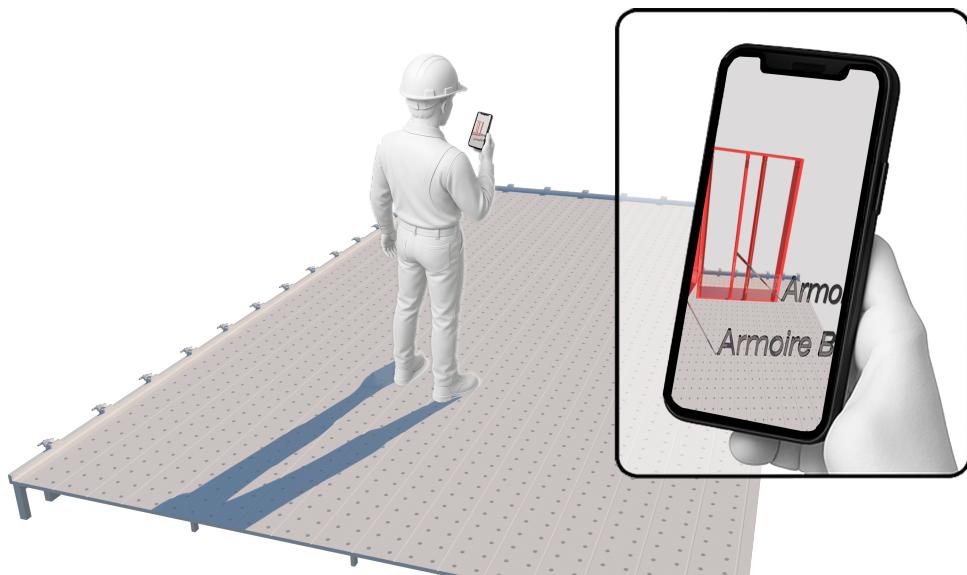


FIGURE 2.9 – Utilisation de smartphone avec application de RA

2.2.3.2 Casques et lunettes de réalité augmentée

Les casques ou lunettes de réalité augmentée permettent de superposer des éléments virtuels directement dans le champ de vision de l'utilisateur.

Deux systèmes sont, à l'heure actuelle, principalement utilisés :

- Le « video see-through » désigne un dispositif (généralement un casque) qui utilise une caméra pour filmer l'environnement et qui contient des écrans affichant à la fois le flux vidéo et les éléments virtuels. C'est le cas, par exemple, du casque Vision Pro (Apple).
- L'« optical see-through » est différent dans la mesure où les éléments virtuels sont projetés directement sur des lentilles transparentes, permettant ainsi de voir le monde réel augmenté par des informations virtuelles. Cette technologie est notamment utilisée dans le casque HoloLens (Microsoft).

De manière similaire aux smartphones et tablettes, les casques utilisent des capteurs pour analyser l'espace environnant et créer une cartographie en trois dimensions.

Certains casques peuvent également utiliser des points d'ancrage ou des marqueurs visuels, comme des QR codes, pour améliorer la précision du positionnement des hologrammes. Ce dispositif est illustré dans la figure suivante (2.10).

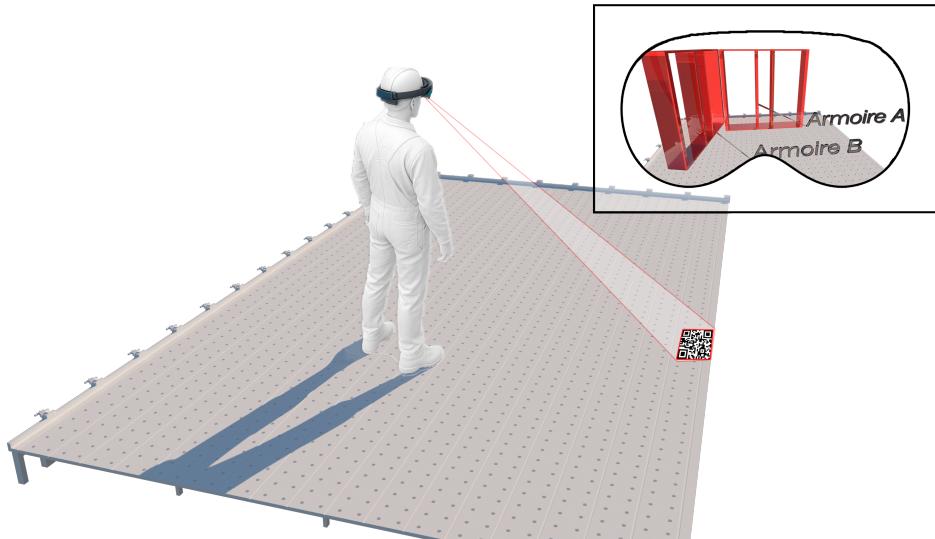


FIGURE 2.10 – Utilisation d'un casque de réalité augmentée

2.2.3.3 Projecteurs et dispositifs de réalité augmentée spatiale

Les projecteurs permettent d'expérimenter la réalité augmentée sans avoir besoin de porter un appareil (casque ou lunettes), puisque les éléments sont directement projetés dans l'environnement réel à l'aide d'une projection classique (par lumière) ou par des lasers.

Dans le cas des lasers, ils doivent être calibrés pour s'adapter à la zone de projection grâce à des mires qui réfléchissent le faisceau laser, permettant ainsi au projecteur d'identifier la zone de projection et la distance par rapport à celle-ci. Ce dispositif est illustré dans la figure suivante (2.11).

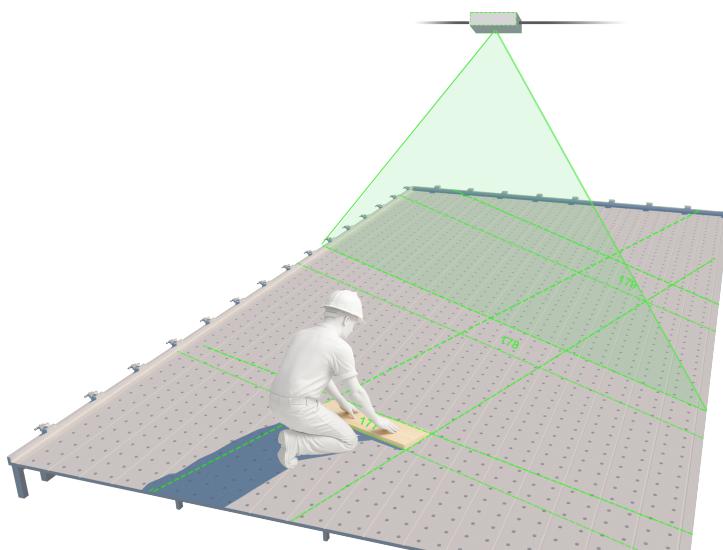


FIGURE 2.11 – Utilisation d'un projecteur laser (réalité augmentée spatiale)

2.2.4 La RA dans la construction (AEC)

L'intérêt pour l'adoption de la réalité augmentée dans le secteur de l'AEC regroupant : Architecture, Ingénierie et Construction ne cesse de grandir. De nombreux articles parcourent les domaines d'utilisation de cette technologie dans le but d'en prouver l'intérêt et d'établir les limites actuelles qui sont rencontrées. Un grand nombre de produits et de logiciels voient le jour dans le but d'élargir leur utilisation aux différentes phases de construction, à savoir durant les étapes de :

- Conception du projet (Design)
- Fabrication et assemblage
- Sécurité
- Formation et apprentissage
- Exploitation et maintenance

La partie pratique de ce travail se concentrera sur l'utilisation de la réalité augmentée pendant la phase de fabrication et assemblage. Cependant, cette partie théorique montre que ses applications vont bien au-delà, et peuvent s'étendre à l'ensemble du cycle de vie du bâtiment.

1. Conception du projet (Design)

La RA peut être utilisée durant la phase de conception du projet afin de permettre aux concepteurs une visualisation directe sur site de leurs modélisations. Cela facilite notamment la prise de décision et la compréhension des éléments dans leur contexte réel. Cet aspect est développé dans les articles suivants :

Dan et al. (2021) recourent à la réalité augmentée pour visualiser et ajuster en temps réel des objets 3D directement sur site, facilitant leur intégration au contexte réel. Leur outil Holo-Designer améliore ainsi la conception intuitive et interactive pour les designers.

Carrasco et Chen (2021) l'utilisent dans la phase de conception du projet pour améliorer la compréhension des designs architecturaux. Grâce à elle, les étudiants peuvent visualiser des modèles 3D à échelle réelle, ce qui facilite la prise de décision et la communication des idées dès les premières étapes de la conception.

Pour ce qui est de la réalité augmentée spatiale dans cette phase de conception, Calixte et Leclercq (2017) s'appuient sur cette technologie pour faciliter la co-conception en projetant des informations sur des surfaces physiques partagées, permettant une interaction collective en temps réel. Cette approche renforce la synchronisation cognitive et la collaboration entre concepteurs dès les premières étapes du projet.

2. Fabrication et assemblage

La réalité augmentée peut également être utilisée directement durant les étapes de fabrication afin de faciliter le processus de production, en ajoutant des repères visuels pour les opérateurs. Ces derniers n'ont alors plus besoin de se référer aux plans de fabrication, mais peuvent suivre en temps réel les indications fournies par leur casque ou tout autre dispositif de RA. De nombreux articles et produits émergent dans ce domaine afin d'assister les opérateurs ; c'est par exemple le cas de :

Chai, Guo et Yuan (2021) qui mobilisent la RA pour guider la fabrication et l'assemblage de structures en bois lamellé-collé à double courbure. En projetant les modèles numériques sur l'espace physique via un casque, les opérateurs peuvent ajuster avec précision la forme des composants, réduisant ainsi les erreurs et les besoins en outillage traditionnel.

C'est notamment le cas d'entreprises comme Mechasy, qui ont développé des projecteurs XR capables de projeter des repères laser directement sur les surfaces, guidant ainsi les opérateurs avec une grande précision tant sur chantier qu'en atelier.

3. Sécurité

La réalité augmentée offre de nouvelles perspectives pour améliorer la sécurité sur les chantiers de construction. En superposant des informations à l'environnement réel, elle permet d'anticiper les risques, de guider les actions des travailleurs en temps réel et de renforcer la compréhension des situations dangereuses sans interrompre l'activité.

Wu et al. (2022) exploitent la RA pour améliorer la sécurité des travailleurs sur les chantiers. En utilisant un casque HoloLens 2, leur système envoie des alertes visuelles en temps réel lorsqu'un danger imminent est détecté, comme la proximité d'un engin mobile. Grâce à la RA, les travailleurs reçoivent ces avertissements sans interruption de leur activité dans le but d'augmenter leur vigilance et leur réactivité.

Dai et al. (2021) explorent son utilisation pour renforcer la communication des risques sur les chantiers. Grâce à un casque HoloLens, les travailleurs peuvent partager leur champ de vision avec des collègues à distance, facilitant l'annotation visuelle et la coordination en temps réel. Cette approche immersive améliore la précision et la réactivité dans l'identification des dangers, comparée aux méthodes de communication traditionnelles.

4. Formation et apprentissage

La réalité augmentée offre aux apprentis la possibilité de se former dans des environnements immersifs avant toute mise en situation réelle.

Elle est notamment utilisée pour l'apprentissage de la manipulation d'engins de levage (ponts roulants, grues, etc.) ou pour simuler des scénarios de maintenance. Cette approche permet non seulement de limiter les coûts liés à la formation sur site, mais aussi de renforcer l'efficacité pédagogique grâce à une mise en pratique sécurisée et interactive.

Au-delà de ces aspects pratiques, Song et al. (2021) mettent en évidence l'efficacité de la RA dans l'apprentissage de la conception architecturale. En combinant RA et fabrication numérique, les étudiants interagissent avec des prototypes immersifs à échelle réelle, renforçant leur compréhension spatiale, leur autonomie et leurs compétences en conception.

5. Exploitation et maintenance

Avec la croissance du BIM et des jumeaux numériques, l'accès à des données précises et actualisées sur les bâtiments devient plus simple, ce qui renforce l'efficacité des outils de maintenance basés sur la réalité augmentée. De nombreux travaux explorent déjà ces applications.

Baek et al. (2019) exploitent la réalité augmentée pour optimiser la maintenance des bâtiments grâce à la visualisation en temps réel des éléments techniques. En combinant RA, localisation par image et données BIM, les gestionnaires peuvent localiser et inspecter les installations, telles que les canalisations, directement sur le site, ce qui améliore la réactivité et la précision des interventions.

Tsai et al. (2022) l'exploitent pour améliorer la coordination des systèmes MEP (Mécanique, Électricité & Plomberie) directement sur le chantier. Leur méthode permet aux techniciens d'inspecter et de reconfigurer automatiquement les trajets de conduites en cas de conflit, tout en respectant les critères de maintenance et de constructibilité. Grâce à la RA, les solutions sont visualisées en temps réel, ce qui facilite l'adaptation rapide aux imprévus du terrain.

Des entreprises comme Dalux ont développé des outils combinant réalité augmentée et BIM pour faciliter l'exploitation et la maintenance. Leur solution permet de visualiser en temps réel les éléments techniques sur site, d'accéder aux données associées et de documenter les interventions, améliorant ainsi l'efficacité et la réactivité (Dalux, s.d.).

2.3 La RA dans la construction en bois

La littérature combinant réalité augmentée et construction en bois est encore très limitée. Au total, 13 articles ont été recensés sur ScienceDirect, MDPI, ResearchGate et IEEEXplore. Ces travaux explorent l'application de la réalité augmentée dans le domaine de la construction en bois, offrant ainsi certaines similitudes avec les recherches présentées dans cette étude.

L'objectif est d'analyser et de synthétiser le contenu de ces articles afin d'identifier les avancées actuelles dans l'intégration de la réalité augmentée dans ce secteur.

Une première distinction entre ces études peut être établie en fonction des dispositifs utilisés, notamment les casques HMD (Head-Mounted Display), les appareils mobiles (smartphones ou tablettes) et les projecteurs.

Parmi ces technologies, les **casques de réalité augmentée** restent les plus couramment employés et remplissent diverses fonctions, comme en témoignent les articles suivants :

Kyaw et al. (2023) visent à montrer que l'utilisation de marqueurs QR sur les poutres en bois lamellé-collé permet d'augmenter la précision de fabrication en réalité augmentée permettant ainsi de valider l'AR pour des applications de haute précision.

Amtsberg et al. (2023) explorent la collaboration entre humains et robots pour la préfabrication de structure en bois, dans le but d'améliorer la flexibilité des processus en combinant les compétences humaines avec la précision des machines, via un système de gestion de fabrication et la réalité augmentée.

Blahut & Harnoncourt-Fuchs (2023) étudient l'usage de la réalité mixte pour faciliter l'assemblage d'une tour en bois en extérieur. Ils mettent en évidence des problèmes de visibilité en extérieur à cause du soleil et visent à évaluer comment les représentations interactives en MR peuvent améliorer la précision, la collaboration et l'accessibilité des processus de fabrication.

Fazel & Adel (2024) expérimentent l'exploitation de la réalité augmentée dans le but d'améliorer la précision, la productivité et la sécurité dans l'assemblage du bois, en réduisant les erreurs humaines lors du vissage et du clouage.

Kaiser et al. (2021) investiguent l'intégration de travailleurs humains dans un système de fabrication flexible et reconfigurable pour la construction en bois, en utilisant la RA comme interface pour améliorer la collaboration entre opérateurs et machines.

Potseluyko et al. (2022) démontrent qu'une plateforme ludique combinée au BIM facilite la visualisation, améliore la satisfaction client et automatise la création d'un configurateur de maison en RA et RV.

Settimi et al. (2024) illustrent le potentiel de la RA pour assister les artisans, en combinant reconnaissance visuelle, ajustement automatique et guidage en réalité augmentée pour optimiser les tâches de découpe et perçage du bois, grâce au logiciel de détection TTool qui est supervisé par IA.

Suzuki et al. (2020) explorent l'utilisation de la RA pour guider les artisans dans l'assemblage du bois traditionnel japonais "Kumiki" dans le but d'améliorer la compréhension des processus complexes en affichant des instructions en 3D et en testant l'efficacité du système de guidage Holonavi.

Jahn et al. (2022) explorent l'usage de la réalité augmentée via les casques HoloLens et l'application Fogram (Fogram, 2022) sur mobile pour guider la construction de structures en bois courbé à la

vapeur, sans nécessiter de moules complexes.

Settimi et al. (2022b) intègre la réalité augmentée dans le perçage du bois à l'aide d'outils modifiés et de caméra de suivi permettant le suivi des instructions holographiques en temps réel, sans recours à des gabarits physiques.

L'utilisation d'**appareils mobiles** pour l'affichage de la réalité augmentée est également abordée dans les études suivantes :

Atanasova et al. (2020) visent à l'utiliser pour la collaboration homme-robot dans un processus de fabrication en menuiserie avec un workflow ouvert, où les décisions de conception sont prises au fur et à mesure de l'assemblage.

Cuperschmid et al. (2016) présentent l'application “montAR”, qui utilise la réalité augmentée sur smartphone pour guider l'assemblage d'un mur en bois en affichant des modèles 3D interactifs. Cette approche permet d'augmenter l'efficacité et l'apprentissage sans la nécessité d'utiliser des manuels de montage.

Enfin, l'article suivant explore l'application des **projecteurs (laser ou autre)** pour la construction de cadres en ossature bois.

Bartuska et al. (2023) comparent la réalité augmentée spatiale (SAR) avec les plans papier pour l'assemblage de murs en bois, concluant en un temps de réalisation réduit de 50% tout en améliorant le confort des travailleurs.

2.3.1 Technologie adoptée

Parmi les 13 articles recensés, 10 utilisent des casques de réalité augmentée, principalement les Hololens 2. Cet intérêt pour les casques peut s'expliquer, entre autres, par le fait qu'ils permettent aux utilisateurs d'avoir les mains libres pour réaliser des tâches d'assemblage, contrairement à l'usage d'un téléphone ou d'une tablette.

Les lasers, bien que largement adoptés sur les chantiers de construction (notamment pour le positionnement et la mise à niveau des éléments), sont peu étudiés dans la recherche sur la réalité augmentée. En effet, bien qu'ils facilitent l'alignement, ils ne projettent pas directement des plans de montage ou des instructions, mais simplement des repères que les opérateurs doivent interpréter en fonction des tâches à réaliser.

2.3.2 Cadre d'application

Concernant le cadre d'application de la réalité augmentée, un seul article explore son utilisation en extérieur (sur chantier), tandis que les autres se concentrent sur un environnement contrôlé, tel qu'un atelier. Cette préférence pour un usage en intérieur peut s'expliquer par plusieurs facteurs :

Sécurité : Le port d'un casque de réalité augmentée sur un chantier peut entraîner des risques. En effet, le casque peut générer une charge cognitive excessive, ce qui peut affecter la concentration et potentiellement causer des accidents. Mais également, si les informations viennent recouvrir le champ de vision, cela peut entraîner une diminution de la perception des dangers environnants (Li et al., 2018).

Visibilité : La superposition d'informations sur une visière peut être altérée par des facteurs externes comme la lumière du soleil, réduisant la lisibilité (Blahut & Harnoncourt-Fuchs, 2023).

Incertitude : Contrairement à un atelier où des QR codes de marquage peuvent être placés précisément et de manière fixe, un chantier est un environnement en constante évolution. L'installation des repères nécessite l'intervention d'un géomètre, et une pose imprécise, combinée aux limites actuelles des technologies de réalité augmentée, pourrait engendrer des erreurs hors des tolérances acceptables.

2.3.3 Utilisateurs :

Parmi les articles analysés, seuls cinq s'intéressent à l'expérience utilisateur. L'accent est mis sur :

- L'étude de l'interface afin de l'optimiser pour les utilisateurs.
- L'évaluation du ressenti des utilisateurs après l'expérimentation.

Cependant, aucun de ces articles n'a été réalisé avec des travailleurs du bois, mais plutôt avec des participants ayant des connaissances variables en réalité augmentée. Or, ce sont précisément ces professionnels qui seront les plus impactés par l'intégration de cette technologie dans leurs méthodes de travail.

C'est sur cet aspect que la partie suivante se concentrera, en définissant brièvement l'expérience utilisateur et en expliquant comment elle sera intégrée dans cette étude.

2.3.4 Tolérance de fabrication | Précision de la réalité augmentée

Tout casque ou technologie de réalité augmentée projette des informations avec une certaine tolérance, ou plutôt un certain décalage entre l'affichage virtuel et la réalité physique.

Cette notion de tolérance n'est pas propre à la réalité augmentée. Elle est également présente dans l'ensemble des tâches de fabrication, où des écarts sont toujours admis dans certaines limites.

Dans des secteurs de précision comme l'aérospatiale, les tolérances lors de l'usinage des pièces peuvent être de l'ordre de 0,01[mm].

Dans la construction, bien que plus importantes, ces tolérances permettent néanmoins de garantir la précision des assemblages, la stabilité structurelle et la durabilité du bâtiment.

L'utilisation de la RA dans la construction n'étant pas encore répandue, il n'existe à l'heure actuelle aucune norme définissant le niveau de précision que cette technologie doit fournir.

Cependant, une nouvelle norme de l'Eurocode 5, dans la partie "EN1995-3.", qui n'est pas encore publiée mais devrait l'être d'ici environ deux ans, donne des indications sur les tolérances maximales à respecter durant les différentes étapes de fabrication des ossatures.

Cette norme définit des écarts maximaux admissibles pour les étapes de découpe des panneaux, d'assemblage bois-bois et bois-panneau, des étapes pour lesquelles la RA pourrait jouer un rôle pertinent.

Ainsi, si l'on considère que l'opérateur découpe les panneaux en suivant les indications projetées, ou qu'il place les connecteurs (clous, vis, agrafes) aux emplacements indiqués par l'affichage RA, ces écarts admissibles peuvent être interprétés comme le décalage maximal tolérable entre l'élément projeté en RA et sa position réelle.

La précision d'affichage de la technologie devra donc être au moins égale à la tolérance requise pour les étapes concernées.

1. Tolérance durant la découpe des panneaux

Concernant la découpe des panneaux, des prescriptions sont données pour la découpe selon leur longueur et leur largeur.

Géométrie	Écart maximal $\Delta_{i,max}$
Longueur	$\pm \max(5 ; l/1000)$
largeur	$\pm \max(5 ; b/1000)$

TABLEAU 2.1 – Ecart maximal pour les éléments horizontaux (panneaux) selon la norme de l'"EN1995-3"

Ainsi, dans le cas le plus défavorable, l'écart admissible est de $\Delta_{i,max,panneau} = 5 [mm]$.

2. Tolérance pour les connexions bois-bois

Plusieurs prescriptions sont communiquées, mais la plus restrictive concerne les connecteurs individuels. Elle indique que l'écart admissible est donné par la formule suivante :

$$\Delta_{i,max,bois-bois} = \max(0, 1a_i ; 0, 5d)$$

où :

- d est le diamètre des connecteurs,
- a_i représente l'écart mesuré entre le connecteur et le bord de l'élément en bois.

Il est donc pertinent de fixer un cas défavorable, c'est-à-dire une situation qui exige la plus grande précision, en minimisant au maximum les valeurs de a_i et d .

Dans le cas des ossatures, le diamètre d utilisé pour connecter les montants est généralement d'au moins 4[mm].

Pour les montants d'ossature, la section minimale couramment utilisée est de 45 × 45[mm].

L'entraxe a_i correspond alors à la distance entre l'axe du connecteur (placé au centre du montant) et le bord du bois, soit : $\frac{45}{2} = 22.5 [mm]$.

Cela signifie que l'écart admissible vaut :

$$\Delta_{i,max,bois-bois} = \max(0, 1 * 22,5 ; 0, 5 * 4) = \max(2, 25; 2) = 2, 25 [mm]$$

3. Tolérance pour les connexions bois-panneaux

Concernant les connexions entre panneau et montant en bois, plusieurs prescriptions sont communiquées. Toutefois, la plus restrictive indique que l'écart admissible est défini par la relation suivante :

$$\Delta_{i,max,bois-panneau} = \pm 0, 1a_i$$

En repartant du même postulat que précédemment, avec des bois de section $45 \times 45[mm]$, l'entraxe a_i choisi correspond à la distance entre le centre de l'élément (axe du connecteur) et le bord du bois, soit : $\frac{45}{2} = 22,5[mm]$.

Cela signifie que l'écart admissible est :

$$\Delta_{i,max,bois-panneau} = 0,1 * 22,5 = 2,25[mm]$$

Ainsi, l'écart admissible global que la réalité augmentée devrait respecter correspond au minimum des écarts admissibles définis dans les trois cas d'usage détaillés, à savoir :

$$\Delta_{i,max,total} = \min(\Delta_{i,max,panneau}; \Delta_{i,max,bois-bois}; \Delta_{i,max,bois-panneau}) = 2,25[mm]$$

Pour garantir une utilisation fiable sur le long terme, conforme aux futures normes à venir et applicable à tout type d'ossature, la précision de l'affichage RA devrait donc être d'au moins $2,25[mm]$.

2.4 L'expérience utilisateur "UX"

Comme souligné dans la section consacrée à l'utilisation de la réalité augmentée dans la construction en bois (2.3), les articles consultés se concentrent principalement sur les avantages pratiques de la RA, plutôt que sur la manière dont les utilisateurs perçoivent son intégration dans leurs méthodes de travail actuelles. C'est dans ce contexte que la notion d'expérience utilisateur est introduite.

La première apparition du terme « expérience utilisateur » remonte aux années 1990, lorsque Donald Norman l'a utilisé pour décrire l'approche centrée sur l'interaction entre l'utilisateur et le produit (Norman, Miller, & Henderson, 1995).

« L'expérience utilisateur est l'ensemble des perceptions des utilisateurs finaux lorsqu'ils interagissent avec un produit ou un service. Ces perceptions incluent l'efficacité (le résultat est-il satisfaisant ?), l'efficience (la rapidité ou le coût ?), la satisfaction émotionnelle (le sentiment de bien-être ressenti ?) et la qualité de la relation avec l'entité qui a créé le produit ou le service (quelles attentes suscite-t-il lors des interactions ultérieures ?) » (Kuniavsky, 2010, p. 14, traduction personnelle).

Cette définition proposée par Kuniavsky (2010) est particulièrement intéressante, car elle ne se limite pas aux aspects fonctionnels de l'interaction, tels que l'efficacité et l'efficience, mais prend également en compte les dimensions émotionnelles et relationnelles de l'expérience utilisateur. Elle met en lumière les différentes perceptions qu'un utilisateur peut avoir en découvrant un nouveau produit, ainsi que les questionnements qui peuvent émerger tout au long de son utilisation, notamment en ce qui concerne la satisfaction ressentie et les attentes suscitées.

2.4.1 L'intérêt de l'expérience utilisateur dans ce travail

L'introduction d'une technologie de pointe dans un secteur peu digitalisé représente un véritable défi, car les utilisateurs peuvent ne pas y voir d'intérêt, voire, dans le cadre de la réalité augmentée, avoir la sensation que l'objectif poursuivi est de contrôler leur travail.

C'est dans ce cadre que l'expérience utilisateur est introduite à ce travail, afin d'évaluer si les utilisateurs perçoivent un réel intérêt pour cette innovation ou si, selon eux, le secteur de la construction en bois n'est pas encore prêt pour une telle avancée technologique.

En effet, même si une technologie offre des avantages concrets, comme un gain de temps dans les étapes d'assemblage, c'est avant tout l'utilisateur qui déterminera son utilité et son adoption à long terme.

C'est pourquoi l'approche UX ne se limitera pas à simplement une évaluation post-expérimentation, mais sera intégrée tout au long des étapes de conception et de recherche en incluant les retours des utilisateurs afin que la solution finale leur convienne au mieux.

Ainsi, pour rendre ce travail d'autant plus orienté vers l'utilisateur, un processus de conception issu du livre de Lallemand et Gronier (2015) sera utilisé.

Celui-ci se décompose en cinq phases, incluant chacune différentes méthodes visant à placer l'utilisateur au centre de la recherche, à comprendre ses besoins et à proposer une solution adaptée. Ce processus est illustré dans la figure suivante (2.12), qui explicite, pour chacune des phases, les éléments qui y seront développés.

2.4.2 Les 5 phases du processus UX

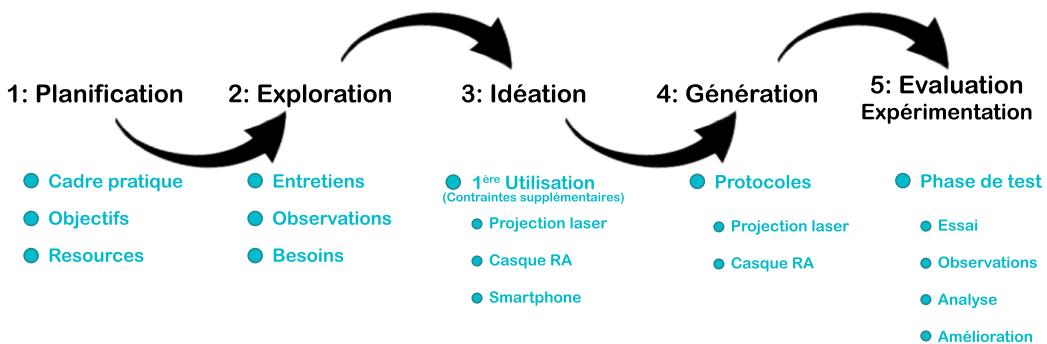


FIGURE 2.12 – Représentation des cinq phases du processus de conception centré utilisateur, adapté de Lallemand et Gronier (2015), appliqué ici à l'expérimentation de la réalité augmentée.

1 : Planification

Le but de cette phase est de définir les objectifs du travail et d'effectuer une première réflexion sur les outils et les ressources à déployer.

Elle permettra également d'identifier les ressources disponibles et de sélectionner les outils appropriés.

2 : Exploration

Cette phase permet de recueillir les besoins des utilisateurs et d'identifier les tâches où la réalité augmentée pourrait apporter une réelle valeur ajoutée.

Afin d'identifier ces besoins, des entretiens et des observations seront menés avec les différentes parties prenantes :

- Entretiens avec les intervenants de l'entreprise, mais principalement avec les opérateurs, qui seront les principaux utilisateurs de la technologie.
- Analyse des retours d'autres entreprises ayant déjà testé la réalité augmentée afin d'en tirer des enseignements et des conseils.
- Observation dans l'atelier pour mieux comprendre les différentes étapes de la préfabrication et identifier les points où la réalité augmentée pourrait améliorer le processus.

3 : Idéation

À partir des besoins recueillis lors de la phase 2 (exploration), cette phase vise à générer des premières idées de fonctionnalités que la technologie (casque de RA ou laser) devra intégrer pour répondre aux besoins.

Les premiers essais réalisés y seront présentés, et les nouvelles contraintes mises en évidence durant ces essais seront analysées.

L'objectif de cette phase est donc de rendre la technologie exploitable et de s'assurer qu'elle répond réellement aux contraintes fixées par l'entreprise.

4 : Génération

La phase de génération a pour but d'exposer les différents protocoles d'expérience et d'adapter les étapes en fonction des résultats obtenus. Selon la manière dont la technologie répond aux tests, les expérimentations sont ajustées afin de garantir leur pertinence et leur exploitabilité. Cette phase justifie ainsi les choix méthodologiques retenus et oriente les expériences ultérieures en fonction des besoins identifiés.

5 : Évaluation/Expérimentation

Cette phase est dédiée à l'expérimentation des technologies dans l'atelier conformément à ce qui est développé dans les protocoles.

À l'issue de ces expérimentations, les données sont récoltées et analysées afin de répondre à la problématique initiale. Les aspects suivants sont alors développés :

1. Résultats pratiques :

- La technologie (casque ou laser) permet-elle un gain de temps ?
- Améliore-t-elle certaines étapes (précision, compréhension des plans, etc.) ?

2. Observations in situ :

- Comment les utilisateurs perçoivent-ils l'expérimentation ?
- Ont-ils rencontré des frustrations ou des difficultés ?
- Quelles émotions ont-ils exprimées face à la technologie ?

3. Formulaire d'évaluation :

Un questionnaire sera proposé aux utilisateurs pour évaluer cinq critères clés :

- Utilité : La technologie apporte-t-elle une réelle valeur ajoutée ?
- Utilisabilité : Est-elle facile à utiliser ?
- Affordance : L'expérience est-elle intuitive et adaptée aux besoins ?
- Précision : Les utilisateurs font-ils confiance aux données affichées ?
- Charge cognitive : La technologie engendre-t-elle un effort mental excessif ?

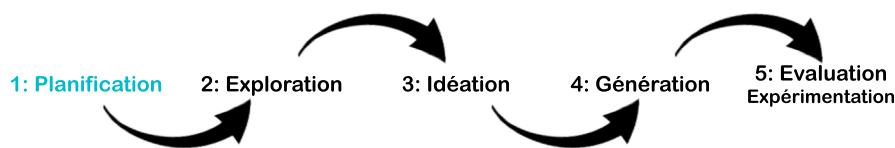
Il est important de noter que le processus est hautement itératif, toutes les phases ne sont pas forcément réalisées dans l'ordre décrit et des allers-retours sont possibles.

Enfin, lorsque le cycle sera terminé et que l'ensemble des données aura été traité, une discussion sur les résultats aura pour but de déterminer si cette technologie a réellement sa place dans la construction bois et si elle peut s'y implanter durablement.

Chapitre 3

Expérimentation

3.1 Planification



3.1.1 Définition du cadre pratique

L'entreprise où se déroule la partie pratique est SABEM, une société spécialisée dans la construction en bois, et plus particulièrement dans la préfabrication d'ossatures. Elle comprend différents pôles, allant de la remise d'offres à la pose des éléments sur chantier.

Ce travail porte sur la préfabrication des ossatures ; il se concentrera donc exclusivement sur la phase de réalisation en atelier.

C'est à cette étape que les ossatures sont fabriquées avant d'être transportées et assemblées sur site. La figure suivante (3.1) présente deux photographies prises dans les ateliers de l'entreprise Sabem.



FIGURE 3.1 – Atelier de fabrication des ossatures

L'atelier compte quatre opérateurs responsables de la fabrication, supervisés par un chef d'atelier qui coordonne les tâches et les guide dans leur travail. Selon les projets, le nombre de personnes travaillant à l'atelier peut atteindre jusqu'à dix, en incluant les sous-traitants.

Ces quatre opérateurs seront au cœur du sujet.

3.1.2 Définition des objectifs

Avant de commencer le travail, une réunion de lancement a permis de confronter les points de vue des différentes parties prenantes et de définir les objectifs principaux, les défis ainsi que les critères de succès. Elle a également permis de découvrir l'atelier afin de mieux comprendre son fonctionnement.

Cette mise en perspective a été essentielle pour replacer l'étude dans son contexte et exposer les enjeux, à la fois pour l'entreprise et pour ma propre démarche en tant qu'expérimentateur.

L'entreprise SABEM cherche à optimiser les étapes de production au sein de son atelier afin de répondre à la demande croissante. Actuellement, les opérateurs utilisent des plans de montage sur papier qui détaillent les étapes de construction des ossatures. Ces plans contiennent des dimensions que les opérateurs doivent mesurer et reporter manuellement, ce qui entraîne des risques d'erreur et ralentit le processus.

C'est dans ce contexte que la réalité augmentée pourrait offrir une solution innovante en permettant aux utilisateurs de visualiser directement les marquages sans avoir à effectuer de mesures intermédiaires.

3.1.2.1 Objectifs de l'entreprise

L'objectif principal de l'entreprise est de faciliter et d'accélérer les étapes de montage. Toutefois, le défi est de le faire sans impacter ni ajouter de temps aux autres étapes de production, principalement celles des dessinateurs qui fournissent les plans de montage.

3.1.2.2 Objectifs du travail

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer la pertinence de la réalité augmentée dans la préfabrication d'ossatures en bois. Pour cela, plusieurs objectifs secondaires sont définis :

- Adapter la technologie pour qu'elle soit exploitable en atelier, en respectant la contrainte de ne pas impacter la production.
- Tester la solution pour mesurer son intérêt en termes de gain de temps et de précision.
- Analyser l'expérience utilisateur afin de vérifier son acceptabilité et sa facilité d'adoption.
- Optimiser et ajuster les fonctionnalités en fonction des retours des utilisateurs pour maximiser leur satisfaction.

3.1.3 Ressources, outils et utilisateurs

Jusqu'à présent le terme de réalité augmentée ne suggérait pas quel technologie allait être utilisée pour les essais.

Afin de rendre la partie pratique la plus complète, il serait intéressant de comparer les différentes technologies de la réalité augmentée et voir laquelle peut être la plus adaptée.

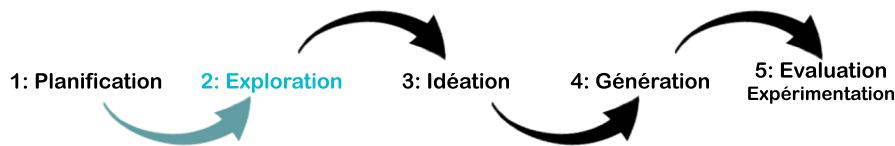
Les technologies de RA peuvent se décliner sous plusieurs formes :

- Casques ou lunettes de réalité augmentée.
- Smartphones ou tablettes utilisant des applications de RA.
- Projection holographique (RA spatiale) permettant d'afficher des repères directement sur une surface de travail.

Contrairement à d'autres travaux de recherche où des utilisateurs doivent être recrutés, dans ce cas particulier, ce sont les opérateurs de Sabem qui jouent le rôle de testeurs.

Il est donc primordial de les inclure dès le début des tests utilisateurs pour qu'ils perçoivent la réalité augmentée comme une technologie qui peut les aider et leur faciliter le travail et non pas comme un moyen d'augmenter leur tâche de travail et de contrôler leur travail.

3.2 Exploration



3.2.1 Entretien et observation des méthodes de travail

Cette section a pour objectif de présenter les méthodes de travail actuelles dans l'atelier, ainsi que le flux de production, depuis l'analyse des plans jusqu'à la finalisation d'un caisson. Cette présentation permet de comprendre les différentes étapes du processus, et d'identifier les points où la réalité augmentée peut être implantée.

Ces informations proviennent d'un entretien avec un opérateur, qui a pu décrire et expliquer en détail chaque étape du processus.

Les opérations présentées sont basées sur un projet en cours, mais elles reflètent globalement les pratiques utilisées dans la majorité des autres projets.

La fabrication des ossatures s'effectue sur une table de montage (ou table de production) spécialement conçue à cet effet, comme le montre la figure 3.2.

Cette table est équipée de règles de mesure intégrées ainsi que de trous permettant l'insertion de presses. Ces presses servent à maintenir la structure en place et à la stabiliser pendant le montage.

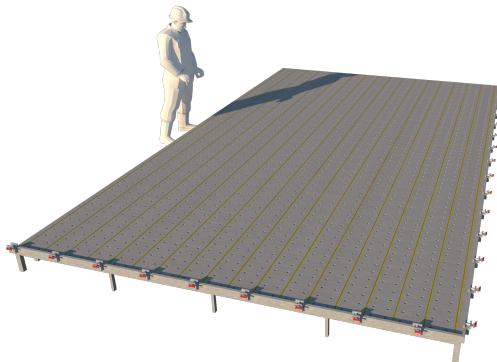


FIGURE 3.2 – Table de montage

1. Mise en place des premiers montants

La construction d'un caisson commence par la mise en place des montants, en se basant sur un premier plan de montage illustré dans la figure suivante (3.3).

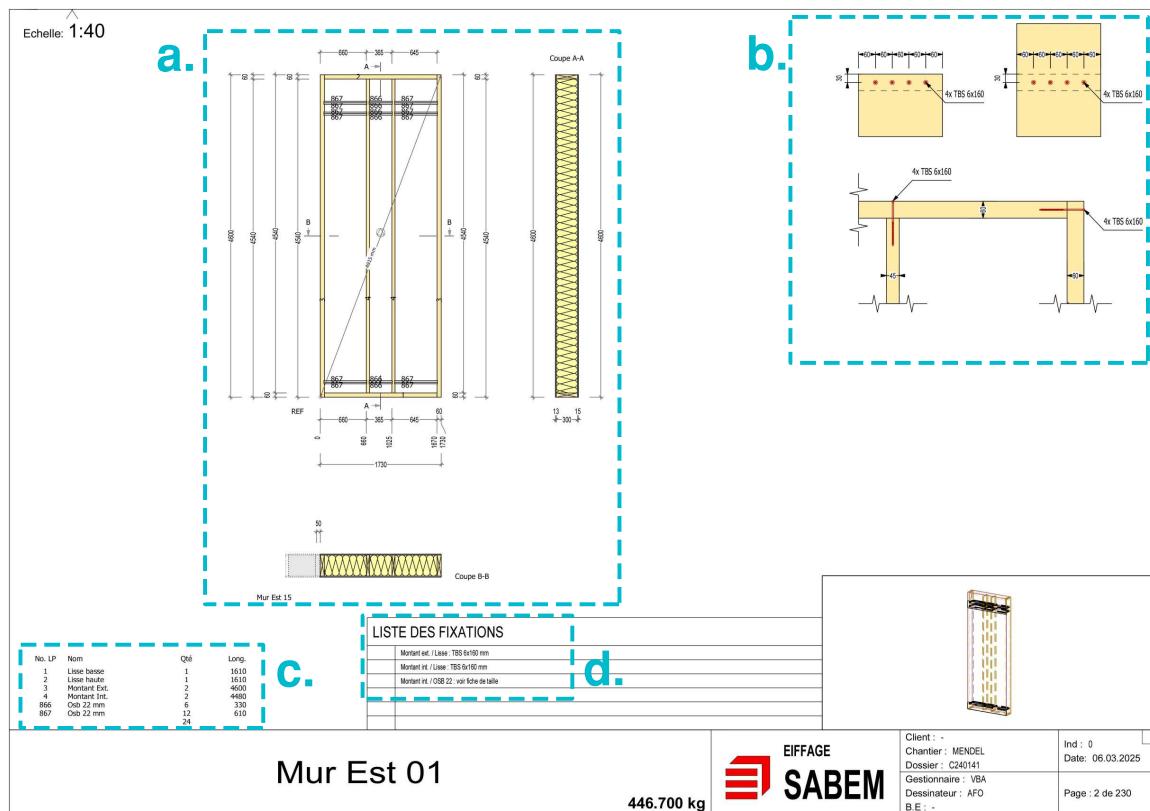


FIGURE 3.3 – Premier plan de montage

Celui-ci précise l'ossature ainsi que les dimensions et le positionnement des éléments (dans l'encadré a. du plan).

Une fois les montants placés, une vérification des mesures est effectuée afin d'assurer leur conformité avec le plan.

Le vissage est ensuite réalisé en respectant les préconisations de montage (indiquées dans l'encadré b. du plan), tout en suivant la liste de fixations (encadré d.).

L'image suivante (3.4) illustre cette première étape de mise en place des montants



FIGURE 3.4 – Premiers montants de l'ossature

Une seconde vérification permet de détecter d'éventuels déplacements des montants. Si certains sont voilés ou désalignés, des renforts temporaires sont installés pour garantir la stabilité de l'ensemble.

2. Installation des renforts en OSB

Des panneaux d'OSB, un matériau à base de copeaux de bois compressés, sont ensuite insérés dans les encoches prévues à cet effet afin de renforcer la structure. Ils sont soit collés, soit fixés mécaniquement aux montants. Ces panneaux ne sont pas présents dans l'ensemble des caissons produits, mais il est important de noter que cette configuration de structure est possible. La figure suivante (3.5) illustre la deuxième étape de fabrication des caissons.



FIGURE 3.5 – Renforts en OSB

3. Pose des panneaux intérieurs

Une fois la structure du caisson achevée, les panneaux intérieurs sont installés. Un nouveau plan de montage (figure 3.6) indique l'emplacement et le type de panneaux à utiliser, par exemple des panneaux OSB de 15 mm ou des plaques de plâtre de 15 mm.

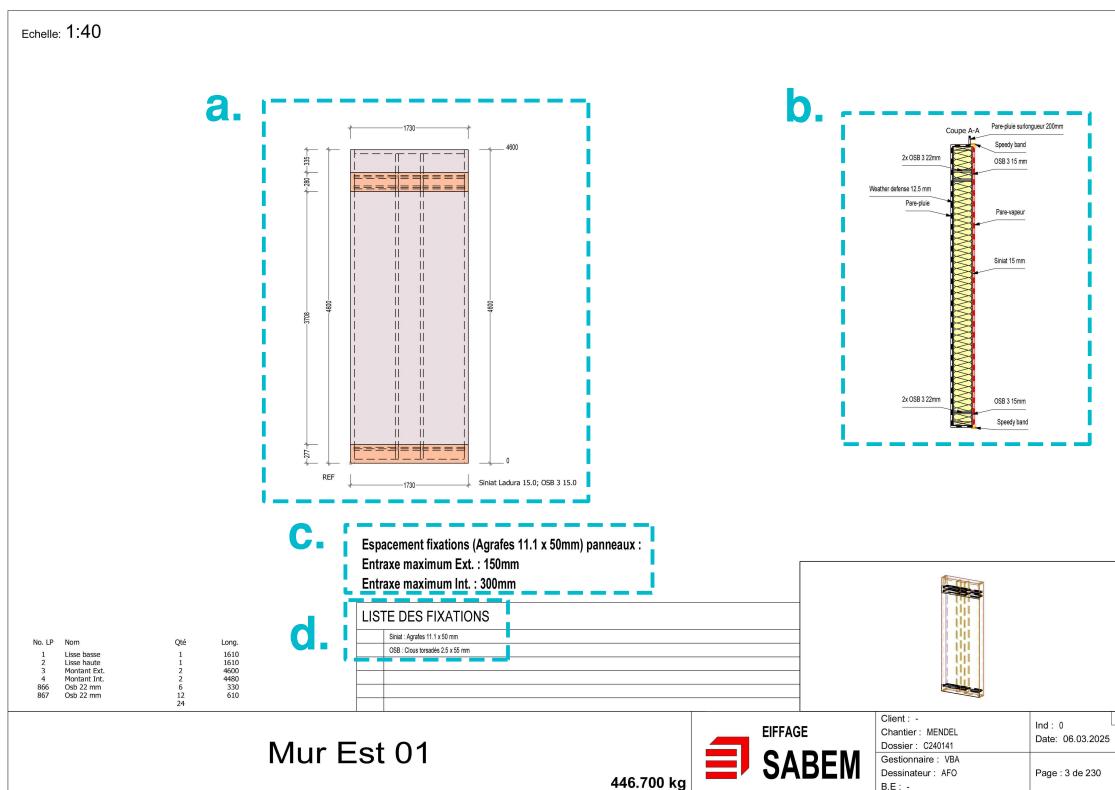


FIGURE 3.6 – Second plan de montage

La fixation des panneaux est réalisée par clouage (OSB) ou agrafage (plâtre). Pour garantir un alignement précis des fixations, un cordeau traceur est utilisé. Il est tendu et claqué contre les montants pour marquer une ligne de référence située au milieu des montants en bois, facilitant ainsi l'installation.

Le type de fixation se fait en référence à l'encadré d. tandis que l'entraxe à suivre pour la fixation se fait suivant l'encadré "c".

La figure suivante (3.7) illustre la troisième étape de fabrication des caissons.

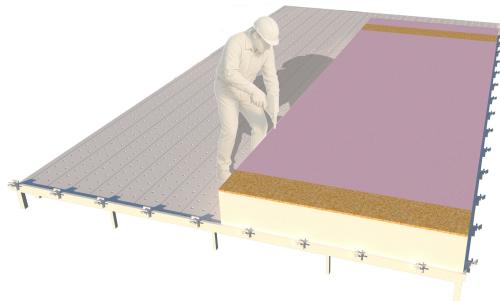


FIGURE 3.7 – Panneaux intérieurs

4. Installation du pare-vapeur

Le pare-vapeur est fixé sur les panneaux intérieurs afin d'empêcher la migration de l'humidité vers l'isolant et la structure, réduisant ainsi le risque de condensation et de moisissure. Il est agrafé environ tous les 5 [cm] et ses jonctions sont scellées à l'aide d'un adhésif spécifique, permettant d'assurer l'étanchéité à l'air du caisson.

Cette quatrième étape, concernant la pose du pare-vapeur, est illustrée dans la figure suivante (3.8).

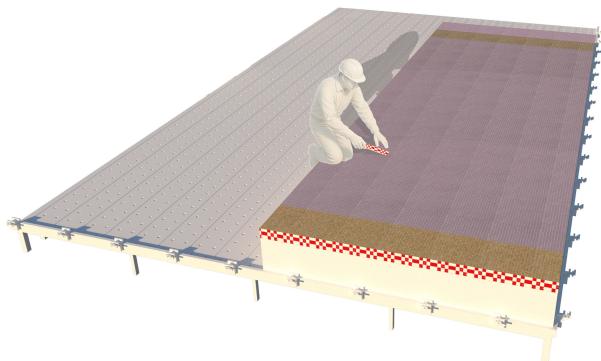


FIGURE 3.8 – Pare-vapeur

5. Retournement du caisson

Une fois ces étapes complétées, le caisson est retourné à l'aide de tirefonds fixés à un pont roulant. Leur nombre varie de 2 à 4 selon la taille du caisson. La figure suivante (3.9) illustre, à gauche, le caisson retourné, et à droite, une photo d'un tirefond.

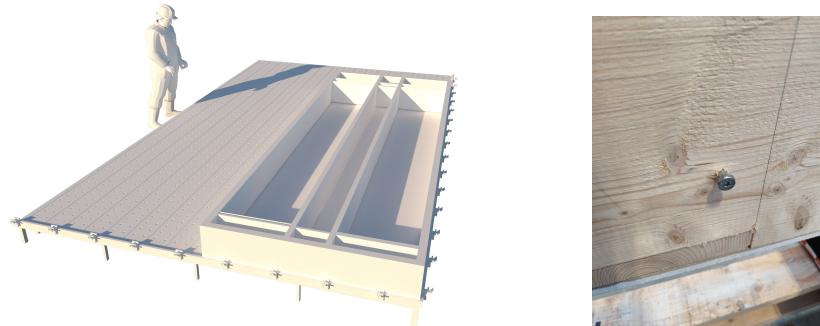


FIGURE 3.9 – Retournement du caisson

6. Mise en place de l'isolation

Le caisson retourné présente alors la structure interne, composée d'un fond et de montants créant des interstices destinés à recevoir l'isolant. Celui-ci est inséré dans ces espaces afin d'optimiser la performance thermique et acoustique de l'ensemble, comme l'illustre la figure suivante (3.10).

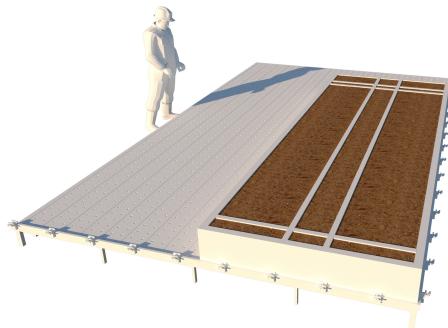


FIGURE 3.10 – Isolation

7. Mise en place des panneaux extérieurs

Les panneaux extérieurs sont ensuite fixés sur la structure, comme illustré dans la figure suivante (3.11). Dans ce cas, il s'agit de panneaux WeatherDefence (Siniat), composés de gypse recouvert d'un voile technique hydrofugé.

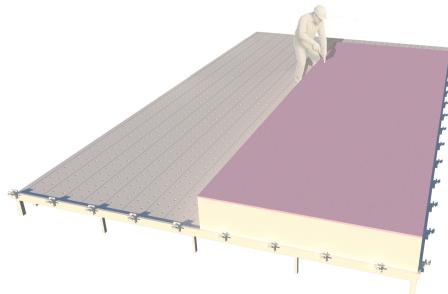


FIGURE 3.11 – Panneau extérieur

Leur fixation se fait à l'aide d'agrafes, en respectant les entraxes indiqués sur le dernier plan de montage, représenté à la figure suivante (3.12).

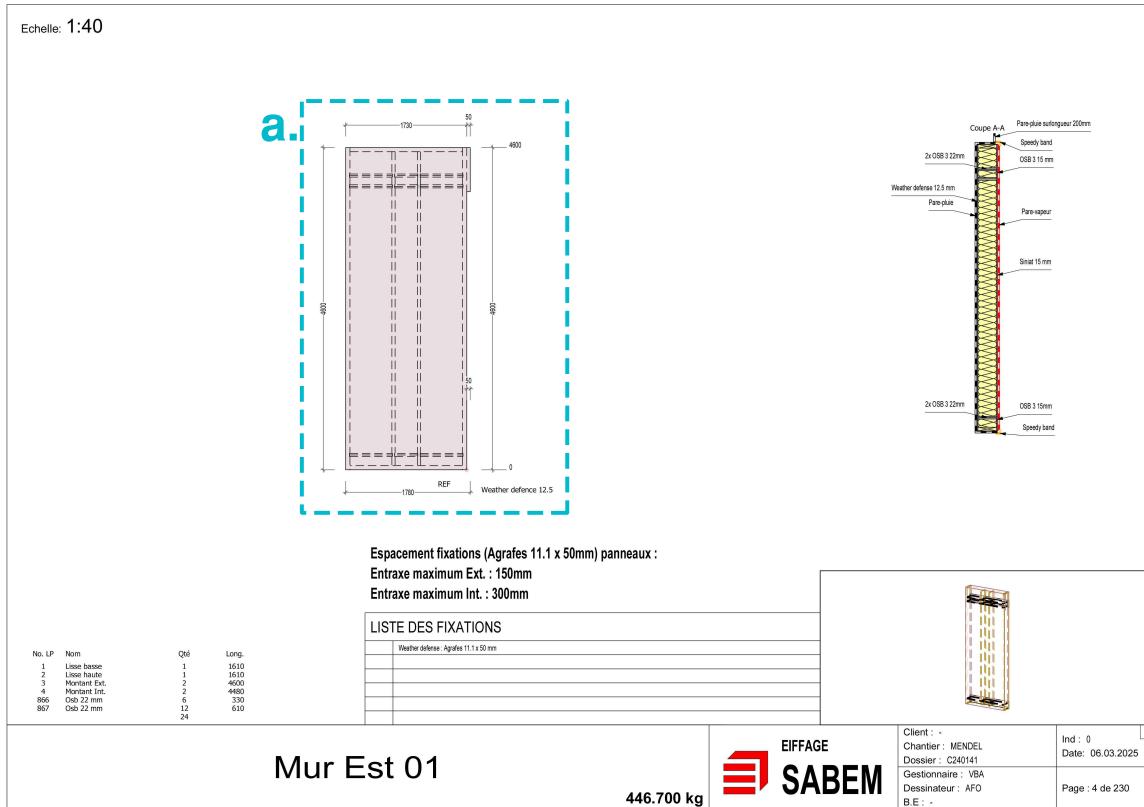


FIGURE 3.12 – Troisième plan de montage

8. Pose du pare-pluie

Un pare-pluie est appliqué à l'aide de bandes adhésives sur l'ensemble des panneaux extérieurs, une opération représentée dans la figure suivante (3.13).

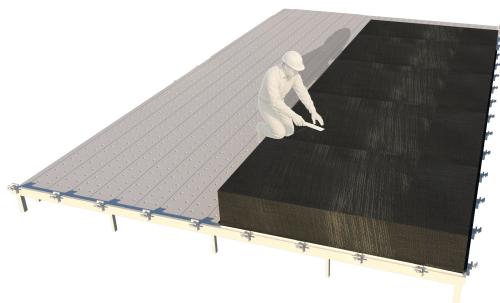


FIGURE 3.13 – Pare pluie

9. Fixation du lattage

Le lattage est mis en place pour permettre la fixation ultérieure du bardage extérieur sur chantier. Cette étape présente une difficulté, car les montants situés sous le pare-pluie ne sont pas visibles.

Leur localisation repose donc sur des mesures prises à partir des bords du caisson ou sur l'utilisation de vis placées latéralement comme repères. Cette dernière étape de la production des caissons est illustrée dans la figure suivante (3.14).

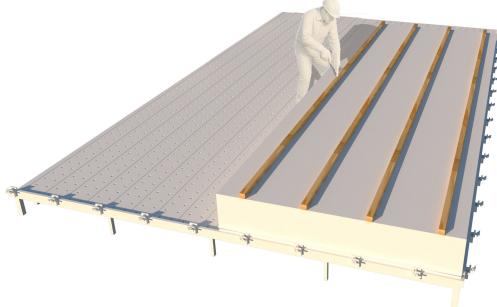


FIGURE 3.14 – Lattage

Cet entretien, combiné à une observation dans l'atelier, a été essentiel pour identifier les tâches complexes au sein du processus de production, et pour repérer celles qui pourraient être facilitées grâce à la réalité augmentée.

L'un des objectifs de cette technologie étant de superposer des éléments virtuels à l'environnement réel, certaines étapes du flux de production pourraient être grandement simplifiées. Par exemple, si des repères visuels indiquaient directement aux opérateurs l'emplacement des montants en bois, ainsi que les points précis où positionner les clous, vis ou agrafes, cela permettrait de se passer des mesures manuelles et du marquage au cordeau.

Dans le cas spécifique du caisson étudié, la réalité augmentée pourrait intervenir aux étapes suivantes :

Étapes 1 et 2 : affichage sur la table de montage des emplacements et des numéros de chaque élément à positionner ;

Étapes 3 et 7 : projection de traits indiquant l'endroit exact où placer les clous ou les agrafes ;

Étape 9 : assistance au vissage du lattage sur les montants cachés, grâce à une visualisation précise de leur emplacement.

Il est important de noter que tous les caissons ne comportent pas nécessairement de panneaux intérieurs, extérieurs ou de lattage. En revanche, ils incluent systématiquement une ossature et des panneaux de contreventement.

Cela démontre que, même dans des configurations variées, la réalité augmentée peut avoir un impact significatif sur l'ensemble des caissons produits par l'entreprise.

3.2.2 Entretien avec les dessinateurs

Après la visite de l'atelier et l'observation des méthodes de travail, il a été essentiel de consulter les dessinateurs, puisqu'ils sont responsables de fournir aux opérateurs les plans de montage des structures, notamment les trois plans utilisés pour l'assemblage du caisson décrit précédemment.

En leur transmettant les demandes formulées par les opérateurs, telles que l'ajout de repères visuels (traits, annotations, etc.) sur les plans. Les dessinateurs ont souligné une contrainte technique : leur logiciel, Cadwork, ne permet pas facilement l'intégration de ce type d'éléments. Ils utilisent ce logiciel pour modéliser les structures en 3D, et les plans papier sont ensuite générés presque automatiquement à partir de ces modèles.

Cela soulève donc une problématique importante :

Si la réalité augmentée vise à faire gagner du temps en atelier, elle ne doit pas, en contrepartie, alourdir le travail des dessinateurs ou rallonger les étapes de conception. L'enjeu est de trouver un équilibre entre les besoins des opérateurs et les capacités/outils des dessinateurs.

3.2.3 Retour d'expérience d'entreprises sur la réalité augmentée

Dans le cadre de ce travail, un échange a été mené avec M. Gaëtan Duyckaerts, à la date du 5 mars 2025. M. Duyckaerts est responsable Gestion et Ingénierie au sein de l'Atelier de l'Avenir, une entreprise spécialisée dans la préfabrication d'éléments constructifs en ossature bois.

L'objectif de cet échange était de recueillir un retour d'expérience sur les premiers essais d'intégration de la réalité augmentée dans leur processus de production.

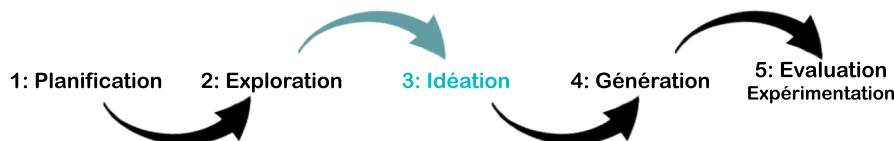
L'expérimentation a été jugée globalement concluante. Initialement envisagée pour l'assemblage, la réalité augmentée a également montré un intérêt en matière de contrôle qualité, permettant par exemple de visualiser la structure finale et de vérifier l'absence de pièces manquantes.

Il a également cité la capacité de la technologie à rendre les plans plus accessibles. Dans un contexte où certains opérateurs ne maîtrisent pas la lecture de plans techniques, la réalité augmentée permet une visualisation claire et intuitive des structures à assembler, ainsi que l'affichage direct de détails constructifs spécifiques.

Toutefois, M. Duyckaerts a soulevé quelques interrogations quant à la pertinence de cette technologie dans le secteur. Bien qu'il reconnaissasse l'intérêt de l'outil, il a également souligné que ce type de technologie semblait, selon lui, davantage adapté à des secteurs caractérisés par des tolérances de précision élevées, comme l'aéronautique. Il s'interroge ainsi sur la pertinence d'un tel outil dans le contexte de la construction bois, notamment en raison des exigences en matière de formation et d'appropriation, qui peuvent constituer un frein à son adoption.

Suite à cet échange avec M. Duyckaerts, il apparaît essentiel que, durant les tests à venir, les utilisateurs soient accompagnés de manière progressive dans l'adoption de la réalité augmentée. Afin de garantir que la RA réponde au mieux à leurs besoins spécifiques, il sera crucial de s'assurer qu'elle soit parfaitement adaptée au contexte de travail de Sabem.

3.3 Idéation



Cette phase est dédiée à l'expérimentation de la réalité augmentée sous différentes formes :

- Casque de réalité augmentée
- Projection laser (réalité augmentée spatiale)
- Appareil mobile (smartphone)

Le but est d'évaluer sa capacité à répondre concrètement aux besoins des utilisateurs, en mesurant tout d'abord l'efficacité de ces technologies dans le contexte de l'atelier, puis en identifiant les contraintes qu'elles peuvent engendrer.

Ces limitations seront ensuite analysées pour déterminer si elles peuvent être surmontées par des ajustements techniques, ou si elles sont inhérentes à la technologie elle-même, et donc difficilement modifiables.

Cette analyse permettra d'estimer la faisabilité d'une intégration durable de la réalité augmentée dans le processus de production.

3.3.1 Casque de réalité augmentée

3.3.1.1 Contexte

Les premiers essais ont commencé fin janvier 2024 au sein de l'entreprise Sabem.

Ces essais avaient été réalisés en dehors du cadre de ce TFE, dans le but initial de simplement tester la technologie et de voir si elle pouvait convenir aux besoins de l'entreprise.

Le fournisseur du casque est l'entreprise Woodtec Fankhauser GmbH, spécialisée dans la production de machines de montage pour la construction en bois (telles que des tables de montage, des machines de manutention, etc.), mais qui a récemment développé un logiciel de projection : TimberPlan xR.

Ce logiciel permet de visualiser les plans de montage des caissons à l'aide d'un casque du casque Hololens 2.

3.3.1.2 Préparation et mise en place

Pour calibrer le casque sur la table de montage, une plaque métallique doit être positionnée dans un coin de la table. Une fois en place, elle est reconnue par le casque, et plus précisément par l'application, qui définit le coin de la plaque (dotée d'un QR code) comme point de référence pour la table. Deux plaques plus petites peuvent également être utilisées pour ajouter des points d'ancre supplémentaires.

3.3.1.3 Affichage des éléments

Une fois le casque calibré dans l'espace, les plans de montage peuvent être affichés directement sur la table.

Pour ce premier essai, un caisson mesurant 6360 mm x 2720 mm, présenté dans la figure suivante (3.15), avait été utilisé afin d'avoir une première impression de l'usage du casque en atelier.

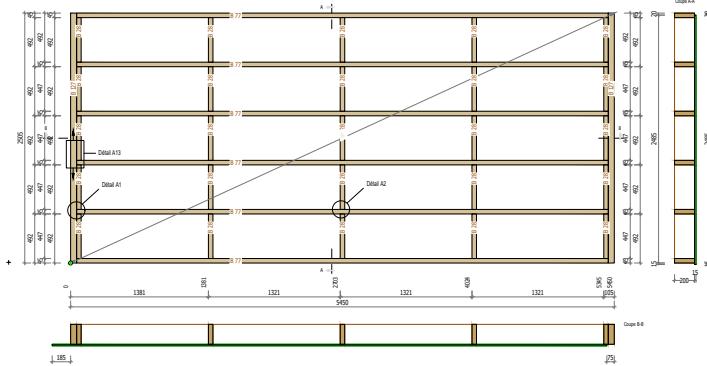


FIGURE 3.15 – Fichier testé durant l'essai du casque de réalité augmentée

Puisque cet essai avait été réalisé en dehors du cadre du TFE, il n'a pas suivi de protocole spécifique, mais visait simplement à évaluer l'efficacité de la technologie.

Certaines conclusions ont toutefois pu être tirées de cet essai.

3.3.1.4 Observations et contraintes

1. Précision

La précision du casque n'était pas suffisante pour répondre aux besoins de l'atelier. Sur ce caisson, un décalage de 20 mm était présent, rendant le casque inutilisable dans ce contexte. De plus, une distorsion de l'affichage provoquait un non-parallélisme entre les montants physiques et les traits projetés. Ces deux phénomènes sont illustrés dans la figure suivante (3.16).

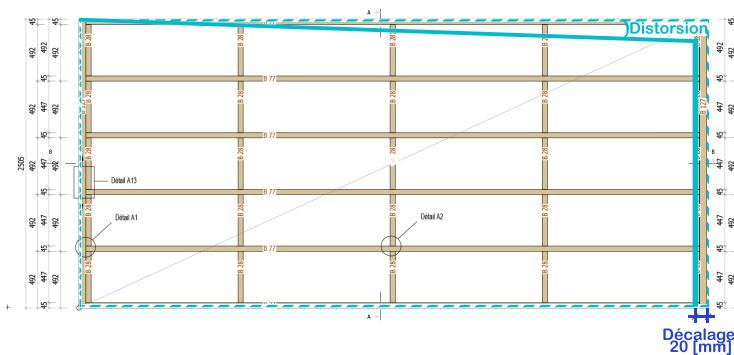


FIGURE 3.16 – Décalage et distorsion rencontrés durant l'essai du casque de réalité augmentée

Cependant, l'entreprise avait annoncé une nouvelle mise à jour de leur logiciel, qui pourrait corriger ce problème. Les délais n'ont malheureusement pas permis de la tester à cette période.

2. Équipements de protection

Les ouvriers sont obligés de porter un casque de protection, notamment à cause du pont roulant utilisé dans l'atelier.

Cependant, il est actuellement impossible de porter à la fois le casque fourni par l'entreprise et un casque de protection. Cela pose donc la question de l'utilité du dispositif en conditions réelles de production.

Il existe néanmoins un produit de la marque Trimble qui combine un casque Hololens avec un casque de protection, ce qui pourrait être une option intéressante à envisager.

3. Traitements des fichiers DXF :

Puisque le casque fonctionne sur base de fichiers DXF, de manière similaire à la projection laser, les contraintes liées au traitement préalable des fichiers qui ont été évoquées plus haut (voir 3.2.2), sont également présentes dans ce cas.

Cela représente donc un frein supplémentaire à l'utilisation de cette technologie.

3.3.1.5 Conclusion

Même si cette technologie présente un réel potentiel pour l'atelier, elle ne pourra être utilisée efficacement que si la future mise à jour permet d'améliorer la précision, en réduisant le décalage pour le rendre conforme aux exigences de l'eurocode.

Pour la suite des essais, l'option du casque n'a pas été écartée, mais il sera essentiel d'évaluer précisément le niveau de précision atteint avant de poursuivre l'étude.

3.3.2 Projection laser (réalité augmentée spatiale)

3.3.2.1 Préparation et mise en place

Le test a été réalisé le 21 février avec la participation d'un représentant de l'entreprise Elyotec, venu avec le système de projection LapLaser, équipé de deux sources lumineuses de 30 mW.

Le laser a été monté sur les fourches d'un chariot élévateur, positionné à environ 6 à 6,5 mètres au-dessus de la table de fabrication.

La figure suivante (3.17) présente, à gauche, une photo de l'installation, et à droite, une image montrant les traits laser projetés sur la table de montage.



FIGURE 3.17 – Photo prise durant l'essai du laser

La première étape a consisté à calibrer le laser afin qu'il puisse se repérer correctement dans l'espace et afficher avec précision les éléments sur la table de montage.

Pour ce faire, cinq mires aimantées ont été positionnées sur la table (encadré b. sur la figure 3.17) :

- Le coin inférieur droit est défini comme l'origine du repère spatial (point 0;0;0).
- Les distances entre ce point d'origine et les cinq mires sont mesurées afin d'obtenir leurs coordonnées exactes.
- À l'aide d'une télécommande, l'opérateur déplace le faisceau laser sur quatre des mires, qui sont détectées par un capteur de réflexion.
- Le système déduit alors automatiquement la position de la cinquième mire, permettant ainsi de valider le calibrage.

3.3.2.2 Affichage des éléments

Une fois le système calibré, un test d'affichage en conditions réelles a été effectué sur un caisson de 4,5 m x 1,95 m, une taille représentative des productions habituelles.

Le logiciel associé au laser fonctionne à partir de fichiers DXF, directement exportés depuis le logiciel de modélisation Cadwork.

Les différentes couches (ou calques) du fichier DXF sont interprétées par le programme, et l'opérateur peut, via une télécommande, choisir d'afficher uniquement les calques pertinents pour l'étape de fabrication en cours.

3.3.2.3 Observations et contraintes

Cette première phase de test a permis de mettre en lumière plusieurs contraintes, tant liées à la technologie de projection laser elle-même qu'au traitement préalable nécessaire des fichiers DXF pour en permettre une utilisation efficace.

1. Observations :

- Luminosité ambiante élevée : les traits projetés étaient parfois difficiles à discerner, ce qui peut engendrer des erreurs.
- Scintillement du faisceau : le laser ne reste pas fixe sur les points à afficher mais oscille entre eux à haute fréquence, créant une impression de scintillement.
- Limitation chromatique : une seule couleur de faisceau est disponible. Or, l'utilisation de plusieurs couleurs permettrait de mieux différencier les types d'éléments (ex. : clous, vis, perçages...).

2. Contraintes liées au fichier DXF (Cadwork)

- Origine du repère : lors de l'export, l'origine du dessin ne correspond pas systématiquement à un coin du caisson. Il est pourtant essentiel qu'elle coïncide avec l'origine du repère choisi pour le laser, afin d'assurer un affichage calibré sur la table.
- Absence de hiérarchie des lignes : toutes les informations (montants, dimensions, numérotations...) sont exportées sur un même calque, rendant l'affichage global peu lisible. Il est actuellement impossible de filtrer ou prioriser certains types de lignes sans retravailler manuellement le fichier DXF.

3.3.2.4 Conclusion

La projection laser semble prometteuse pour une utilisation en atelier.

Toutefois, la nécessité d'adapter manuellement les fichiers DXF constitue un obstacle. Cette solution reste envisageable si un traitement automatique des fichiers peut être mis en place, sans surcharge pour les dessinateurs.

3.3.3 Appareil mobile (smartphone)

3.3.3.1 Préparation et mise en place

Un essai a été réalisé le 07 avril 2025 sur une table de montage afin d'évaluer la précision que peut offrir la réalité augmentée sur appareil mobile.

Cet essai a été effectué à l'aide d'un smartphone Redmi Note 13 Pro équipé d'un capteur de proximité, d'un capteur de lumière ambiante, d'un accéléromètre, d'une boussole électronique et d'un gyroscope, mais dépourvu de capteur Lidar.

L'application utilisée pour cet essai est "i4Review" et a été choisie car elle permet d'afficher des modèles 3D gratuitement, pouvant être importés directement dans l'application.

De plus, elle détecte automatiquement les surfaces planes pour y positionner le modèle et l'affiche à l'échelle 1 :1 sans avoir à le redimensionner.

Une fois le modèle affiché sur la table de montage, il est toutefois nécessaire de le repositionner manuellement afin que son origine corresponde à celle de la table, car l'application ne prend pas en charge les QR codes de marquage.

3.3.3.2 Affichage des éléments

Le modèle utilisé a été sélectionné dans le but d'évaluer la précision offerte par le smartphone.

Il s'agit d'un modèle rectangulaire de 6000 [mm] x 3000 [mm], utilisé pour effectuer des relevés directement sur la table de montage graduée.

Des mesures ont été prises à 9 points différents du modèle afin d'en analyser la précision.

3.3.3.3 Observations et contraintes

1. Précision :

Les mesures relevées sur les 9 points sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Point	Xréel [mm]	Xmesuré [mm]	Yréel [mm]	Ymesuré [mm]
1	0	0	0	0
2	0	12	1500	1540
3	0	23	3000	3062
4	3000	2976	0	11
5	3000	2985	1500	1487
6	3000	3003	3000	2978
7	6000	5955	0	17
8	6000	3015	1500	1484
9	6000	6023	3000	2954

TABLEAU 3.1 – Écarts entre les mesures relevées et les coordonnées théoriques sur les 9 points

La figure suivante (3.18) illustre les coordonnées mesurées ainsi que les coordonnées théoriques correspondantes.

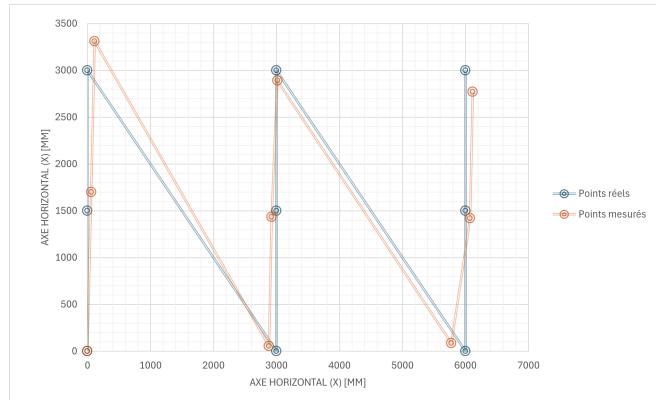


FIGURE 3.18 – Graphique de comparaison des coordonnées mesurées et théoriques sur les 9 points du modèle

- L'écart moyen selon l'axe X est de 17,77 [mm].
- L'écart moyen selon l'axe Y est de 25.22 [mm].

Ces écarts sont trop importants pour envisager une utilisation en atelier lors d'étapes de fabrication : une précision de l'ordre de 5 [mm] peut être acceptable pour certaines phases de production, mais une précision inférieure à 2,25 [mm] permettrait une utilisation pour tout type de tâche, conformément à ce qui a été développé précédemment (voir 2.3.4).

2. Ergonomie :

L'utilisation du smartphone impose de le tenir à une main, ce qui limite les mouvements et l'efficacité de l'opérateur durant le montage.

De plus, les gants obligatoires en atelier ne sont pas compatibles avec l'écran tactile du téléphone. Ils doivent donc être retirés pour certaines actions, comme le repositionnement du modèle, ce qui représente une contrainte importante.

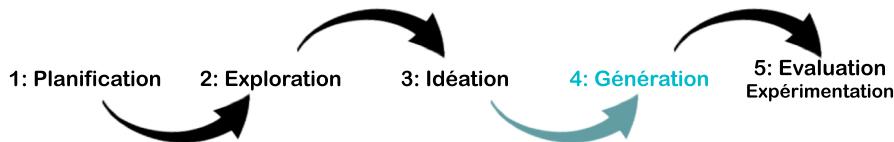
3.3.3.4 Conclusion

En raison de la précision insuffisante et des contraintes ergonomiques liées à l'utilisation du smartphone, la réalité augmentée sur appareil mobile n'a pas été retenue pour les essais en conditions réelles dans l'atelier.

Cependant, l'utilisation d'un smartphone ou d'une tablette équipée d'un capteur Lidar, combinée à une application prenant en charge les QR codes de marquage (ce qui éviterait le repositionnement manuel), pourrait présenter un réel intérêt.

Cela pourrait notamment permettre aux opérateurs de prévisualiser des caissons complexes ou de se faire guider sur l'emplacement d'éléments de structure non visibles.

3.4 Génération



Après la phase d'idéation qui a permis, grâce aux premiers essais, d'explorer les différentes contraintes intrinsèques aux technologies testées, la phase de génération a pour objectif d'établir les protocoles d'expérience du casque et de la projection laser, soit les deux technologies retenues.

Ces protocoles ne sont pas figés dès le départ, mais évoluent en fonction des résultats obtenus lors des différents tests réalisés. Leur but est de confronter les technologies aux contraintes identifiées et de vérifier si elles permettent de répondre aux besoins des utilisateurs.

Cependant, une contrainte majeure est directement liée à ce qui alimente la réalité augmentée : les fichiers DXF projetés. Ceux-ci sont réalisés à partir du logiciel CadWork et nécessitent d'être modifiés manuellement pour être utilisables par le projecteur laser et le casque de RA.

Ainsi, pour envisager une utilisation pérenne en dehors du cadre de ce travail, tout ce processus de modification et d'optimisation des fichiers devrait idéalement être automatisé, afin que le gain de temps en fabrication ne soit pas annulé par un temps supplémentaire requis en conception, ou du moins, que cet effort soit réduit au minimum.

Afin de répondre aux besoins des opérateurs en termes d'éléments affichés, tout en prenant en compte les contraintes liées à l'export des fichiers DXF depuis CadWork, il serait optimal de pouvoir fournir un fichier DXF dans lequel :

- Le coin du caisson est déplacé vers l'origine du fichier, afin que les deux coïncident.
- Les types d'éléments présents dans le fichier (structure, panneaux, cotations, numéros des éléments, etc.) soient séparés dans des calques distincts, permettant à l'opérateur d'afficher uniquement les informations pertinentes sans surcharger la visualisation.
- De nouveaux traits représentant les milieux des montants de la structure soient créés. Ceux-ci servent à indiquer à l'opérateur l'endroit précis où positionner ses connecteurs (clous, vis, etc.), sans devoir effectuer de mesures.

Par ailleurs, concernant la projection laser, il est nécessaire de réduire le scintillement et d'augmenter la luminosité des traits. Pour y parvenir, les éléments affichés doivent être simplifiés au maximum, en ne montrant que des repères plutôt que l'intégralité de la structure. Le fichier pourrait donc être simplifié ainsi :

- En représentant un seul trait par montant (au lieu de tout le contour), de manière à ce que l'opérateur n'ait qu'un seul bord à aligner.
- En créant des zones d'affichage restreintes, ne montrant que la partie sur laquelle l'opérateur travaille, ce qui permettrait d'augmenter la luminosité localement.

Sur base de ce constat, **un programme en Python a été développé pour réaliser l'ensemble de ces tâches.**

Une interface graphique a également été conçue pour en simplifier l'usage sans nécessiter d'intervenir dans le code. Cette interface a été pensée pour être simple à utiliser.

Cependant, étant donné que l'objectif principal était le traitement des fichiers DXF, l'interface n'a pas été spécifiquement développée selon des critères d'expérience utilisateur, mais simplement pour répondre aux besoins fonctionnels listés précédemment.

3.4.1 Interface et fonctionnalités du logiciel

Dans la figure suivante (3.19), l'interface du logiciel est représentée, avec un numéro associé à chaque fonctionnalité. Les étapes et fonctionnalités sont décrites ci-dessous, tandis que le fonctionnement détaillé du code est présenté en annexe (4.5.0.1).

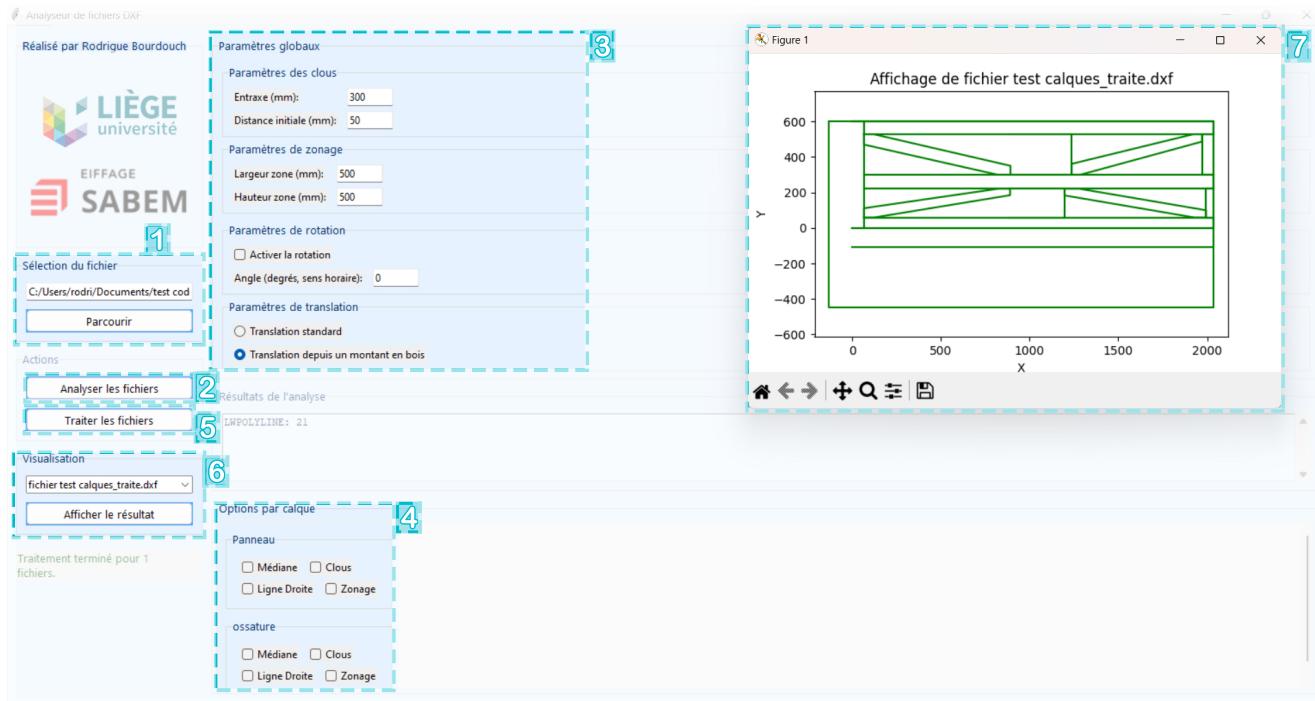


FIGURE 3.19 – Interface du logiciel de traitement de fichier DXF

1 Dans un premier temps, l'utilisateur peut ouvrir les fichiers qu'il souhaite traiter en appuyant sur le bouton "Parcourir".

2 Le bouton "Analyser les fichiers" permet de parcourir le fichier afin de lire l'ensemble des entités qu'il contient, ainsi que les différents calques.

3 Les paramètres globaux à appliquer au fichier, tels que les espacements entre les clous pour le marquage, les paramètres pour générer des zones d'affichage réduites, les options de rotation ou encore le choix du mode de translation, peuvent être définis en cochant ou en encodant les paramètres souhaités.

4 Les différents calques du fichier sont lus, et il est possible, pour chacun d'eux, d'appliquer des modifications spécifiques : appliquer les médianes, tracer des lignes droites, effectuer un "zonage" ou encore dessiner les clous. Ainsi, chaque calque peut recevoir ses propres options selon les besoins.

5 En appuyant sur le bouton "Traiter les fichiers", les différentes options encodées sont appliquées.

6 En appuyant sur le bouton "Afficher le résultat", une fenêtre de prévisualisation s'ouvre **7**, permettant un contrôle visuel des opérations effectuées avant d'utiliser le fichier modifié.

3.4.2 Casque de réalité augmentée

Le premier aspect concerne la disponibilité : si aucun casque n'est accessible pour réaliser un test utilisateur, l'étude se porterait vers une approche plus théorique.

Si le casque est disponible, un premier test portera sur la précision. Il viserait à déterminer si la tolérance offerte par le casque permet de l'utiliser sur un vrai caisson issu de la production, ou si, par manque de précision, il faudrait poursuivre le test utilisateur sur un "caisson test" dont le seul but serait d'expérimenter la technologie, et pour lequel la précision n'aurait pas de réel impact.

La figure suivante (3.20) présente l'ensemble de ces étapes.

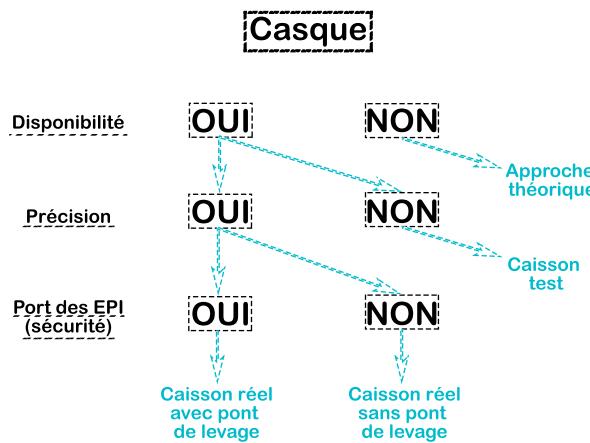


FIGURE 3.20 – Protocole d'expérimentation du casque de réalité augmentée

Le dernier point concerne le port des EPI (port du casque de protection). Si celui-ci est possible en même temps que le port du casque de réalité augmentée, il serait alors possible de tester ce dernier sur un caisson issu de la production, où le pont roulant peut être utilisé. Cela signifie un caisson plus complexe, avec davantage d'étapes mettant en valeur l'intérêt de la réalité augmentée.

Si le port du casque de sécurité et celui du casque de réalité augmentée ne sont pas compatibles (en raison, par exemple, de la réception d'un casque Hololens non adapté aux casques de protection), l'étude se ferait sur un caisson simplifié ne nécessitant pas de pont pour le retourner. Cela impliquerait donc un caisson relativement simple, avec uniquement une structure sur laquelle un panneau est fixé.

Cela ne serait possible que si la disponibilité du casque coïncide avec celle des opérateurs de l'atelier, et en fonction des projets en cours.

3.4.2.1 Disponibilité

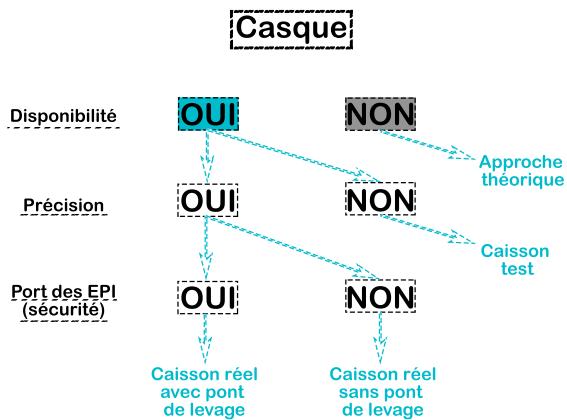


FIGURE 3.21 – Évolution du protocole :Disponibilité du casque

3.4.2.2 Précision

1. Cadre du test de précision :

Cet test a eu lieu le 1^{er} avril 2025. Il a été effectué de façon similaire au test de précision sur l'appareil mobile (voir 3.3.3).

Après le calibrage du casque sur la table de montage, un modèle mesurant 6000[mm] × 3000[mm] a été projeté dessus et les coordonnées des points affichés sur le casque ont été comparées aux coordonnées réelles pour en étudier l'écart.

2. Calibrage du casque :

Comme cela a déjà été introduit plus haut dans la partie 3.3.1.2, le calibrage du casque se fait grâce à une plaque contenant un QR code, qui est lu par le casque et permet de fixer le coin de la table comme axe de référence.

Deux petites plaques de 80×80 [mm], également gravées avec des QR codes, sont ensuite ajoutées sur la table.

Le premier QR code ancre le plan en X et Y ; il est placé dans le coin de la table, exactement au même endroit que la grande plaque utilisée précédemment. Le deuxième QR code fixe la rotation autour de l'axe Z.

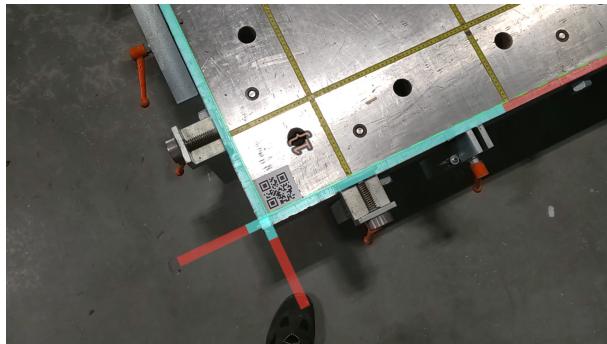
Ensuite, pour finaliser le calibrage, le repère peut être déplacé manuellement selon les axes X, Y et Z afin d'être parfaitement positionné au coin de la table, au millimètre près.

Une fois cette étape effectuée, les plaques peuvent être retirées de la table, et le casque, ayant mémorisé l'origine du repère, peut se localiser dans l'espace grâce à ses capteurs.

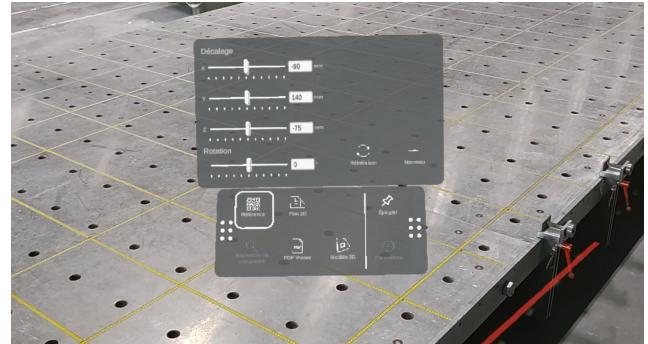
L'entreprise Woodtec a mis à disposition un casque HoloLens 2 équipé de leur logiciel TimberPlan xR pour une durée de trois semaines à partir du vendredi 28 mars 2025.

Grâce à cette mise à disposition, et en suivant le protocole établi précédemment pour le casque (voir 3.20), il est désormais possible d'évaluer la précision offerte par l'appareil afin de poursuivre les tests.

La figure suivante (3.22) présente deux vues depuis le casque : à gauche, la visualisation de l'axe de référence ; à droite, l'interface de réglage manuel du repère.



(a) Positionnement de l'axe de référence au coin de la table à l'aide du QR code principal.



(b) Interface de réglage manuel du repère selon les axes X, Y et Z.

FIGURE 3.22 – Vues depuis le casque HoloLens 2 lors du calibrage : positionnement de l'axe de référence et interface de réglage manuel.

3. Mesure de précision :

Le fichier projeté contient deux couches : l'une placée à l'altitude 0, à la surface de la table, et l'autre située 400[mm] au-dessus de la table de montage. Cette hauteur correspond approximativement à l'épaisseur classique d'un caisson d'ossature bois, et permet d'étudier également l'écart potentiel selon l'axe Z.

Pour mesurer les coordonnées selon les axes X et Y, les règles de mesure intégrées à la table sont utilisées, tandis que pour l'évaluation de l'écart selon l'axe Z, une grille millimétrée est employée.

Neuf points sont évalués, le point numéro 1, situé dans le coin de la table, au niveau de l'origine du repère, est calibré pour être précisément positionné en (0 ; 0 ; 0).

Les coordonnées des points relevés sont présentées dans le tableau suivant :

Point	Xréel [mm]	Xmesuré [mm]	Yréel [mm]	Ymesuré [mm]	Zréel [mm]	Zmesuré [mm]
1	0	0	0	0	400	400
2	0	1	1500	1500	400	399
3	0	1	3000	2997	400	398
4	3000	2997	0	3	400	394
5	3000	2997	1500	1500	400	395
6	3000	2995	3000	3005	400	394
7	6000	5994	0	3	400	394
8	6000	5993	1500	1500	400	395
9	6000	5994	3000	3003	400	392

TABLEAU 3.2 – Coordonnées relevées des neuf points de contrôle projetés

L'écart moyen est de 3,55[mm] selon X, de 1,88[mm] selon Y, et de 4,33[mm] selon Z.

Les écarts étant relativement faibles, ils peuvent être visualisés plus clairement en les amplifiant par un facteur 50, ce qui permet d'observer plus précisément leur évolution.

La figure suivante (3.23) présente un graphique comparant les points réels aux coordonnées mesurées, avec un écart amplifié à l'aide des formules suivantes :

$$X_{\text{mesuréamplifié}} = X_{\text{réel}} + (X_{\text{mesuré}} - X_{\text{réel}}) \times 50 \quad Y_{\text{mesuréamplifié}} = Y_{\text{réel}} + (Y_{\text{mesuré}} - Y_{\text{réel}}) \times 50$$

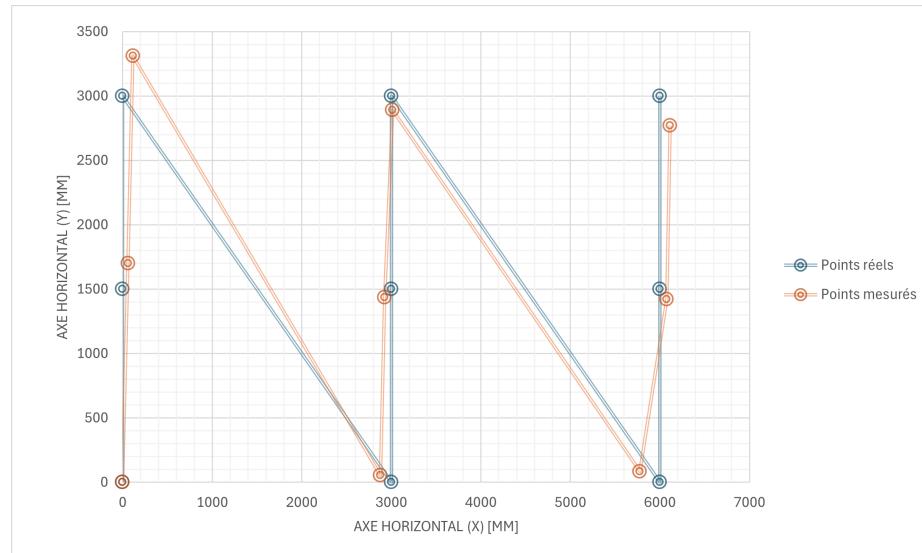


FIGURE 3.23 – Représentation des points mesurés avec écart amplifié $\times 50$ par rapport aux points réels

4. Conclusion / Observation

Précision globale suffisante

Bien que supérieur aux 2,25 [mm] définis précédemment dans la précision nécessaire pour la construction des caissons (voir 2.3.4), l'écart est globalement faible, le test peut être poursuivi sur un caisson réel.

Le plus grand écart observé concerne le point le plus éloigné de l'origine, avec une erreur de 6 [mm].

Cependant, un écart de 6 [mm] pourrait s'avérer trop important. Ainsi, les caissons concernés par le test utilisateur devront avoir une dimension inférieure à 4 mètres, afin de limiter l'écart à environ 4 [mm] et d'éviter des erreurs de fabrication dues à l'imprécision du casque.

Non-linéarité des écarts

L agrandissement par un facteur 50 rend visibles des écarts trop faibles pour être perçus à l'échelle réelle, et permet d'observer que leur répartition n'est pas linéaire.

Si les écarts suivaient une tendance linéaire, il aurait été envisageable d'ajuster le facteur d'échelle du fichier projeté pour les corriger.

Discussion sur la précision des mesures

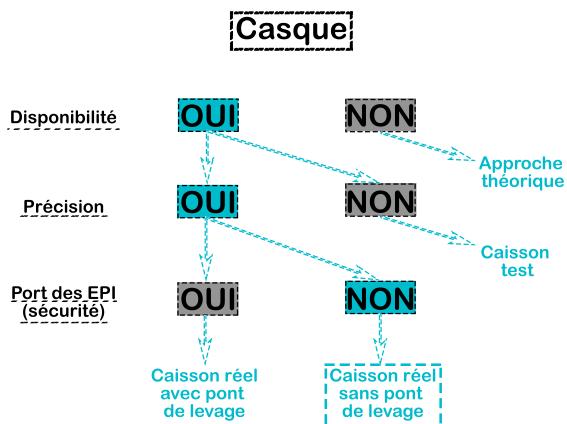
Il reste difficile de relever ces mesures avec précision, car les traits projetés ne sont pas réels et la lisibilité dépend fortement de la qualité de la visualisation offerte par le casque.

Il est possible qu'en ajustant plus précisément l'axe d'origine et en améliorant la rigueur des

relevés, la précision globale puisse être améliorée.

Il pourrait également être pertinent de décaler légèrement l'axe d'origine, afin que les écarts soient répartis plus uniformément sur l'ensemble du caisson, et non uniquement lorsque l'on s'éloigne du point d'origine.

3.4.2.3 Port des EPI (sécurité)



Le casque fourni ne permet pas le port simultané d'un casque de protection.

Ainsi, pour que le test utilisateur puisse être réalisé au sein de l'atelier dans le respect des règles de sécurité, les caissons concernés devront être des caissons ne nécessitant pas l'usage d'un pont de levage, comme l'illustre la figure 3.24, qui présente l'avancement du protocole.

FIGURE 3.24 – Évolution du protocole : Port du casque de sécurité

3.4.2.4 Conclusion sur le test utilisateur à réaliser avec le casque

Un test pourra être mené sur un caisson réel dans l'atelier, sous certaines contraintes :

- Le caisson ne devra pas dépasser 4 [m] de longueur, afin de limiter les écarts liés à la précision du casque.
 - Seuls des caissons ne nécessitant pas de retournement seront envisagés.
 - Il devra être réalisé dans le délai de mise à disposition du casque.

3.4.3 Projection laser (réalité augmentée spatiale)

3.4.3.1 Disponibilité

Deux projecteurs laser ont été loués pour une période de deux mois, afin de permettre la réalisation d'un test utilisateur sur plusieurs caissons.

Contrairement au casque de réalité augmentée, pour lequel les essais sont limités dans le temps et concentrés sur une journée spécifique, le cadre temporel ici est plus flexible. Il a ainsi été décidé de mener une expérimentation sur une semaine complète.

Cette période coïncidait avec le lancement de la production des caissons destinés au projet E6K, représentant environ $2000\ m^2$ d'ossature à réaliser. Il a donc été choisi de baser ces tests sur ce projet en particulier. Les projecteurs laser ont été installés au-dessus de la table de production d'un opérateur volontaire, qui s'est montré particulièrement motivé pour réaliser ce test.

La seule contrainte technique identifiée en amont concernait la gestion des hauteurs variables des deux structures composant chaque caisson. Cela a nécessité une légère adaptation du logiciel de traitement des fichiers DXF, afin de garantir une projection laser cohérente pour chaque phase de fabrication. Cette adaptation sera détaillée dans la suite de cette section (voir 3.4.3.4).

3.4.3.2 Nature du test utilisateur

Alors que l'expérimentation menée avec le casque de réalité augmentée s'inscrit dans une logique verticale, où l'évolution du protocole dépend principalement des contraintes techniques rencontrées (précision, calibration, port des EPI), le test réalisé avec le projecteur laser repose quant à lui sur une logique horizontale, comme l'illustre le schéma présenté dans la figure suivante (3.25).

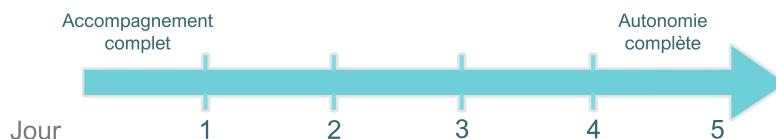
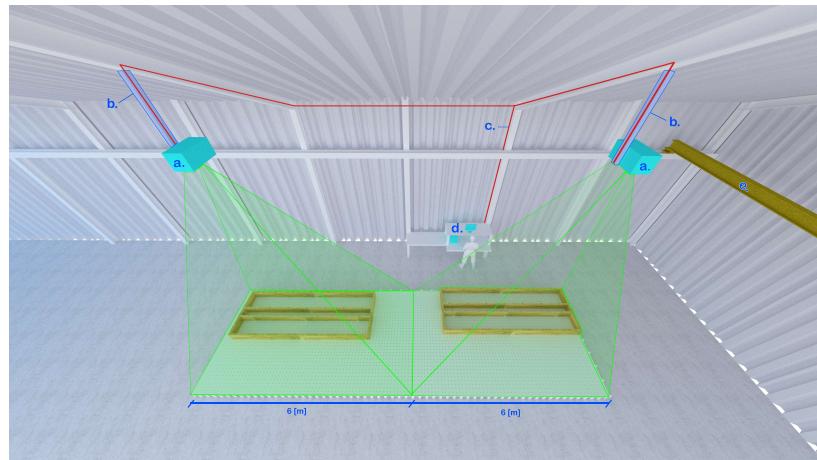


FIGURE 3.25 – Évolution de l'autonomie des opérateurs durant l'expérimentation

Dans ce cas, le protocole évolue en fonction de l'autonomie progressive des utilisateurs. L'expérimentation débute par une phase entièrement guidée, au cours de laquelle l'opérateur est assisté à chaque étape, puis progresse vers une utilisation totalement indépendante du dispositif. Cette progression permet d'évaluer à la fois la prise en main du laser et sa capacité à s'intégrer dans le travail quotidien des opérateurs.

3.4.3.3 Mise en place

La figure suivante comprend deux éléments : une modélisation de l'atelier (3.26a) offrant une vue du dessus sur une table de montage, et une photo prise dans l'atelier (3.26b).



(a) Modélisation simplifiée de l'atelier.



(b) Photo prise dans l'atelier.

FIGURE 3.26 – Images de l'installation technique du projecteur laser dans l'atelier de Sabem.

1. Installation

L'installation a eu lieu durant la semaine du 5 mai 2025. Chaque laser a été fixé à l'ossature métallique de la toiture à l'aide d'une pièce métallique spécifiquement conçue pour ce test, puis soudée à l'ossature afin d'accueillir le support du laser (repère b).

Chaque projecteur est alimenté électriquement via un câble relié à un boîtier électrique, et connecté à l'ordinateur de gestion à l'aide d'un câble réseau RJ45 (repère c). L'ordinateur (repère d), connecté au réseau interne de l'entreprise, peut ainsi recevoir directement les fichiers nécessaires depuis le serveur.

2. Positionnement

Les lasers sont positionnés à une hauteur de 7,3 m au-dessus de la surface de la table de produc-

tion, longue de 12 m. Chacun est réglé pour projeter sur environ la moitié de la table, permettant une couverture complète lorsqu'ils sont utilisés conjointement.

La hauteur des projecteurs a été choisie de façon à être positionnés au-dessus du pont de levage (repère e).

3. Calibration et paramétrage logiciel

La calibration et la configuration du logiciel ont été réalisées par un technicien de l'entreprise LapLaser, sur une durée de deux jours. Cette étape s'est déroulée de manière similaire aux essais précédents (3.3.2.1), mais avec un niveau de précision plus élevé, l'installation étant destinée à un usage de longue durée.

Durant cette phase, l'interface logicielle, illustrée dans la figure ci-dessous (3.27), a été personnalisée selon les besoins de Sabem. Les options et boutons ont été programmés pour permettre une utilisation complète via la télécommande opérateur, sans qu'il soit nécessaire de revenir à l'ordinateur ; à l'exception de l'ouverture initiale du fichier DXF.

4. Procédure d'utilisation du laser

(a) Ouverture et préparation du fichier DXF

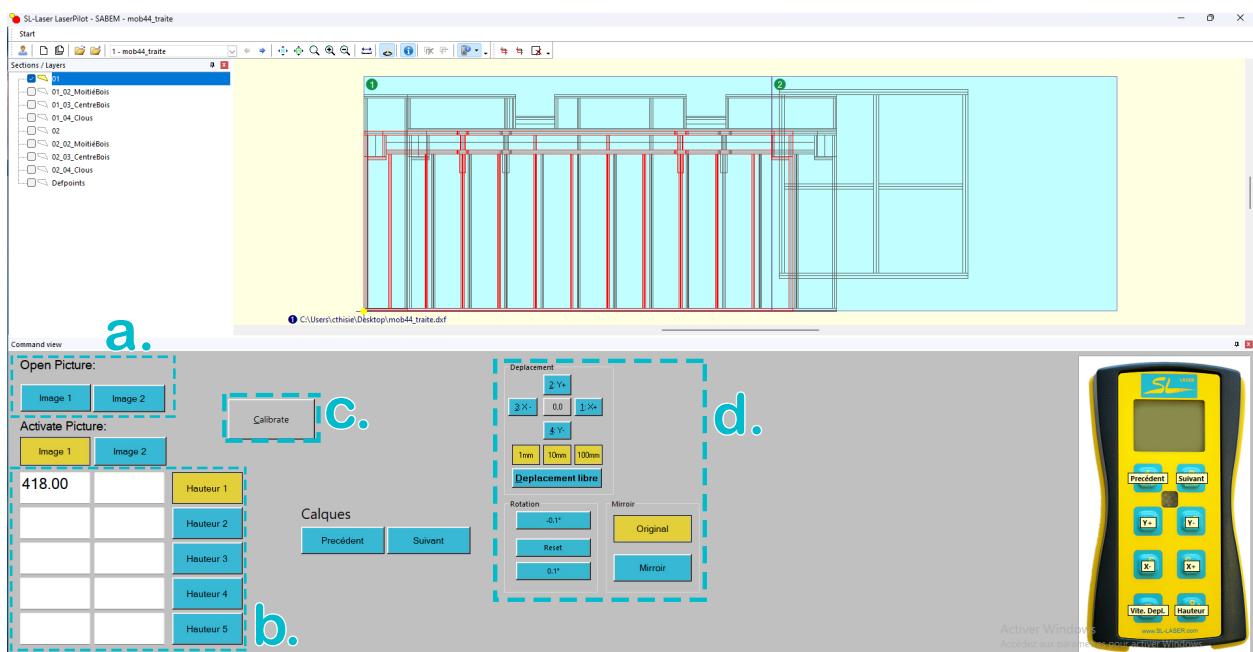


FIGURE 3.27 – Interface du logiciel pour le laser

L'opérateur commence par ouvrir un fichier DXF dans le programme. Celui-ci est ensuite assigné à l'image 1 ou 2 (repère a), correspondant à l'un des deux projecteurs. Cela permet d'afficher simultanément deux fichiers distincts sur la table de production : un par laser. Cette fonctionnalité est particulièrement utile dans le cas de petits caissons, où deux opérateurs peuvent travailler indépendamment. Pour les grands caissons, les deux lasers travaillent de manière synchronisée pour afficher l'ensemble du projet.

L'opérateur doit ensuite indiquer les hauteurs de projection (repère b), qui correspondent aux hauteurs des montants en bois, et à celles des montants en bois en plus de l'épaisseur des

panneaux (OSB, plâtres, etc.). Ces informations sont généralement précisées dans les fichiers DXF pour simplifier l'opération.

Une fois ces paramètres définis, l'opérateur lance le calibrage automatique en appuyant sur le bouton prévu à cet effet (repère c). Le laser s'aligne alors avec précision sur la table. D'autres options (repère d) permettent d'appliquer des modifications de base au fichier, notamment lorsqu'il n'est pas correctement positionné à l'origine. Il est par exemple possible d'effectuer des translations, des rotations ou même un affichage en miroir.

(b) Gestion des calques via la télécommande opérateur

Une fois le fichier chargé et calibré, toutes les opérations peuvent être effectuées directement depuis la télécommande, illustrée dans la figure suivante (3.28).



FIGURE 3.28 – Télécommande opérateur

- (1) : passer au calque précédent
- (2) : revenir au calque suivant
- (3) : déplacer le fichier vers le haut
- (4) : déplacer le fichier vers le bas
- (5) : déplacer le fichier vers la gauche
- (6) : déplacer le fichier vers la droite
- (7) : changer la vitesse de déplacement (1[mm] ou 10[mm] ou 100[mm])
- (8) : changer la hauteur d'affichage

3.4.3.4 Adaptation du logiciel de traitement des fichiers DXF aux spécificités des caissons à deux hauteurs

Les caissons construits durant cette phase présentent une particularité : ils sont fabriqués en deux parties distinctes. La première est composée de montants d'une hauteur de 400 [mm], tandis que la seconde utilise des montants de 220 [mm]. Ces deux structures sont ensuite assemblées pour former le caisson final.

La figure schématique ci-dessous (3.29) illustre cette particularité de fabrication en deux parties. Les plans détaillés d'un caisson construit selon ce principe sont disponibles en 3.35.

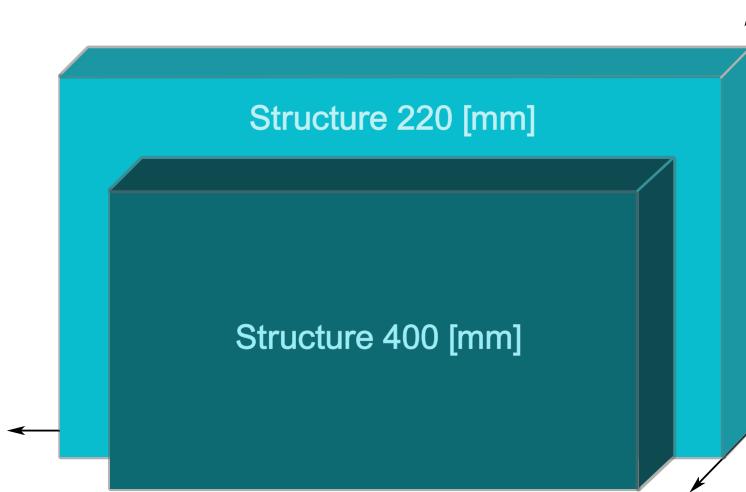


FIGURE 3.29 – Vue d'un caisson composé de deux structures à deux hauteurs (400 [mm] et 220 [mm])

Cette spécificité a nécessité une adaptation du logiciel de traitement des fichiers DXF, initialement conçu selon les contraintes du casque de réalité augmentée, et donc non adapté à ce type de configuration.

Dans un premier temps, une réflexion a été menée avec les dessinateurs afin de définir une méthode d'export optimisée, compatible avec leurs outils et leurs pratiques. La solution retenue consiste à générer un fichier DXF structuré en deux calques distincts : l'un contenant la partie de la structure avec les montants de 220 [mm], l'autre la structure complète avec les montants de 400 [mm].

Cette organisation suit l'ordre réel de fabrication adopté par les opérateurs, qui construisent d'abord la partie en 400 [mm] (étape 01), puis celle en 220 [mm] (étape 02). Le logiciel a donc été modifié pour interpréter séparément les deux calques et appliquer à chacun un traitement spécifique. Une attention particulière a été apportée à la superposition correcte des deux calques (structures).

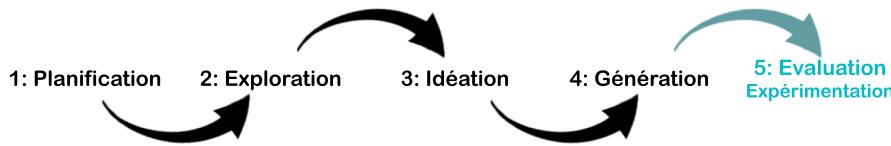
Ainsi, après le traitement dans le logiciel, les calques sont organisés de manière logique pour suivre les étapes de production. Cette hiérarchisation permet à l'opérateur de ne pas avoir à parcourir l'intégralité de la liste pour trouver l'information recherchée.

Exemple de nommage :

01_01
01_02_MoitiStructure
01_03_CentreBois
01_04_Clous
02_01
02_...

- 01 indique la première étape de fabrication (hauteur de 400 [mm]) tandis que 02 concerne la seconde étape (structure de 220 [mm])
 - 01_01 affiche la totalité de la structure (du calque)
 - 01_02_MoitiStructure projette uniquement la moitié des montants bois
 - 01_03_CentreBois indique la ligne médiane des montants
 - 01_04_Clous repère les emplacements des clous
- Enfin, un calque vide a également été prévu afin de permettre à l'opérateur de travailler sans affichage laser lorsqu'une tâche de concentration particulière est requise.

3.5 Évaluation | Expérimentation



La section précédente (3.4) avait pour objectif de détailler les choix effectués pour l'élaboration des protocoles des tests utilisateurs.

Elle a également permis d'expliquer comment les contraintes identifiées lors des phases d'exploration (3.2) et d'idéation (3.3) ont été prises en compte.

La présente section (3.5) est consacrée à l'expérimentation, d'abord avec le casque de réalité augmentée, puis avec le dispositif de projection laser.

Comme mentionné dans la partie théorique dédiée à l'expérimentation (2.4.2), ces deux tests utilisateurs ont pour objectif de recueillir des données finales, à la fois sur les aspects techniques (gain de temps, précision, etc.) et sur l'expérience utilisateur (utilité, utilisabilité, charge cognitive, etc.). Ces données feront ensuite l'objet d'une analyse approfondie.

3.5.1 Expérimentation du casque de réalité augmentée

3.5.1.1 Présentation du test utilisateur

Le test utilisateur s'est déroulé le 17 avril 2025 au sein de l'atelier de chez Sabem et a été réalisé par deux opérateurs. Le but principal est d'évaluer si le casque peut permettre de répondre aux besoins des opérateurs pour leurs tâches en atelier.

Pour ce faire, les opérateurs ont été observés durant les processus de fabrication, afin de recenser les interventions nécessaires (pour savoir si elles sont dues à un manque d'apprentissage du casque ou à des dysfonctionnements), les moments où ils ont eu recours aux plans papier, ainsi que les erreurs/- frustrations causées par l'utilisation du casque.

Le test se compose en 3 phases :

- **Phase 1 : Apprentissage** - vidéo explicative et caisson test
- **Phase 2 : Caisson réel avec assistance** – mise en situation réelle avec possibilité d'intervention
- **Phase 3 : Caisson réel sans assistance** – mise en situation réelle sans possibilité d'intervention, avec mesure des temps d'opération et comparaison avec un caisson réalisé sans le casque

À la suite desquelles un questionnaire a été proposé aux opérateurs afin d'évaluer cinq critères : utilité, utilisabilité, précision, affordance et charge cognitive.

Les résultats du questionnaire UX et l'analyse des observations effectuées seront présentés ultérieurement.

Le protocole détaillé figure en annexe(voir 4.5), tandis que le déroulement des trois phases de test est exposé ci-après.

Avant cela, la préparation du casque et de l'espace de production a été réalisée selon les étapes suivantes :

1. Calibration du casque sur la table de production ([3.3.1.2](#))
2. Vérification du bon fonctionnement des fichiers utilisés et de leur précision
3. Mise en place des caméras pour enregistrer la table de production (avec l'accord des participants)
4. Explication du déroulement du test aux opérateurs

Limitations du test

Les caissons fabriqués ont été sélectionnés en fonction des disponibilités actuelles de l'atelier, ainsi que des contraintes évoquées précédemment (voir [3.4.2.4](#)).

Durant le test, les opérateurs seront relativement autonomes dans l'utilisation du casque pour les étapes de fabrication. En revanche, toutes les étapes en amont, comme la préparation des fichiers, le calibrage du casque ou encore les réglages techniques, ont été prises en charge au préalable par nos soins. Ce choix est directement lié à la durée limitée du prêt du casque, au manque d'équipement disponible, mais aussi à l'absence de temps prévu pour la formation des opérateurs.

Par ailleurs, il est important de noter que les opérateurs n'étaient pas initialement très enthousiastes à l'idée d'utiliser ce type d'outil, en raison de certains a priori. Afin de ne pas imposer un test sur une longue durée, une approche plus progressive a été privilégiée pour favoriser leur engagement et recueillir des retours sincères.

Pour envisager un test avec une autonomie complète des opérateurs, plusieurs éléments auraient été nécessaires : la mise à disposition d'un ordinateur (dans l'atelier) tout au long du test pour le transfert des fichiers DXF vers le casque, une station de recharge (le casque ayant une autonomie d'environ 2 heures), et surtout, une formation complète, estimée à une journée.

Malgré ces contraintes, le test mené a permis d'obtenir des premiers retours d'usage intéressants et apporte une réponse concrète aux deux objectifs de recherche définis au début de ce travail [1.2](#).

3.5.1.2 Phase 1 : Apprentissage

L'apprentissage du casque, et plus particulièrement la familiarisation avec l'interface du programme TimberPlan xR, s'est fait via une vidéo explicative ainsi qu'un caisson dit "test" que les opérateurs ont pu réaliser.

Vidéo explicative

Une vidéo de 4 minutes, filmée depuis le casque, a été proposée aux opérateurs afin qu'ils puissent découvrir l'interface de l'application.

Les différentes fonctionnalités nécessaires à la réalisation du test y ont été présentées.

Caisson "Test"

La seconde partie de la phase d'apprentissage consistait en la fabrication d'un caisson "test" mesurant 60 [cm] x 70 [cm], entièrement réalisé à l'aide du casque.

Le caisson est composé de cinq montants surmontés par un panneau. Les plans utilisés pour cette fabrication sont présentés dans la figure suivante (3.30).

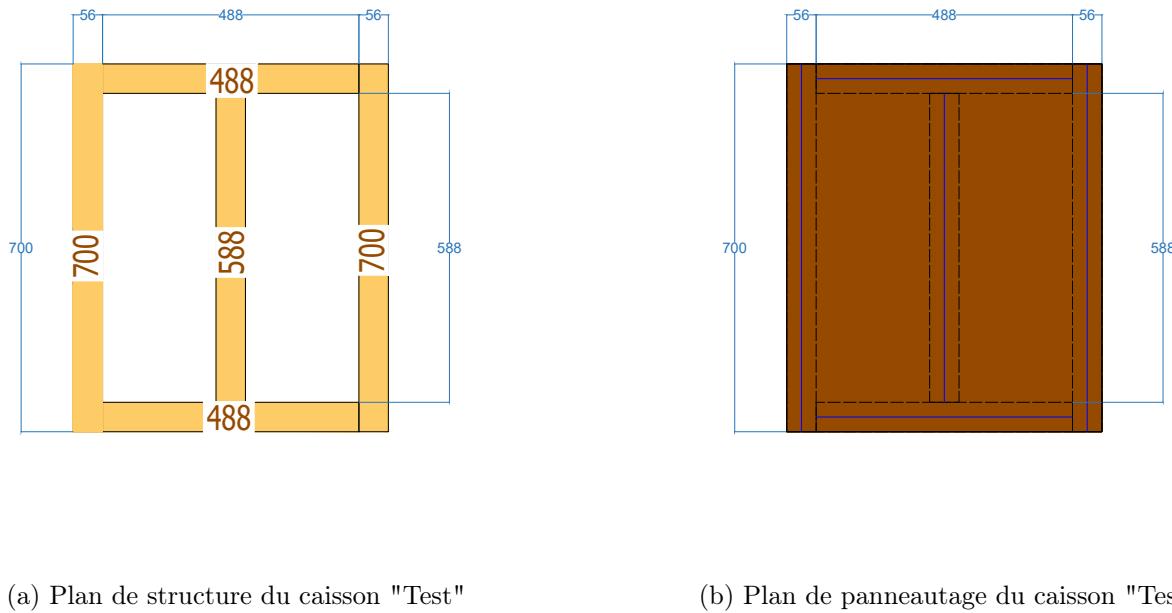


FIGURE 3.30 – Plans de montage du caisson "Test"

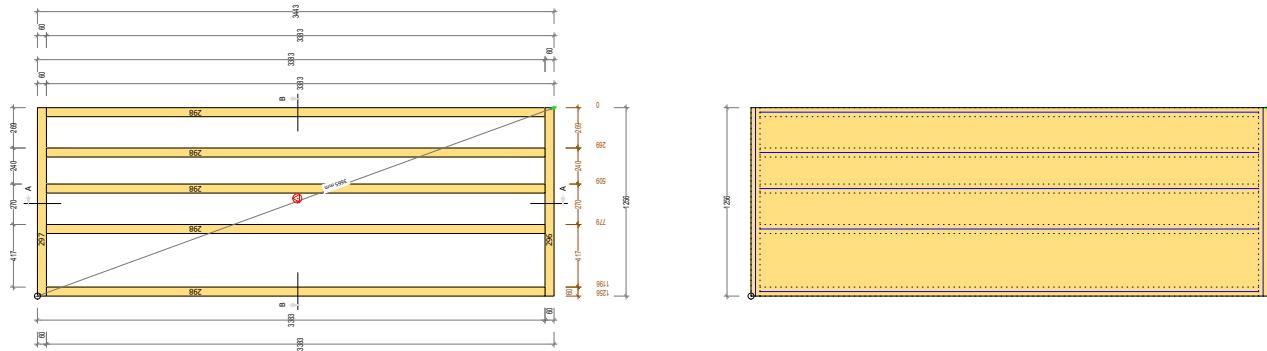
Cette première prise en main du casque, sur un caisson similaire à celui qu'ils allaient devoir construire par la suite, a permis aux opérateurs de se familiariser avec l'interface du logiciel, tant pour la construction de la structure (plan 3.30a) que pour l'étape de panneautage (plan 3.30b).

La première observation effectuée est que les opérateurs avaient du mal à cliquer sur les fenêtres de l'application, car ils peinaient à estimer la distance entre leur main et la fenêtre sur laquelle ils devaient cliquer.

3.5.1.3 Phase 2 : Caisson réel avec assistance

Durant cette phase, chacun des opérateurs a construit un caisson issu de la production réelle. Les deux caissons produits n'étaient pas identiques, mais le procédé constructif ainsi que leurs dimensions étaient relativement similaires.

Le premier, fabriqué par l'opérateur n°1, est un caisson rectangulaire dont le panneautage suit l'ossature, sans nécessiter de découpes particulières. Les dimensions générales du caisson sont de 3283 x 1256 [mm]. Les plans correspondants sont présentés dans la figure suivante (3.31).

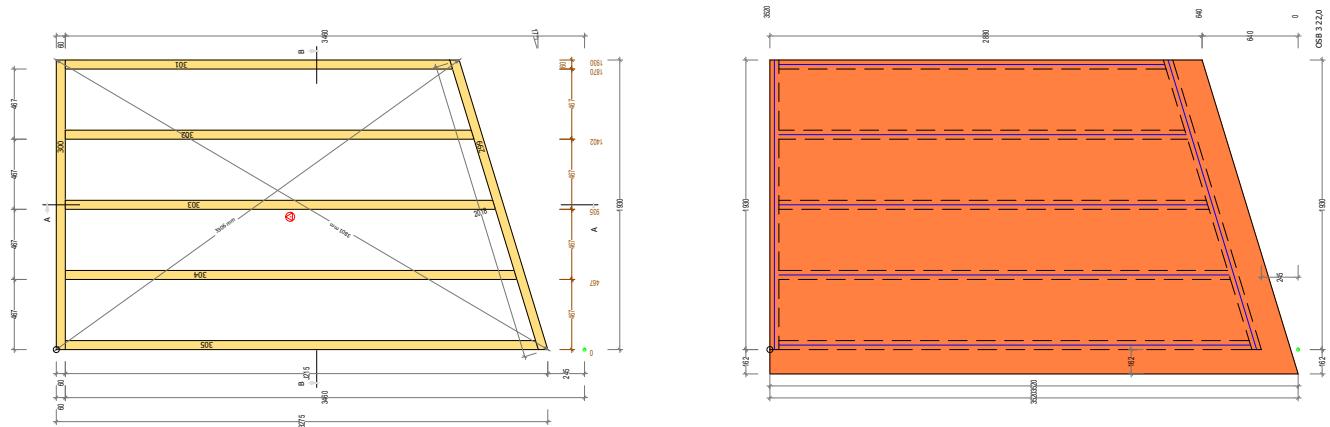


(a) Plan de structure du premier caisson

(b) Plan de panneautage du premier caisson

FIGURE 3.31 – Plans affichés dans le casque pour le montage du premier caisson

Le second, fabriqué par l'opérateur n°2, est un caisson un peu plus complexe : sa forme est trapézoïdale et il présente un décroché au niveau du panneau, qui devra donc être découpé par la suite. La dimension globale (panneau + ossature) est de 3520 x 2092 [mm]. Les plans correspondants sont présentés dans la figure suivante ([3.32](#)).



(a) Plan de structure du second caisson

(b) Plan de panneautage du second caisson

FIGURE 3.32 – Plans affichés dans le casque pour le montage du second caisson

Durant cette phase de construction, les opérateurs étaient libres de recourir à leurs plans papier dans les cas où le casque, à lui seul, ne leur permettait pas de réaliser leur tâche. J'étais également disponible pour résoudre les problèmes liés au casque et répondre aux questions.

Initialement, il avait été prévu que je guide l'opérateur à distance via le flux vidéo direct du casque, afin de l'aider à résoudre ses problèmes. Cependant, la connexion internet limitée dans l'atelier n'a pas

permis de maintenir ce flux, et en cas de difficulté, En cas de difficulté, j'ai donc dû reprendre le casque moi-même pour résoudre les problèmes rencontrés.

Les retours aux plans papier ont été relevés afin d'estimer le degré d'utilisation effective du casque selon la tâche réalisée : construction de l'ossature, prise de mesure/vérification, et panneautage. En tant qu'observateur, j'ai également noté les erreurs ayant nécessité mon intervention, ainsi que leur cause. Enfin, les verbalisations spontanées des opérateurs liées à l'usage du casque ont été rapportées. Cependant, les temps d'opération n'ont pas été mesurés, car ils n'auraient pas été représentatifs dans le cadre d'une première utilisation du casque.

Les données recueillies figurent dans le tableau ci-dessous et seront analysées par la suite.

	Tâche	Taux d'utilisation du casque	Nombre d'erreurs	Verbalisations
Opérateur 1	Construction de l'ossature	85%	1	<ul style="list-style-type: none"> - J'ai l'impression que l'épaisseur des traits qui montre les montants est trop épaisse. - Il faudrait peut-être afficher un seul trait pour les montants afin d'apporter moins de confusion. - Ce serait mieux si l'affichage se faisait sur la surface supérieure des bois.
	Vérifications / Mesures	60%	1	
	Panneautage	100%	0	<ul style="list-style-type: none"> - Impeccable! - Ce serait super s'il y avait des croix pour indiquer où placer les clous et peut-être une ligne qui devient verte lorsqu'on a cloué au bon endroit.
Opérateur 2	Construction de l'ossature	80%	1	<ul style="list-style-type: none"> - Il y a un décalage de 5 mm mais uniquement sur un des montants.
	Vérifications / Mesures	100%	0	
	Panneautage	100%	2	<ul style="list-style-type: none"> - Il y a un menu qui est venu se mettre devant. - C'est beaucoup plus précis que le laser car celui-ci bougeait constamment, alors que là c'est stable. Franchement, c'est super.

TABLEAU 3.3 – Commentaires des opérateurs et taux d'utilisation du casque

3.5.1.4 Phase 3 : Caisson réel sans assistance

Durant cette phase, seul un des deux opérateurs a construit un caisson à l'aide du casque, puis ce même opérateur a réalisé une seconde fois le même caisson en suivant les méthodes traditionnelles,

c'est-à-dire à partir des plans papier. Un seul opérateur a pu effectuer cette phase, en raison des disponibilités de l'atelier.

Les différentes étapes de construction ont été chronométrées afin de comparer, pour un même caisson, les temps d'exécution avec et sans l'utilisation du casque.

Comme pour la phase 2, des données ont été relevées concernant l'utilisation des plans papier, les erreurs commises ainsi que les verbalisations faites pendant la construction.

Certes, un seul caisson a été réalisé, ce qui ne permet pas de fonder les résultats sur un nombre important de tests, mais cela donne une première idée du temps potentiellement gagné, ainsi que des étapes où ces gains sont les plus significatifs.

Le caisson fabriqué est de forme rectangulaire, avec un décroché au niveau du panneau, qui devra donc être découpé par la suite. Les dimensions globales (panneau + ossature) sont de 3680 x 1891 mm. Les plans correspondants sont présentés dans la figure suivante (3.33).

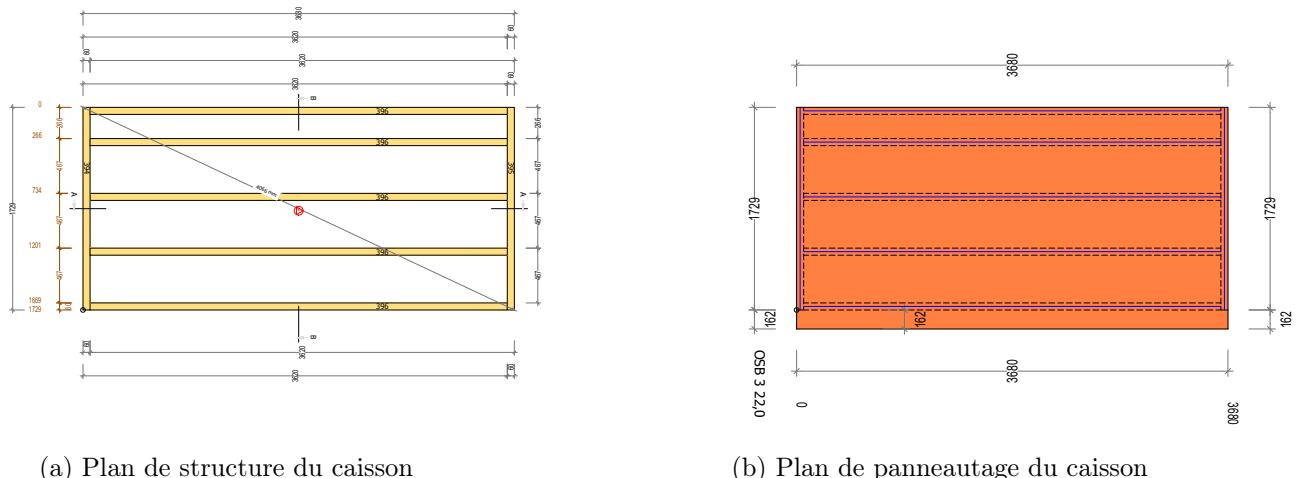


FIGURE 3.33 – Plans affichés dans le casque pour le montage du caisson

Les données recueillies figurent dans le tableau ci-dessous et seront analysées par la suite.

	Tâche	Taux d'utilisation du casque	Nombre d'erreurs	Temps avec casque (min)	Temps sans casque (min)	Verbalisations
Opérateur 1	Construction de l'ossature	100%	0	15	19	/
	Vérifications / Mesures	100%	0	2	3	- Pour les mesures de la diagonale, c'est génial.
	Panneautage	100%	1	31	41	/

TABLEAU 3.4 – Taux d'utilisation du casque et commentaires

3.5.2 Casque de réalité augmentée : Observations et analyses

3.5.2.1 Questionnaire UX

À la suite de la phase 2 pour l'opérateur 1 (Caisson réel avec assistance), et de la phase 3 pour l'opérateur 2 (Caisson réel sans assistance), les opérateurs ont été invités à remplir un questionnaire d'évaluation portant sur cinq critères :

- Utilité : Mesure dans quelle mesure le casque a aidé à accomplir les tâches plus efficacement et s'il apporte une valeur ajoutée par rapport aux méthodes traditionnelles.
- Utilisabilité : Évalue la facilité d'utilisation du casque, notamment l'apprentissage, la navigation entre les calques et la stabilité technique.
- Affordance : Se concentre sur l'intuitivité de l'interface, la clarté de l'organisation des calques et la compréhension des interactions.
- Précision : Jauge la fiabilité des informations affichées et la capacité du casque à éviter des erreurs.
- Charge cognitive : Analyse l'effort mental perçu, comme la fatigue visuelle, la surcharge d'informations ou la complexité de l'attention demandée.

Une échelle de Likert allant de 0 à 5 a été choisie afin de permettre, lors du calcul des moyennes, d'obtenir une valeur minimale de 0/5, représentant une absence totale de qualité perçue pour chaque critère évalué.

Bien que ce codage soit légèrement différent des conventions habituelles (1–5), il a été privilégié pour renforcer l'interprétabilité des résultats, en associant directement la note minimale (0) à une perception nulle, et la note maximale (5) à une perception optimale.

Les questionnaires complétés, ainsi que les réponses des opérateurs, sont disponibles en annexe (voir [4.5.0.3](#))

3.5.2.2 Analyse des critères d'évaluation

Dans le graphique suivant ([3.34](#)), les résultats sont représentés sur une échelle de 0 à 5. Ils ont été obtenus en calculant la moyenne des scores pour chaque critère, individuellement pour chaque utilisateur, mais aussi en calculant la moyenne des résultats des deux utilisateurs.

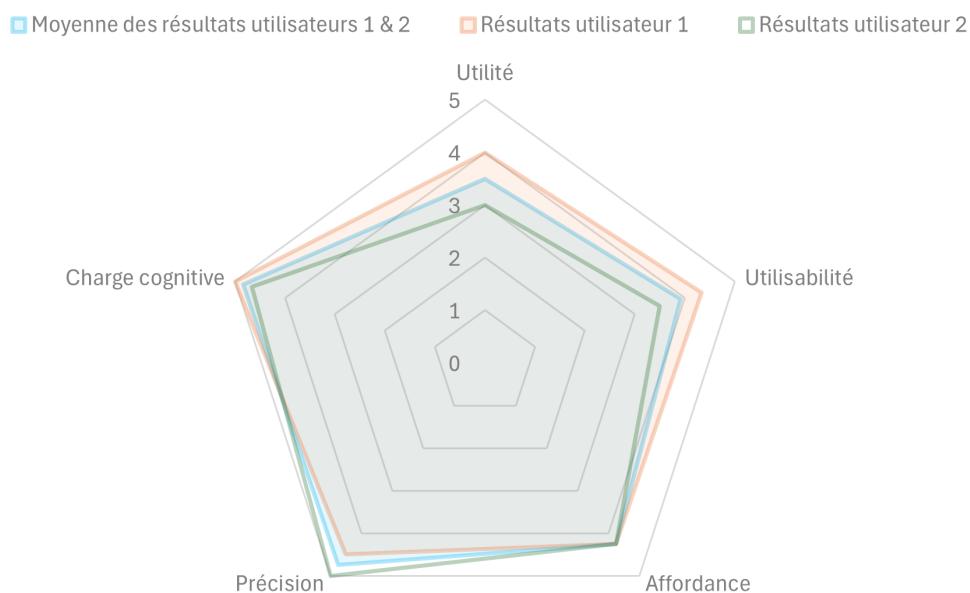


FIGURE 3.34 – Résultats moyens par critère UX pour chaque utilisateur et moyenne globale.

1. Utilité (moyenne = 3,5/5)

Ce score indique une perception positive mais modérée de l'utilité. Les taux d'utilisation atteignant jusqu'à 100% pour certaines tâches de fabrication, telles que le panneauage, indiquent une réelle valeur ajoutée dans certains cas d'usage.

Cependant, des suggestions comme « un seul trait pour les montants pour éviter la confusion » ou « affichage sur la surface supérieure » montrent que certaines limitations graphiques ou ergonomiques du casque ont pu réduire son utilité perçue. C'est par exemple le cas du léger décalage (± 2 [mm]) entre l'affichage et la position correcte des montants, qui place l'opérateur dans un dilemme : soit il suit l'indication du casque, en acceptant un positionnement approximatif mais tolérable, soit il s'appuie sur ses propres mesures, ce qui crée alors un décalage visible entre la vue projetée et la réalité du montant posé.

De manière similaire, certains bois peuvent présenter de légers défauts (écart ou déformations) qui ne sont pas pris en compte dans le modèle, lequel reste fixe. Cela peut placer l'opérateur dans une situation d'incertitude quant à la bonne décision à prendre : suivre le modèle affiché, ou s'adapter aux réalités du matériau.

Enfin, il est important de noter que les opérateurs se sont montrés demandeurs d'un casque à l'issue de l'expérimentation. Ils ont souligné que, pour des caissons plus grands et plus complexes, où de nombreux éléments différents doivent être positionnés, l'utilisation du casque pourrait accélérer considérablement le placement des composants. Cette demande spontanée montre qu'ils y voient un réel intérêt pratique, au-delà du test réalisé, et qu'ils reconnaissent le potentiel de gain de temps et de précision dans des situations plus exigeantes.

Cependant, l'affichage de structures plus grandes pourrait entraîner des décalages plus marqués, susceptibles de provoquer des erreurs de montage, ou même de placer l'opérateur dans une situation d'incertitude accrue.

2. Utilisabilité (moyenne = 3,9/5)

Le score de 3,9 sur 5 montre que le casque est perçu comme plutôt facile à utiliser, mais que certains obstacles techniques ou pratiques ont limité cette utilisabilité.

Des bugs et crashes du casque ont nécessité des interventions extérieures, ce qui a certainement contribué à faire baisser la note.

Dans ces situations, les utilisateurs n'étaient pas en mesure de résoudre eux-mêmes les problèmes, ce qui a pu créer une forme de dépendance technique.

De plus, l'apprentissage était ciblé et visait simplement à permettre aux opérateurs de réaliser leurs tâches de fabrication, sans trop entrer dans les réglages du système ni le paramétrage du casque. Un apprentissage plus global et plus complet aurait sûrement permis de :

- Réduire les erreurs d'usage ou les blocages en cas de bugs.
- Favoriser une meilleure autonomie des utilisateurs.
- Améliorer la fluidité de l'expérience.

3. Affordance (moyenne = 4.25/5)

Le score d'affordance est très positif et montre que le système de calques était globalement compréhensible, et que la navigation entre les différents calques était perçue comme facile et bien organisée.

Cependant, certains éléments peuvent rendre certains affichages ou gestes moins intuitifs.

C'est notamment le cas de l'ouverture de la fenêtre de visualisation des calques, qui s'effectue en présentant la paume de la main devant le casque. Ce geste n'était pas toujours reconnu lorsque l'utilisateur portait des gants de sécurité, l'obligeant à retirer son gant à plusieurs reprises pour accéder au menu.

Par ailleurs, il est arrivé que cette fenêtre s'affiche en plein milieu du champ de vision de l'opérateur, perturbant la visualisation des éléments à positionner.

Enfin, lorsque l'utilisateur regardait au loin ou légèrement hors du centre du champ visuel, certains éléments pouvaient apparaître décalés par rapport à leur position réelle, ce qui nuisait à la perception globale de l'alignement.

Malgré cela, le fait que les informations recherchées, telles que les cotations, les numéros des montants à placer ou encore les emplacements des clous, soient directement accessibles rend l'outil globalement facile à utiliser. Il n'est pas nécessaire de naviguer longuement dans les menus pour trouver ce que l'on cherche : un simple clic permet d'afficher un calque contenant toutes les informations utiles.

Cela s'est notamment illustré lors de la réalisation du caisson de la phase 3, qui a été effectuée sans recours aux plans papier. Cela montre que les informations affichées sont suffisantes pour guider l'utilisateur et qu'elles sont présentées de manière claire et rapidement identifiable.

Comme mentionné précédemment dans le critère d'utilité, certains commentaires, notamment le souhait de n'afficher qu'un seul trait par montant, soulignent une certaine discordance entre l'affichage virtuel et les attentes perceptives naturelles des opérateurs. Le léger décalage observé dans certains cas vient également nuancer ce ressenti globalement positif.

4. Précision (moyenne = 4,75/5)

La précision perçue du casque est excellente.

Initialement, les opérateurs ont préféré vérifier les premières mesures par eux-mêmes, mais une fois convaincus de la fiabilité du système, ils ont accordé leur confiance aux éléments affichés. Cela les a amenés à réaliser certaines tâches sans prise de mesure préalable, se reposant entièrement sur les indications du casque.

Cette confiance est particulièrement visible lors des étapes de panneautage : dans ces phases, l'opérateur ne voyant pas directement la structure (car masquée par les panneaux), il peut positionner les clous sans percevoir de décalage visuel, ce qui renforce l'intérêt du guidage en réalité augmentée. C'est également le cas pour la découpe des panneaux lors de la phase 2, entièrement réalisée à partir des indications affichées.

Les opérateurs ont d'ailleurs souligné cette précision à travers des commentaires comme : « C'est beaucoup plus précis que le laser ». Lors d'expériences précédentes avec un système de projection laser, les traits projetés bougeaient parfois à cause des vibrations provoquées par un pont de levage. À l'inverse, avec le casque, ils ont apprécié que les lignes restent parfaitement stables, sans tremblement ni décalage visible.

Même si les rares imprécisions observées n'ont pas conduit à un rejet de l'outil, elles pourraient, sur des structures plus complexes, engendrer des erreurs cumulées. Il serait donc pertinent de prévoir un système de recalibrage ponctuel ou une option d'ajustement manuel, afin de garantir la précision sur l'ensemble du processus de fabrication.

5. Charge cognitive (moyenne = 4.83/5)

Le casque a été perçu comme exigeant très peu d'effort mental ou visuel. Les notes du questionnaire concernant la fatigue mentale, la surcharge d'informations ou la nécessité de prêter attention à trop d'éléments à la fois sont toutes très favorables. Cela suggère que le dispositif a été bien conçu pour ne pas surcharger l'utilisateur sur le plan cognitif.

Il est également important de noter que le casque utilisé, un Hololens, se prête bien à une utilisation en atelier. Il est relativement léger, se fait facilement oublier une fois porté, et sa visière, bien que légèrement teintée, reste très transparente et peut être relevée à tout moment. Ces caractéristiques en font un appareil ergonomique, facile à porter au quotidien. Le fait qu'il s'agisse d'un système "optical see-through" (cf. [2.2.3.2](#)) le rend particulièrement adapté aux tâches en environnement de production, car il permet de superposer les informations virtuelles sans masquer la réalité.

Les commentaires recueillis évoquent bien quelques suggestions d'amélioration (par exemple, un affichage plus clair ou l'ajout d'une ligne verte de validation). Aucun ne fait état d'une surcharge mentale liée à l'usage du casque. Cela contraste avec les douleurs à la tête que les opérateurs disaient ressentir avec le système de projection laser utilisé dans leur ancien atelier.

Cela montre que la réalité augmentée, dans ce contexte, a su rester discrète et pertinente, en fournissant des informations utiles au bon moment, sans envahir le champ visuel ni multiplier les sollicitations inutiles.

3.5.2.3 Erreurs et problèmes fréquents rencontrés

1. Retour au menu de démarrage du casque

À 4 reprises, les opérateurs se sont retrouvés sur le menu de démarrage du casque, perdant ainsi l'affichage des éléments de travail. Cela semble dû à une détection erronée de mouvements de mains pendant les opérations de fabrication. Ces gestes ont été mal interprétés par le casque, provoquant le retour accidentel à ce menu.

2. Mise en veille du casque

À 2 reprises, le casque s'est éteint et a dû être rallumé pour poursuivre les opérations de fabrication. Comme pour le retour au menu de démarrage, une mauvaise interprétation des mouvements de mains pourrait en être la cause. Une autre hypothèse est que le casque a lancé à plusieurs reprises l'application TimberPlan xR, ce qui aurait surchargé la mémoire de l'appareil, entraînant l'arrêt automatique du casque.

3.5.2.4 Analyse des performances

Pour un même caisson construit par le même opérateur, le temps total a été de 63 minutes sans le casque et de 48 minutes avec, soit 15 minutes gagnées, correspondant à un gain de 23,81 %.

Les différentes tâches peuvent être séparées pour identifier plus précisément où les gains de temps ont été les plus significatifs.

Le temps de construction de l'ossature sans casque a été de 19 minutes contre 15 minutes avec, ce qui correspond à un gain de 21,05 %. Ce temps gagné provient essentiellement du placement des montants,

qui peut se faire sans avoir à tracer manuellement leurs emplacements. En revanche, pour le vissage des montants entre eux, le casque ne permet pas réellement de gain de temps, puisqu'il n'indique pas les emplacements précis des vis. Il peut cependant aider l'opérateur à visualiser les types d'assemblages à effectuer, notamment en affichant une fenêtre avec le fichier PDF détaillant les assemblages, évitant ainsi d'avoir à se déplacer avec une feuille de plans.

Le temps nécessaire aux mesures de vérification (prise des diagonales et contrôle des entraxes) a duré 3 minutes avec les plans papier et 2 minutes avec le casque, soit un gain de 33,33 %. Ce pourcentage reste peu représentatif en raison de la brièveté de l'opération sur un petit caisson. Néanmoins, l'avantage du casque est d'offrir à l'opérateur les informations de mesure directement dans son champ de vision, sans devoir faire de nombreux allers-retours vers les plans. Il permet également un contrôle visuel rapide, utile pour vérifier par exemple qu'aucun montant n'a été oublié, ce qui peut arriver dans des structures plus complexes comportant de nombreux éléments.

L'opération de panneautage, comprenant le clouage et la découpe des panneaux, a duré 41 minutes sans le casque et 31 minutes avec, soit un gain de 24,39 %. Ce gain provient principalement du fait que, sans le casque, l'opérateur devait tracer manuellement tous les traits indiquant où cloquer et découper, opération désormais évitée grâce à l'affichage en réalité augmentée.

Plus les caissons sont complexes, avec de nombreuses mesures à effectuer, différents types de montants à positionner, et des panneaux à cloquer ou découper, plus l'utilisation du casque peut se justifier. Cette première expérimentation a été menée sur un caisson simple, mais des tests sur un plus grand nombre de caissons plus complexes, intégrant des panneaux intérieurs et extérieurs, pourraient venir renforcer les résultats observés. Cependant, le manque de précision du casque pour les structures de grande taille constitue une limite, contrebalançant ce potentiel avantage et réduisant son efficacité lorsque des tolérances plus strictes sont requises.

Le gain calculé de 23,81% ne concerne que les étapes de fabrication, c'est-à-dire sans prendre en compte le temps nécessaire pour :

- Préparer le fichier et le transférer sur le casque ;
- Calibrer le casque dans l'espace de travail ;
- Charger le casque ;
- Résoudre les éventuels problèmes rencontrés (voir [3.5.2.3](#)).

Il serait possible de calculer le temps nécessaire à ces opérations, mais pour estimer le gain de temps global, il faudrait le comparer à la durée moyenne de fabrication d'un grand nombre de caissons. En effet, si ces opérations prennent, par exemple, 10 minutes, un caisson nécessitant 50 minutes de construction en sera bien plus impacté qu'un caisson demandant 3 heures de travail.

Cela dit, en tenant compte de ces étapes supplémentaires, ainsi que du fait que le casque est principalement utilisé pour des caissons de petite taille (en raison de sa précision), le gain de temps global peut être estimé à environ 17%. Cela correspond à environ 4 minutes 30 secondes par caisson pour les opérations citées précédemment, un temps tout à fait atteignable dans une optique d'utilisation régulière et à long terme.

3.5.2.5 Pistes d'amélioration

La principale amélioration qui est primordiale si le casque veut avoir un réel intérêt, est sa précision, et plus précisément le système de calibrage utilisé par l'application TimberPlan xR.

Bien qu'il soit facile à mettre en place grâce aux marqueurs QR code lus par le casque, le recalibrage manuel à effectuer retire un peu de l'aspect pratique des QR codes, pourtant faciles à positionner.

Plusieurs options sont envisageables pour améliorer la précision du casque. Cependant, ces améliorations dépendent directement de l'application TimberPlan xR et ne peuvent donc pas être testées, car elles relèvent de sa programmation.

1. Augmenter le nombre de marqueurs QR code

En augmentant le nombre de marqueurs placés et en prédéfinissant leur position dans l'espace, cela permettrait au casque de mieux interpréter la zone de projection et de corriger son affichage en fonction de l'emplacement des QR codes.

D'autant plus que, puisque la table de fabrication est graduée, il serait facile de connaître avec précision la position des marqueurs.

Une étude menée dans le cadre de la fabrication de poutres lamellées-collées a exploré l'influence du nombre et de l'emplacement des QR codes sur la précision de la projection en réalité augmentée.

Les auteurs ont montré qu'en disposant 8 marqueurs QR autour et directement sur l'élément construit, le décalage pouvait être réduit à 1,28 mm. En revanche, lorsque les 8 marqueurs étaient uniquement placés autour de l'élément projeté, l'écart atteignait 2,23 mm (Kyaw et al., 2023).

Cette seconde configuration pourrait être particulièrement pertinente dans un contexte de projection sur une table de montage, où il est facile de fixer les marqueurs autour de la zone de travail.

2. Application d'un facteur d'échelle selon X et Y

Une autre option, plus simple à mettre en œuvre, serait que le casque projette des points selon les axes X et Y. L'opérateur indiquerait alors manuellement la position réelle (coordonnée physique) de ces points.

En divisant la position projetée par la position réelle, un facteur d'échelle serait obtenu et pourrait être appliquer à la projection, pour la corriger.

L'essentiel est que cela se fasse sans modifier le fichier DXF de base, car toute modification risquerait d'introduire des cotes erronées susceptibles d'induire l'opérateur en erreur.

Il pourrait être pertinent que le fichier ne soit pas modifié uniquement de manière linéaire. Par exemple, la projection de neuf points de référence, identiques à ceux utilisés dans le test de précision mentionné plus haut, permettrait d'évaluer les éventuelles distorsions de la projection. Ces données pourraient alors être utilisées pour appliquer des corrections plus fines, via des facteurs d'échelle distincts sur les axes X et Y, afin de compenser les écarts mesurés.

Des suggestions ont également été fournies par les opérateurs concernant les étapes liées au placement des clous/agraves :

3. Ajout de croix de positionnement pour les connecteurs

Les emplacements où les opérateurs doivent placer les connecteurs pourraient être signalés par des croix, ce qui permettrait de mieux respecter l'entraxe.

Un opérateur a indiqué que ce point est problématique : il est difficile de garder un bon entraxe, et lorsqu'ils doivent être particulièrement précis, ils utilisent des gabarits, ce qui prend du temps.

Il a aussi mentionné qu'une erreur d'entraxe avait déjà causé une rupture de stock de connecteurs, mettant en pause un projet.

Cette amélioration est simple à appliquer car elle ne concerne que le fichier DXF, qui pourrait intégrer à l'avance ces croix de positionnement.

4. Changement de couleur après clouage

Une autre suggestion serait que, lorsqu'un panneau est cloué ou agrafé, les traits changent de couleur (par exemple du bleu à une autre teinte) pour indiquer que l'emplacement a bien été traité.

Cela permettrait d'éviter les oubliers de connecteurs, qui peuvent entraîner des ruptures dans l'ossature. Pour que cette fonctionnalité soit fiable, il faudrait pouvoir détecter en temps réel la position de l'outil de clouage, ainsi que l'interaction de l'opérateur.

Ce point a été partiellement abordé par Settimi et al. (2024), qui ont développé TTool, un système de détection assistée par intelligence artificielle capable de reconnaître et localiser avec précision les têtes d'outils dans des environnements de travail en réalité augmentée.

Cela signifie que le système pourrait potentiellement savoir où un outil comme une clouseuse a été utilisé, ce qui permettrait ensuite de déclencher un changement de couleur localisé aux endroits où les connecteurs ont été placés.

3.5.3 Expérimentation de la projection laser

3.5.3.1 Présentation du test utilisateur

Le test utilisateur s'est déroulé sur une période de cinq jours, du 19 au 23 mai 2025, dans les ateliers de l'entreprise SABEM. Comme mentionné précédemment, cette phase a été rendue possible grâce à la disponibilité prolongée du projecteur laser et à l'accord des opérateurs, ce qui a permis de l'intégrer dans un cycle de production réel.

Tous les caissons concernés suivaient une méthode de production commune (expliquée précédemment ; voir 3.29), ce qui a permis de comparer de manière fiable les différentes approches. Un opérateur a été sollicité à temps plein pour utiliser le projecteur laser, tandis qu'un second intervenait ponctuellement pour l'assister. Toutefois, l'expérimentation s'est principalement concentrée sur le parcours d'un seul opérateur, afin de suivre précisément sa montée en autonomie.

Jour 1 – Introduction au système

La première journée a été consacrée à la découverte du système. Un caisson a été fabriqué selon la méthode traditionnelle (plans papier, prises de mesures manuelles), mais les faisceaux du projecteur laser ont été affichés tout au long du processus.

L'objectif était de familiariser l'opérateur avec la logique du dispositif : comprendre comment interpréter les projections, comment elles allaient guider les étapes de fabrication, et à quoi s'attendre pour les jours suivants. Durant cette phase, j'assurais entièrement la gestion du projecteur.

Jour 2 – Premier caisson 100% laser (avec accompagnement)

Durant le deuxième jour, un premier caisson a été réalisé sans traçage ni prise de mesure manuelle, uniquement à partir des repères projetés par le laser.

Je suis resté présent durant l'ensemble de la journée pour guider l'opérateur, afficher les éléments nécessaires à chaque étape et répondre aux questions.

En fin de journée, une initiation à l'utilisation autonome du système a été réalisée. L'opérateur, peu familier avec l'outil informatique, a été formé aux différentes étapes nécessaires pour faire fonctionner le dispositif (démarrage de l'ordinateur, ouverture du logiciel, affichage des fichiers). Un fascicule d'utilisation (voir 4.5.0.4) a été conçu spécifiquement pour l'occasion, reprenant pas à pas l'ensemble de la procédure, afin de faciliter l'autonomie dès le lendemain.

Jour 3 – Premiers tests en semi-autonomie

Dès le troisième jour, l'opérateur a pu démarrer l'installation de façon autonome, puis commencer la fabrication avec un accompagnement réduit. Je suis intervenu ponctuellement pour recueillir des retours, clarifier certains points ou vérifier l'utilisation correcte du système. Des premiers ajustements mineurs ont été identifiés, et l'opérateur a progressivement pris ses marques avec l'outil.

Jour 4 – Autonomie partielle confirmée

Le quatrième jour a consolidé cette montée en autonomie. Je suis intervenu à intervalles réguliers (environ toutes les 30 à 45 minutes), principalement à des fins de suivi et d'observation. L'opérateur gérait le système avec plus d'aisance, affichait les éléments nécessaires de façon autonome et progressait dans la construction sans assistance directe.

Jour 5 – Utilisation complète en autonomie

La dernière journée, le vendredi 23 mai, a été consacrée à un test en autonomie totale. L'opérateur a allumé seul le projecteur, lancé le bon fichier, réalisé la construction complète d'un caisson, puis éteint le matériel à la fin de la journée, sans aucune aide.

Parallèlement, le fichier utilisé avait été généré par le logiciel développé durant ce travail, et transmis à l'équipe de dessin, qui l'a préparé en autonomie.

Durant cette journée, je ne suis intervenu qu'à des fins d'observation et de mesure. Les temps ont été relevés avec précision : génération et traitement du fichier, démarrage du système, fabrication du caisson, extinction du matériel.

Relevés et données collectées durant l'expérimentation

Durant toute la semaine d'expérimentation, j'ai procédé à une série de prises de notes systématiques pour chaque caisson construit à l'aide du projecteur laser. Ces relevés incluaient notamment :

- Le ressenti direct de l'opérateur vis-à-vis de l'outil.
- La charge cognitive perçue liée à l'utilisation du système de projection.
- Les temps de réalisation précis pour chaque caisson.
- Les suggestions d'amélioration exprimées pour adapter davantage l'outil aux pratiques réelles de l'atelier.

Ces observations (présentes dans le tableau 3.5) qualitatives et quantitatives ont permis de suivre l'évolution de l'opérateur au fil des jours et d'identifier les avantages comme les contraintes de la projection laser. Elles sont présentées et analysées dans la section suivante.

Afin d'effectuer une comparaison plus rigoureuse, le même caisson a été construit deux fois, selon deux méthodes différentes : une première fois à l'aide du projecteur laser, en autonomie complète, et une seconde fois à partir des méthodes traditionnelles (plans papier, traçage manuel). Cette double réalisation sert de base comparative directe, en complément des données collectées tout au long de la semaine.

Afin de mieux visualiser l'objet de l'étude, le plan du caisson construit selon les deux approches est présenté dans la figure ci-dessous (3.35).

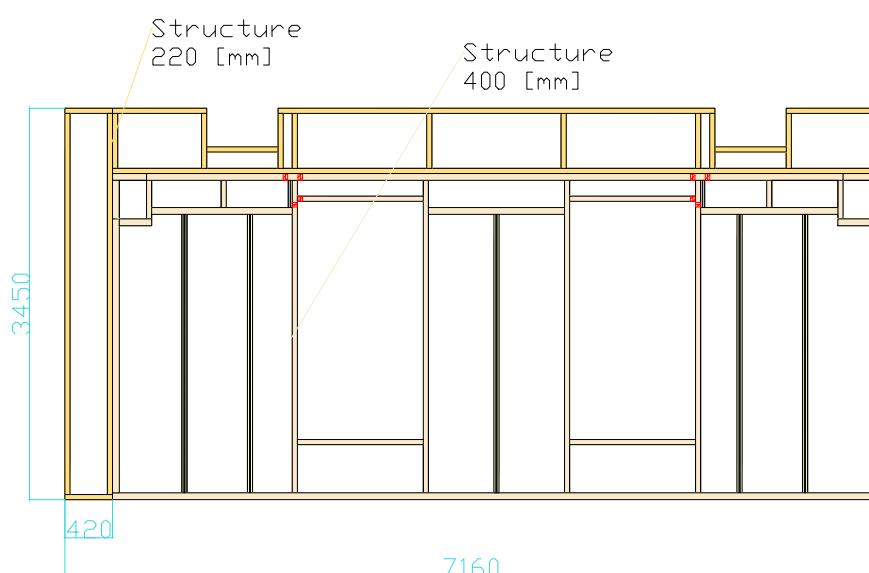


FIGURE 3.35 – Plan du caisson (MOB 58), construit pour le test de la projection laser

Les données collectées au cours de cette semaine de tests sont rassemblées dans le tableau suivant (3.5) :

Nom du caisson	Dates de construction	Temps net	Problèmes rencontrés	Suggestions	Charge cognitive	Ressenti global	Notes
Mob 44	J2 - Début : 20/05 (7h30) - Fin : 20/05(14h00)	6h	Affichage de deux hauteurs différentes sur une même zone impossible	Revoir le fonctionnement des calques (clous non affichés)	Scintillement légèrement dérangeant mais tolérable	Apprécié : aucune mesure à prendre	Un seul opérateur au début, un second a rejoint plus tard
Mob 46	J2–J3 - Début : 20/05 (14h45) - Fin : 21/05 (11h15)	4h45	Décalage de 1 mm corrigé manuellement	Revoir le nommage des fichiers	Aucune gêne visuelle liée au laser	Précision utile pour le positionnement des clous	Ossature réalisée en 1h grâce au laser Autonomie dès le 1er jour pour lancer le système
Mob 62	J3–J4 - Début : 21/05 (13h45) - Fin : 22/05 (9h00)	4h	Fichier ouvert sur mauvaise zone de la table, causant un décalage	/	Pas de gêne visuelle. Habituation au scintillement	Affichage perfectible mais opérationnel	/
Mob 64	J4 - Début : 22/05 (9h30) - Fin : 22/05 (15h15)	4h15	/	/	/	Utilité perçue clairement Opérateur enthousiaste	Trait affiché sans bois placé = montant manquant identifié
Mob 48	J4–J5 - Début : 22/05 (15h30) - Fin : 23/05 (10h30)	4h	Double ouverture du fichier (images 1 et 2)	/	Aucune gêne visuelle Habituation au scintillement	/	/
Mob 58 (test) 3.35	J5 - Début : 23/05 (11h20) - Fin : 23/05 (15h30)	3h10	/	/	/	Satisfaction sur le gain de temps	Utilisé comme test comparatif face aux méthodes traditionnelles

TABLEAU 3.5 – Tableau de suivi des caissons testés avec le système laser

3.5.4 Projection laser : Observations et analyses

3.5.4.1 Questionnaire UX

À l'issue des cinq jours d'expérimentation, un questionnaire d'évaluation de l'expérience utilisateur a été soumis à l'opérateur. Celui-ci portait sur les cinq critères définis précédemment.

Le questionnaire complété est présent en annexe (voir 4.21)

3.5.4.2 Analyse des critères d'évaluation

Dans le graphique suivant (3.36), les résultats sont représentés sur une échelle de 0 à 5. Ils ont été obtenus en calculant la moyenne des scores pour chaque critère.

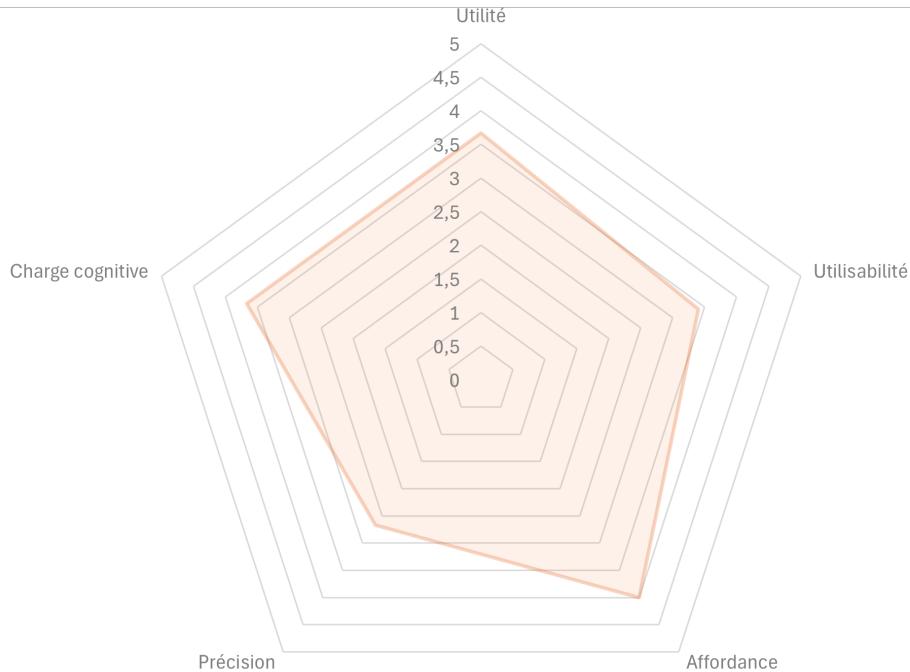


FIGURE 3.36 – Résultats moyens par critère UX pour chaque utilisateur et moyenne globale.

1. Utilité (moyenne = 3,67/5)

Ce score de 3,67/5 indique une utilité perçue réelle et notable du système de projection laser dans le cadre des tâches de fabrication. L'analyse des réponses au questionnaire montre que l'outil permet à l'opérateur d'accomplir certaines étapes avec une plus grande facilité, en particulier celles de tracé et de vérification. Ces étapes, qui auparavant nécessitaient des prises de mesures manuelles, peuvent désormais être réalisées directement grâce à la projection, éliminant ainsi des sources potentielles d'erreur et réduisant le temps d'exécution.

Cependant, l'affichage en 2D à hauteur fixe constitue une limite technique : le laser ne peut pas projeter sur les tranches verticales des montants, là où certains connecteurs doivent être positionnés. Cela peut expliquer pourquoi le score d'utilité, bien qu'élévé, ne dépasse pas un certain seuil. Pour ces zones non couvertes par le laser, l'opérateur doit alors recourir à des méthodes classiques, ce qui crée une rupture dans l'utilisation du laser pour les autres tâches.

Par ailleurs, s'il reconnaît un gain de temps tangible, il se montre mitigé quant à une utilisation quotidienne du dispositif. Il exprime néanmoins une forme de satisfaction personnelle, soulignant le sentiment agréable de travailler plus rapidement et plus efficacement. Il perçoit ce gain de temps comme bénéfique à la fois pour lui-même et pour l'entreprise, ce qui témoigne d'une adhésion prometteuse au système.

2. Utilisabilité (moyenne = 3,4/5)

Le score de 3,4/5 reflète une utilisabilité perçue comme correcte mais perfectible.

L'un des principaux freins identifiés réside dans le temps d'adaptation nécessaire pour maîtriser le dispositif. Contrairement à d'autres systèmes plus explicites, le laser ne projette que des traits, ce qui suppose une part importante d'interprétation de la part de l'opérateur. Ce dernier doit constamment se référer à son plan de montage pour savoir quel élément poser, tandis que le trait projeté n'en indique que la position.

Cette dissociation entre contenu de l'information (dans le plan) et localisation physique (via le laser) exige une certaine charge cognitive et une familiarisation progressive. L'opérateur doit aussi s'adapter à la logique de réglage des hauteurs de projection, ce qui peut complexifier la prise en main, notamment lors des premiers usages.

Ainsi, bien que la solution soit jugée utile, son utilisabilité pourrait être améliorée. Un affichage enrichi, par exemple avec des repères contextuels ou des annotations projetées, ou une interface de contrôle plus intuitive, pourraient réduire le temps d'apprentissage et renforcer la fluidité d'utilisation au quotidien. Cependant, plus il y a d'informations projetées et plus le scintillement serait important, risquant de faire baisser le score des autres critères.

3. Affordance (moyenne = 4/5)

Le score d'affordance de 4/5 traduit une compréhension globalement claire et intuitive du système de calques proposé par le dispositif. L'opérateur a jugé la navigation entre les différents calques comme facile, et a perçu leur organisation comme cohérente et bien pensée. Les informations nécessaires étaient facilement localisables, et l'ordre d'apparition des calques a été considéré comme logique et adapté au déroulement des tâches.

Quelques améliorations lexicales ont toutefois été suggérées pour renforcer la lisibilité du système. Par exemple, les noms de calques tels que « moitié du bois » pourraient être remplacés par des termes plus explicites comme « côté gauche du bois » (en fonction du sens de projection), tandis que « milieu du bois » pourrait être reformulé en « axe du bois ».

Ces modifications rendraient les noms des calques plus facilement compréhensibles par l'ensemble des opérateurs de l'atelier.

En dehors de ces remarques, l'opérateur a su s'approprier rapidement la structure du système, ce qui confirme la bonne affordance globale de l'interface projetée.

4. Précision (moyenne = 2,67/5)

Le score lié à la précision perçue de la projection laser n'est que de 2,67/5, un résultat relativement bas. Ce score s'explique en partie par la nature même des questions posées. Elles ne portaient pas sur la précision technique réelle du système, mais sur la lisibilité des faisceaux laser et la perception subjective de la précision qui en découle.

En effet, bien que le laser offre une précision effective de l'ordre du millimètre, deux éléments viennent nuancer cette impression : d'une part, le scintillement du faisceau, et d'autre part, l'épaisseur du trait projeté, qui peut rendre plus difficile l'identification exacte de la position à suivre. Ces facteurs visuels peuvent donner une impression de flou ou d'imprécision, indépendamment de la performance réelle de l'outil.

Avec l'usage, l'opérateur a toutefois su s'adapter et comprendre la logique de projection. Il a ainsi pris l'habitude de positionner les éléments au centre de l'épaisseur du trait, ce qui lui a permis de maximiser la précision lors de la fabrication.

Une projection plus stable (avec un scintillement réduit) et un trait laser plus fin constituerait des améliorations significatives, susceptibles d'améliorer sensiblement la perception de précision et donc d'augmenter ce score.

5. Charge cognitive (moyenne = 3,67/5)

Le score de 3,67/5 concernant la charge cognitive est notable, d'autant plus qu'il s'agissait initialement du point de vigilance principal. En effet, lors des premiers tests, l'opérateur exprimait une réticence

marquée liée au scintillement du faisceau laser, craignant que fixer un trait clignotant en continu pendant plusieurs heures puisse provoquer une gêne visuelle, voire des phénomènes persistants de rémanence (impression de voir encore les flashes après avoir détourné le regard).

Les questions portaient spécifiquement sur ces aspects : la gêne visuelle perçue, la fatigue oculaire potentielle, ou l'apparition de troubles visuels anormaux.

En complément, un suivi quotidien a été mis en place : l'opérateur était interrogé chaque jour sur d'éventuels symptômes visuels inhabituels, afin de prévenir tout risque potentiel pour sa santé visuelle. Il est important de rappeler que les lasers utilisés dans ce contexte sont conçus pour ne pas présenter de danger oculaire, mais l'évaluation de ce critère restait essentielle dans une démarche de précaution.

Au fil des jours, bien que le scintillement ait été perçu comme gênant au début, l'opérateur a progressivement développé une tolérance, ne rapportant aucune fatigue visuelle ni trouble particulier. Ce retour d'expérience valide donc positivement le critère de charge cognitive, même si une projection plus stable pourrait encore renforcer le confort à long terme.

3.5.4.3 Analyse des performances

Le même caisson (voir 3.35) a été réalisé au laser par deux opérateurs, tandis que, parallèlement, deux autres opérateurs ont fabriqué le même caisson selon les méthodes traditionnelles.

Ce ne sont pas les mêmes personnes qui ont réalisé les caissons afin d'éviter que le placement soit facilité lors de la seconde construction, mais les opérateurs travaillent de manière assez similaire, ce qui rend la comparaison pertinente.

Durant cette construction, des bois étaient manquants et ont dû être recoupés. Cette étape se passe indépendamment de l'utilisation et doit donc être décomptée du temps net calculé.

- **Temps de construction avec la projection laser**
 - Durée totale de fabrication : De 11h20 à 15h30 = 4h10
 - Pause de midi : 30 minutes
 - Recoupe des bois manquants : 30 minutes
 - → Temps net de fabrication = 3h10
- **Temps de construction avec les méthodes traditionnelles**
 - Durée totale de fabrication : De 07h30 à 12h05 = 4h35
 - Recoupe des bois manquants : 10 minutes
 - → Temps net de fabrication = 4h25

Ainsi, si l'on compare les temps nets de fabrication, le temps est réduit de 1h15 (ou 75 minutes) lors de l'utilisation de la projection laser pour la construction du caisson. Cependant, l'utilisation d'un projecteur nécessite certaines préparations, rajoutant du temps supplémentaire en comparaison aux méthodes habituelles : chaque jour, l'installation doit être allumée et éteinte.

- Mise en marche de l'installation (mise sous tension des lasers, allumage de l'ordinateur, calibrage du laser et ouverture du fichier) = 5'15"
- Mise hors tension des lasers et extinction de l'ordinateur = 1'15"
- Temps total journalier = 6'30"

Chaque jour, la production est d'environ 2 caissons par jour. On peut donc estimer que ces étapes rajoutent 6'30" / 2 par caisson, soit 3'15" par caisson.

Il faut finalement ajouter à cela le temps nécessaire pour fournir un fichier traité, prêt à être utilisé pour le laser. Actuellement, cela prend approximativement 3' par caisson, mais à terme cette étape ne devrait pas prendre plus de 15" par caisson lorsqu'une méthode optimisée sera utilisée lors de l'exportation en fichier DXF depuis CadWork. Cependant, en prenant le temps actuel et en le décomptant du temps gagné grâce à l'utilisation du laser :

$$\text{Temps net gagné par caisson} = 75'00" - 03'15" - 03'00" = 69'45"$$

Ce temps gagné par caisson correspond à **un gain de 26,32 %**.

Plusieurs constatations peuvent être faites à partir de ces résultats.

Puisque ce ne sont pas les mêmes opérateurs qui ont réalisé les caissons et qu'un seul caisson a été utilisé pour établir ces valeurs, il est difficile de s'assurer que ce gain de temps peut se répéter de façon identique pour chaque caisson.

Cependant, lors des visites d'autres entreprises utilisant des systèmes identiques, celles-ci ont affirmé gagner entre 20 et 30 minutes par étape de production grâce à la projection laser. Sur base de ces données, le temps gagné pour un caisson similaire serait d'environ 50 minutes, en partant du postulat que 25 minutes sont économisées par étape de production, et que ce caisson en comporte deux. Ce temps gagné correspond à **un gain de 18,86 %**.

3.5.4.4 Pistes d'amélioration

Concernant les pistes d'amélioration du système de projection laser, elles portent principalement sur des aspects techniques du système lui-même. En effet, le choix du système de calques a été fait sur les conseils de l'opérateur. Mis à part le nom des calques, qui a été modifié, les informations affichées lui conviennent et lui permettent de travailler de manière autonome avec le laser, ce qui était l'objectif initial.

La principale piste d'amélioration reste aujourd'hui la réduction du scintillement. Pour y parvenir, plusieurs solutions peuvent être envisagées :

1. Réduire au maximum les traits affichés

Cette solution consisterait à alléger l'affichage sans changer le fonctionnement global du système. L'idée est simple : moins de traits = moins de scintillement. Toutefois, même si cette option reste techniquement faisable, la réduction du scintillement serait assez limitée. De plus, elle pourrait fortement impacter la lisibilité des traits laser, ce qui risquerait de rendre l'outil plus difficile à utiliser, surtout au début, et rallongerait la phase de prise en main.

2. Augmenter le nombre de projecteurs laser

Cette option est sans doute la plus simple à mettre en œuvre : en ajoutant d'autres lasers pour couvrir une même zone, chacun d'eux aurait moins d'informations à projeter, ce qui réduirait mécaniquement le scintillement. L'inconvénient, est que cela augmente les coûts d'installation. Le système deviendrait donc plus cher et mettrait davantage de temps à être rentabilisé.

3. Utiliser un système plus performant

Le scintillement provient du fait que le miroir galvanométrique vibre à une certaine fréquence pour afficher les traits aux bons emplacements. Une solution possible serait donc d'opter pour un modèle avec une fréquence de vibration plus élevée, ce qui permettrait de réduire le scintillement perçu. Une autre piste serait de concevoir un système basé sur plusieurs sources lumineuses (plusieurs lasers), chacun projetant une ligne fixe. Ce principe permettrait d'éliminer le scintillement sur ces traits fixes, mais demanderait un développement spécifique.

3.5.5 Évaluation comparative des systèmes de RA

Afin de comparer objectivement les technologies de réalité augmentée, l'analyse est structurée en deux parties distinctes.

La première partie est consacrée à l'étude des conditions d'utilisation et des contraintes techniques propres à chaque système. Cette section examine les prérequis matériels et logiciels, les configurations nécessaires à leur mise en œuvre, ainsi que les situations dans lesquelles l'un ou l'autre système est le plus approprié.

La seconde partie traite des aspects économiques liés à l'investissement dans ces technologies. Elle présente une comparaison des coûts initiaux, des exigences en matière de maintenance, de la durée de vie estimée des équipements, ainsi que des éléments permettant d'évaluer leur rentabilité sur le long terme.

3.5.5.1 Comparaison des contraintes d'usage : Casque de réalité augmentée vs. Projecteur laser

1. Pré-requis logiciels et formats de fichiers

Pour l'utilisation des systèmes de RA, qu'il s'agisse d'un casque de réalité augmentée ou d'un projecteur laser, il est indispensable que le logiciel de conception utilisé permette l'exportation des plans de montage au format DXF. Ce format est aujourd'hui couramment utilisé pour le dessin technique et reste compatible avec les deux technologies.

La principale différence réside dans le traitement des fichiers nécessaire avant projection. Dans le cas du système laser, des opérations de simplification importantes sont généralement requises. Cela inclut notamment la suppression des éléments non essentiels à la projection, l'optimisation de la lisibilité, ainsi que le réagencement des calques pour correspondre aux étapes de montage. Ce traitement peut s'avérer long si il doit être fait manuellement.

À l'inverse, le casque de réalité augmentée est capable d'exploiter directement un fichier DXF, presque sans traitement préalable. Les seules conditions requises concernent l'organisation des différentes phases de construction sur des calques séparés, ainsi que la spécification des hauteurs d'affichage dans le modèle. Cette simplicité rend l'usage du casque plus flexible, notamment lors de modifications de dernière minute ou de projets à forte variabilité.

2. Installation et configuration en atelier

Le casque de réalité augmentée présente une grande flexibilité en termes d'installation et d'utilisation dans l'atelier. En effet, il peut être utilisé sur différents postes de travail non fixes, à condition de réaliser un calibrage adapté à chaque nouvel emplacement. Cette capacité d'adaptation permet une mobilité élevée, sans contrainte liée à un emplacement fixe.

À l'inverse, le système de projection laser nécessite une installation complexe et fixe. Le calibrage doit être effectué sur une table de production immobile, car bien que le modèle puisse être projeté à différents endroits sur la surface de la table, la table elle-même ne doit pas bouger. Cette contrainte limite la mobilité et la flexibilité du système.

Concernant les besoins matériels, le casque de réalité augmentée ne requiert pas de conditions spécifiques et peut s'adapter à différents espaces de travail sans installation complexe. En revanche, le système laser impose plusieurs exigences :

- Un ordinateur dédié doit être installé dans l'atelier, connecté au réseau afin de faciliter le transfert des fichiers de conception.
- L'installation physique du système laser est plus conséquente : elle s'étale généralement sur plusieurs jours et nécessite la mise en place de supports fixés à la toiture de l'atelier, au-dessus de la table de production.
- L'espace compris entre le laser et la surface de projection doit rester dégagé, sans obstacle pouvant perturber l'affichage des traits laser.
- La hauteur d'installation du laser est un paramètre crucial : une hauteur d'environ 5 mètres au-dessus de la table de production permet de projeter une surface d'environ 5,77 mètres de diamètre, en raison de l'angle de projection d'environ 60 degrés.

Il est cependant important de noter que, même si l'installation initiale du laser est plus lourde, elle présente un avantage notable : une fois le système en place et toutes les conditions de mise en œuvre sont respectées, une simple action permet de relancer la calibration, et l'ouverture des fichiers se fait de manière rapide et intuitive.

À l'inverse, le casque de réalité augmentée nécessite généralement un recalibrage plus fréquent, et la gestion des fichiers y est souvent moins fluide que dans le cas du système laser.

3. Contraintes liées à l'environnement

La sensibilité à la lumière ambiante constitue une contrainte importante pour les deux technologies, mais elle se manifeste différemment selon le système.

Le système de projection laser est sensible à une forte luminosité ambiante. En effet, lorsque l'environnement est très éclairé, la visibilité des traits projetés diminue significativement, ce qui peut nuire à la précision et au confort d'utilisation.

En revanche, le casque de réalité augmentée, grâce à son affichage intégré directement dans le champ de vision de l'opérateur, offre une meilleure visibilité dans des conditions lumineuses classiques. Sauf en cas d'exposition directe à une source lumineuse intense fixée sur le casque (utilisation en extérieur), l'affichage reste lisible.

De plus, la luminosité du casque peut être ajustée en fonction des préférences des utilisateurs et des conditions ambiantes, ce qui augmente la flexibilité d'utilisation dans différents environnements.

4. Cas d'usage privilégiés

L'avantage principal du système de projection laser réside dans la précision qu'il offre. Cette précision, combinée à une installation fixe, permet d'exploiter la projection laser sur une large gamme de projets, sans limitation notable de taille ou de complexité.

En revanche, la précision moindre du casque de réalité augmentée limite son utilisation à des caissons d'environ 4 mètres ou à des tâches ne nécessitant pas une très grande précision. Cette contrainte restreint le champ d'application du casque, qui reste néanmoins adapté pour des opérations de précision modérée ou des environnements de travail plus flexibles.

Par ailleurs, le système laser étant alimenté en permanence par câble électrique, il ne présente pas de risque d'interruption dû à une batterie déchargée, contrairement au casque qui a une autonomie de seulement 2h. Cette caractéristique renforce la pertinence du projecteur laser pour des usages prolongés ou intensifs.

Critère	Casque de réalité augmentée	Système de projection laser
Traitement du fichier DXF	Simple : Juxtaposition des calques	Long : Demande de simplifier au maximum les traits
Mobilité	Élevée : peut être utilisé à différents postes	Faible : nécessite un poste de travail fixe
Installation nécessaire	Faible : demande simplement un endroit pour charger et un ordinateur pour gérer les fichiers (peut être dans un bureau)	Importante : Nécessite un poste de travail fixe
Connexion réseau	Non obligatoire (fichiers transférables directement)	Recommandée pour le transfert rapide des fichiers
Zone d'utilisation	Flexible : Peut être utilisé sur pratiquement tout type de surface	Nécessite un espace libre de tout objet entre la table de fabrication et la source laser, laquelle doit être positionnée à une hauteur adaptée à la surface de projection nécessaire.
Temps de mise en route	Moyen (chargement + calibration)	Court (démarrage de l'ordinateur, recalibrage automatique)

Sensibilité à la lumière ambiante	Faible	Élevée : luminosité réduite nécessaire
Préparation du poste	Calibration du casque nécessaire	Installation fixe plus complexe
Taille des caissons adaptée	Petits caissons, précision suffisante pour de petites pièces	Convient à tous types de caissons
Nombre d'opérateurs simultanés	Utilisation individuelle	Peut être utilisé par plusieurs opérateurs

TABLEAU 3.6 – Comparaison des contraintes d'usage

3.5.5.2 Analyse économique : coûts d'investissement et rentabilité

1. Coût d'acquisition

Le coût d'installation d'un système de projection laser peut être conséquent. Pour un système composé de deux projecteurs laser couvrant une table de 12 mètres et conçu pour être utilisé par au moins deux opérateurs, le montant s'élève à environ 35 000€, installation par les techniciens comprise. À cela s'ajoutent les coûts annexes, notamment :

- Environ 300 € pour la fabrication de supports métalliques permettant de fixer les projecteurs à la structure du bâtiment,
- Le coût d'un ordinateur dédié installé dans l'atelier.

Ainsi, le coût total du système laser est estimé à environ 35 800€ pour une installation complète et opérationnelle.

En ce qui concerne le casque de réalité augmentée, le prix du casque seul est de 5000€. Lorsqu'il est acquis via l'entreprise qui développe le logiciel TimberPlanXR, le prix total du système (casque + licence logiciel) s'élève à 10000€ par casque. Pour une utilisation équivalente à celle du système laser, c'est-à-dire par deux opérateurs, le coût global est donc de 20 000€.

2. Maintenance et durée de vie

Concernant le casque de réalité augmentée, la marque développant le logiciel TimberPlanXR indique une durée de vie estimée à environ 5 ans. Cette durée est bien entendu variable et dépend directement de l'attention portée à l'équipement, qui reste un dispositif fragile nécessitant une manipulation soigneuse.

Il n'y a pas de maintenance physique spécifique à prévoir, hormis la réalisation régulière des mises à jour logicielles. Il est toutefois important de noter que Microsoft a annoncé l'arrêt de la production des casques HoloLens 2 en octobre 2024.

Néanmoins, des mises à jour de sécurité et des correctifs critiques continueront d'être fournis jusqu'au 31 décembre 2027. Au-delà de cette date, le maintien de la compatibilité avec l'application TimberPlanXR nécessitera probablement des adaptations logicielles spécifiques.

En ce qui concerne les projecteurs laser, bien qu'aucune donnée précise n'ait été communiquée par le fabricant sur leur durée de vie, ces systèmes sont généralement conçus pour un usage industriel intensif et peuvent fonctionner pendant au moins 10 ans, à condition de respecter les maintenances préconisées.

Celles-ci incluent notamment le remplacement périodique des sources lumineuses laser (en fonction de leur durée de vie nominale), ainsi que le nettoyage ou le remplacement des filtres et lentilles si nécessaire. Un suivi régulier de l'état du système par un technicien est également recommandé pour garantir la précision et la fiabilité du dispositif dans le temps.

3. Rentabilité et amortissement

L'analyse de rentabilité repose ici sur les données fournies par l'entreprise Sabem concernant les temps de travail et les coûts horaires des opérateurs.

Un opérateur travaille en moyenne 40 heures par semaine sur 225 jours ouvrés par an, soit environ 1800 heures par an. Pour une installation utilisée par deux opérateurs, cela représente un total annuel de **3 600 heures**.

Casque de réalité augmentée :

En se basant sur l'estimation de **17 % de gain de temps** obtenue précédemment pour l'utilisation du casque de réalité augmentée, le gain de temps annuel est de :

$$0,17 \times 3\,600 = 612 \text{ heures/an}$$

Le coût horaire moyen d'un opérateur étant de 43,72€, cela représente une **économie annuelle potentielle** de :

$$612 \times 43,72 = 26\,756,64 \text{ €/an}$$

Dans ces conditions, pour un investissement initial de 20 000€ (deux casques et licences logicielles inclus), le système serait rentabilisé en :

$$\frac{20\,000}{26\,756,64} \approx 0,75 \text{ an}$$

Ce qui correspond à environ :

$$0,75 \times 225 \approx 169 \text{ jours ouvrés}$$

Ainsi, le retour sur investissement pour le système de réalité augmentée est atteint en moins d'un an d'utilisation à temps plein par deux opérateurs.

Projecteur laser :

En se basant sur le gain de temps calculé de **26,32 %**, le gain de temps annuel est de :

$$0,2632 \times 3\,600 = 947,52 \text{ heures/an}$$

Le coût horaire moyen d'un opérateur étant de 43,72€, cela représente une **économie annuelle potentielle** de :

$$947,52 \times 43,72 = 41\,425,57 \text{ €/an}$$

Dans ces conditions, pour un investissement initial de 35 800€ (installation de deux projecteurs laser et de l'ordinateur d'atelier), le système serait rentabilisé en :

$$\frac{35\,800}{41\,425,57} \approx 0,86 \text{ an}$$

Ce qui correspond à environ :

$$0,86 \times 225 \approx 195 \text{ jours ouvrés}$$

Ainsi, le retour sur investissement pour le système de projection laser est atteint en moins d'un an d'utilisation à temps plein par deux opérateurs, en se basant sur les données relevées lors de la construction du caisson.

Cependant, en se basant sur les données fournies par les autres entreprises utilisant des systèmes similaires et sur l'estimation du gain de temps de **18,86%**, le retour sur investissement est plus long : Le gain annuel est de :

$$0,1886 \times 3\,600 = 679,24 \text{ heures/an}$$

Ce qui représente une économie annuelle potentielle de :

$$679,24 \times 43,72 = 29\,696,60 \text{ €/an}$$

Ainsi, le système sera rentabilisé en :

$$\frac{35\,800}{29\,696,60} \approx 1,20 \text{ an}$$

Ce qui correspond à environ :

$$1,20 \times 225 \approx 271 \text{ jours ouvrés}$$

Ainsi, le retour sur investissement pour le système de projection laser est atteint en un peu plus d'un an d'utilisation à temps plein par deux opérateurs, en se basant sur les données fournies par les entreprises utilisant des systèmes similaires.

Critère	Casque de réalité augmentée	Système de projection laser
Coût d'achat (pour 2 opérateurs)	20 000€	35 800€
Maintenance	Faible, peu de composants à entretenir	Moyenne (laser, lentilles, nettoyage)
Durée de vie	Moyenne (≈ 5 ans, dépend de l'attention apportée au matériel)	Longue (≈ 10 ans)
Temps moyen gagné par caisson	17% (Estimé)	26,32% (Calculé) 18,86% (Estimé)
Retour sur investissement (ROI)	Court (si usage fréquent et adapté)	Moyen terme (nécessite un volume de production important)

TABLEAU 3.7 – Comparaison économique des systèmes

Chapitre 4

Conclusions et perspectives

4.1 Conclusions

Ce travail avait pour objectif de répondre aux deux questions suivantes :

- *La réalité augmentée peut-elle améliorer les processus du secteur ou, au contraire, ne pas apporter de bénéfices concrets ?*
- *Les professionnels de la construction percevront-ils un réel intérêt à son utilisation et seront-ils prêts à l'adopter au quotidien ?*

Pour y répondre, une démarche en plusieurs étapes a été suivie. Le travail a débuté par une revue de littérature approfondie visant à définir les bases théoriques : la construction à ossature bois, les principes et dispositifs de réalité augmentée et leurs liens avec la construction en bois, ainsi que les enjeux liés à l'expérience utilisateur. Cette étape a permis de situer la problématique dans un contexte à la fois technique et humain.

Ensuite, un cadre pratique a été mis en place à travers une série d'entretiens, d'observations et d'expérimentations menées dans l'entreprise Sabem, spécialisée dans la préfabrication d'ossatures en bois. Trois dispositifs de réalité augmentée ont été testés : un casque HoloLens 2, un système de projection laser, et une application mobile, avec des protocoles distincts pour chacun d'eux.

Les résultats issus de l'expérimentation montrent que la réalité augmentée peut effectivement contribuer à l'optimisation des processus dans le secteur de la construction en bois, en particulier dans le cadre d'une préfabrication en atelier. Des gains de temps et une facilité dans l'exécution des tâches ont été observés, tant pour le système de projection laser que pour le casque de réalité augmentée. En ce qui concerne l'utilisation de la RA sur appareil mobile, celle-ci s'est vite retrouvée inadaptée à une utilisation en atelier, même si son utilisation sur chantier pourrait être bénéfique.

Cependant, l'existence de ces technologies ne garantit pas leur adoption effective. Le travail a révélé que les utilisateurs ne formulent pas toujours clairement leurs besoins, ce qui peut entraîner un décalage entre la solution proposée et les attentes réelles. De plus, certaines technologies testées ont tendance à imposer un mode de fonctionnement strict, peu compatible avec les méthodes de travail existantes.

Ces éléments soulignent que pour qu'une technologie comme la réalité augmentée puisse être durablement intégrée dans un atelier de construction bois, elle doit être pensée avec les utilisateurs, et non pour eux. L'adaptation aux usages concrets, la simplicité d'utilisation, ainsi que l'implication active des opérateurs dès les premières phases de développement apparaissent comme des facteurs décisifs.

Enfin, ce travail montre que l'acceptation d'une nouvelle technologie par les professionnels dépend autant de l'utilité qu'ils y voient que de la facilité avec laquelle elle peut s'intégrer dans leur quotidien. Même si une solution est efficace, elle a peu de chances d'être adoptée si elle est trop compliquée ou trop contraignante. C'est pourquoi il ne suffit pas qu'une technologie soit performante : il faut aussi qu'elle soit adaptée aux habitudes des utilisateurs, à leurs besoins réels, et qu'ils puissent se l'approprier facilement.

4.2 Limites

Cette section a pour but de présenter les limites rencontrées au cours de ce travail, tant en lien avec la méthodologie suivie qu'avec le contexte dans lequel il a été mené.

Dans un premier temps, la durée limitée de la phase expérimentale, contrainte d'une part par la période de prêt du casque de réalité augmentée, et d'autre part par la date relativement proche de la remise de ce travail en ce qui concerne la projection laser, n'a pas permis d'obtenir des données sur le long terme. Idéalement, une phase de test prolongée sur plusieurs mois aurait permis de mieux évaluer l'intégration des systèmes dans le quotidien des opérateurs.

Ensuite, le contexte de test en entreprise a fait que le nombre d'utilisateurs impliqués dans les essais est resté faible, se limitant aux opérateurs volontaires. Cette faible diversité limite la portée des résultats, notamment en ce qui concerne l'expérience utilisateur (UX), qui reste subjective et fortement dépendante du profil de l'opérateur. Une participation plus large, incluant des profils variés (opérateurs novices, opérateurs d'autres ateliers), aurait permis d'obtenir une vision plus représentative.

Par ailleurs, les observations et expérimentations ont été réalisées exclusivement dans les ateliers de l'entreprise Sabem. Les conclusions qui en découlent sont donc étroitement liées aux méthodes de travail, aux équipements et aux habitudes propres à cette entreprise. Cela limite la possibilité de transposer les résultats à d'autres entreprises, notamment celles ayant un niveau d'automatisation différent. Il aurait été intéressant de compléter l'étude par un second terrain d'expérimentation, au sein d'une entreprise fonctionnant avec un autre degré d'automatisation.

Enfin, l'introduction d'une technologie innovante dans un environnement de travail peut générer un "effet de nouveauté" susceptible d'influencer les retours des utilisateurs, positivement ou négativement, sans nécessairement refléter leur perception après plusieurs mois d'usage.

Ainsi, si la phase expérimentale avait pu s'étendre davantage dans le temps, les résultats issus des questionnaires UX auraient probablement été différents.

Cela s'applique en particulier au casque de réalité augmentée, car les opérations de réglage et de calibration avaient été préconfigurées avant les tests. Or, ce sont précisément ces manipulations, lorsqu'elles doivent être réalisées régulièrement par l'utilisateur, qui peuvent à la longue altérer significativement la perception d'un produit.

De plus, les opérateurs se sont montrés assez réticents à l'utilisation du casque, ce qui a conduit à planifier un test court et encadré. Pourtant, pour évaluer réellement la pertinence de ce dispositif en situation réelle, il aurait été nécessaire de dépasser cette réticence initiale et d'accompagner les utilisateurs vers une utilisation autonome, comme cela a pu être fait pour le système de projection laser.

4.3 Perspectives

Au cours de la réalisation de ce travail, plusieurs entreprises actives dans la construction bois ont été contactées. Beaucoup d'entre elles ne connaissaient pas ou peu les technologies de réalité augmentée testées dans ce TFE. Néanmoins, elles ont montré un réel intérêt pour les résultats obtenus, exprimant parfois le souhait d'en savoir davantage ou de pouvoir, à terme, expérimenter elles-mêmes ces outils.

En parallèle, j'ai partagé de manière personnelle les tests réalisés via un post LinkedIn, accompagné d'une vidéo filmée par mes soins pendant les essais en atelier. Ce contenu a suscité un intérêt inattendu, avec près de 35 000 vues et plus de 300 réactions. Ce succès montre que la curiosité autour de la réalité augmentée dans la construction ne se limite pas à l'entreprise Sabem, mais touche un public beaucoup plus large, tant au niveau national qu'international.

Au-delà des réactions directes, certains retours informels ont souligné un point intéressant : la réalité augmentée ne devrait pas être perçue comme un outil permettant de remplacer les compétences des opérateurs, mais plutôt comme un support visant à les renforcer et à faciliter leur travail. Cet aspect soulève une question importante : dans quelle mesure ces outils peuvent-ils accompagner les opérateurs qualifiés, sans pour autant encourager une déqualification du métier ? Ce point mériterait une étude approfondie dans la suite de ce travail.

Ces éléments ouvrent donc des perspectives prometteuses pour élargir le champ d'expérimentation. Impliquer d'autres entreprises, avec leurs propres méthodes, contraintes et profils d'opérateurs, permettrait non seulement de tester la robustesse et la flexibilité des outils développés, mais aussi de mieux comprendre les conditions nécessaires à leur adoption à plus grande échelle. De plus, cela offrirait l'opportunité de mener des tests sur des périodes plus longues, avec un panel d'utilisateurs plus diversifié.

Enfin, une autre piste d'évolution naturelle serait de s'intéresser à l'usage de la réalité augmentée sur chantier. Ce travail s'est volontairement concentré sur l'environnement de l'atelier : un cadre plus stable, maîtrisé et adapté à l'expérimentation. Or, les conditions de travail sur chantier sont bien plus variables : météo, luminosité, encombrement, sécurité, etc. Tester la réalité augmentée dans ce contexte permettrait de pousser ses limites techniques et ergonomiques, mais aussi d'en évaluer concrètement l'apport dans des situations réelles de construction.

Annexes

4.4 Annexe chapitre 2

4.4.0.1 Les essences de bois et leur classification

Il existe sur Terre près de 30 000 espèces de végétaux ligneux produisant du bois. Ces essences se répartissent en deux grandes catégories : les feuillus et les résineux. Chaque essence d'arbre confère au bois des propriétés différentes tant du côté de la résistance que de l'élasticité. Cependant, pour que le bois soit utilisé comme matériau de construction, il est essentiel de bien connaître ses caractéristiques mécaniques. Ainsi, afin de limiter les écarts de performance, le bois est soumis à un classement qui permet de garantir des propriétés mécaniques minimales.

Ce classement repose sur une approche statistique : les bois sont classés par catégories de résistance, de manière à garantir que 95% des échantillons ont une résistance supérieure à une valeur de référence, tandis que 5% présentent une résistance inférieure. Cette valeur seuil est appelée valeur caractéristique.

Dans la catégorie des résineux, la classification utilise la lettre C, suivie d'un chiffre correspondant à la résistance à la rupture en flexion (exprimée en mégapascals – MPa ou N/mm^2). Par exemple, un bois de classe C24 indique qu'il s'agit d'un résineux dont 95% des échantillons ont une résistance en flexion supérieure à 24 MPa.

Pour les feuillus, c'est la lettre D qui est employée. Ainsi, un bois classé D24 suivra le même principe qu'un résineux classé C24, mais appartiendra à la famille des feuillus.

4.4.0.2 Les types de bois utilisés en construction

Le bois brut est un matériau directement issu de l'abattage des arbres. Il se présente généralement sous forme de sections rectangulaires bien définies, pouvant atteindre des dimensions de 100 × 300 [mm] et des longueurs allant jusqu'à 8 mètres, voire davantage (Hout Info Bois, s.d.). Les scieries spécialisées dans les résineux en Belgique produisent des sections standardisées, généralement répertoriées dans des tableaux (comme ceux en annexe, source : Houtinfobois). Toutefois, les dimensions des bois peuvent varier selon les pays et les pratiques commerciales locales.

Si l'on devait se limiter à l'usage du bois brut, de nombreuses constructions seraient impossibles. C'est pourquoi l'industrie du bois a développé des produits dérivés, tels que les bois agglomérés, reconstitués, contrecollés ou laminés.

Ces produits présentent l'avantage d'être disponibles en grande dimension et ainsi de ne pas être limités par la longueur et la section de l'arbre, mais également d'être plus stables face aux variations d'humidité.

4.5 Annexe chapitre 3

4.5.0.1 Programme de traitement de fichier DXF

Le code python développé à cet effet permet :

- Le chargement d'une interface graphique intégrant des boutons et des zones de texte.
- La sélection d'un fichier DXF.
- L'analyse du contenu du fichier et l'affichage des types d'entités détectées.
- La modification du fichier DXF en ajoutant des calques et en triant les types de traits selon ces calques.
- Le recensement des types et du nombre d'entités présentes.

- La détection automatique des montants, y compris ceux comportant des encoches ou inclinés, ainsi que le traçage de leurs médianes (axe du milieu des montants) et le comptage des montants générés.
- L'indication des emplacements des connecteurs.
- La simplification des contours des bois par une seule ligne.
- La visualisation du fichier final via une interface graphique.
- La sauvegarde d'un fichier DXF modifié.

Il fonctionne sans nécessiter d'applications payantes grâce à son exécution sous forme de fichier ".exe".

Calques générés

Les différents types d'entités présents dans le fichier vont être détectés pour n'appliquer des modifications que sur les polylinéaires qui sont en réalité les montants de bois de la structure. Les calques sont organisés de manière logique pour suivre les étapes de production. Cette hiérarchisation permet à l'opérateur de ne pas avoir à parcourir l'intégralité de la liste pour trouver l'information recherchée.

Exemple de nommage :

```
01_01
01_02_MoitiStructure
01_03_CentreBois
01_04_Clous
```

- **01** : indique la première étape de fabrication, utile pour les caissons complexes fabriqués en plusieurs segments (par exemple : **02_01**, **03_01**, etc.).
- **01_01** affiche la totalité de la structure (du calque)
- **01_02_MoitiStructure** : montre uniquement la moitié des montants bois
- **01_03_CentreBois** : indique la ligne médiane des montants
- **01_04_Clous** : repère les emplacements des clous

Enfin, un calque vide a également été prévu afin de permettre à l'opérateur de travailler sans affichage laser lorsqu'une tâche de concentration particulière est requise.

Translation

Une fois que toutes les entités ont été classées dans les calques correspondants, le point le plus bas à gauche est détecté et translaté vers l'origine du repère (0;0). L'ensemble des autres entités présentes dans le fichier subit la même translation. Ce point correspond au coin du caisson et doit être correctement positionné afin d'assurer l'alignement entre l'axe d'origine du laser et celui défini dans le fichier DXF. Cette translation effectuée est illustrée dans la figure suivante (4.1).

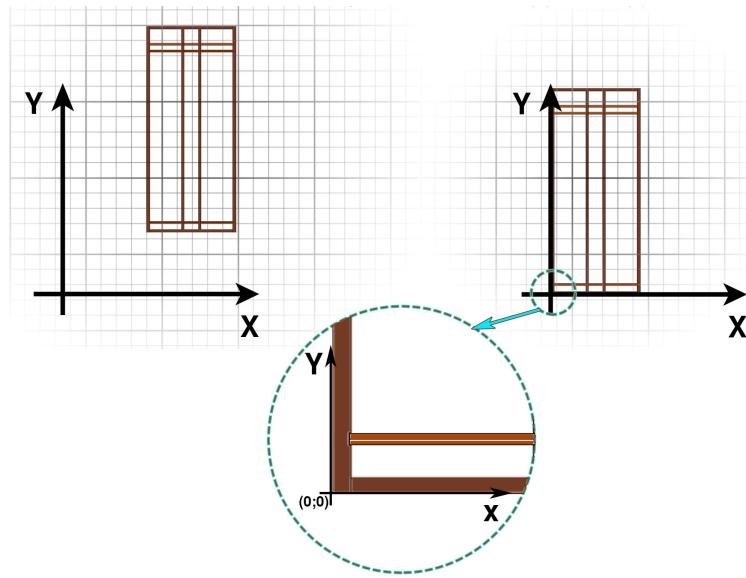


FIGURE 4.1 – Translation des entités du fichier

Milieu des montants

Le trait doit être strictement positionné au centre des montants pour assurer le bon emplacement des connecteurs (clous, vis, etc.).

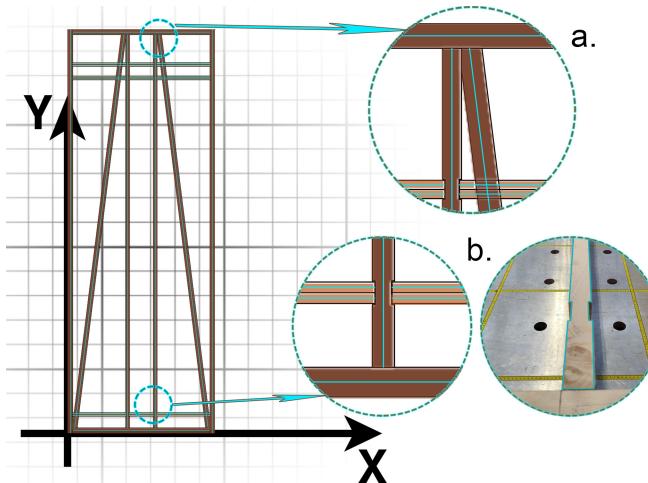


FIGURE 4.2 – Traçage du trait du milieu des montants

Cependant, les montants ne sont pas toujours parfaitement alignés selon les axes X ou Y, ceux-ci peuvent être inclinés, comme illustré dans la partie (a.) de la figure 4.2.

De plus, ils ne sont pas strictement rectangulaires et peuvent présenter des formes complexes ou comporter des découpes particulières aux extrémités, comme illustré dans la partie (b.) de la figure 4.2, où des entailles sont présentes.

Afin de s'adapter à chaque géométrie de montant, le processus suivant est adopté pour toute polygone fermée :

- Détection des points extrêmes
→ Extraction de ‘Xmin’, ‘Xmax’, ‘Ymin’, ‘Ymax’ pour encadrer l’entité.
- Génération du cadre englobant
→ Définition d’un rectangle basé sur ces points extrêmes.
- Création du trait représentant le milieu du montant
→ Trait tracé pour suivre l’axe principal du montant (suivant sa longueur)
- Rotation du trait

→ Alignement avec le segment le plus long de la structure.

Simplification des traits des montants

Comme mentionné précédemment, l'affichage de l'ensemble de la structure provoque un scintillement important, ce qui peut être visuellement inconfortable, voire dérangeant. Une optimisation consiste donc à ne représenter qu'un demi-montant au lieu de représenter tout le contour du montant. Cette simplification est représentée dans la figure suivante (4.3)

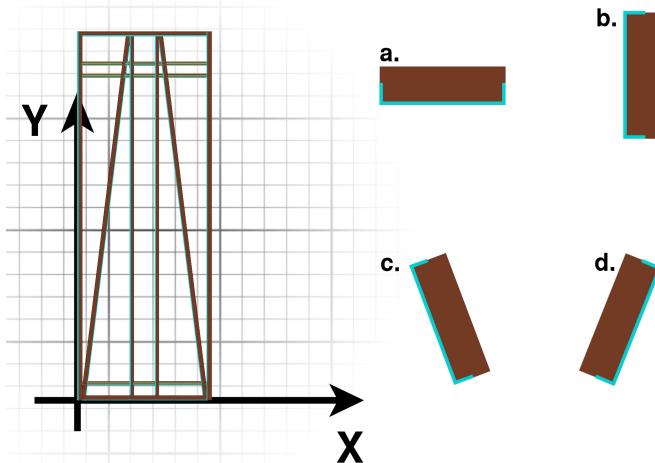


FIGURE 4.3 – Emplacement du trait de positionnement du montant

Le choix du trait à afficher est déterminé en fonction de la méthode de production utilisée, selon la méthodologie suivante :

- Le trait représente la moitié d'un montant, longeant tout le côté du bois et correspondant à la moitié de sa largeur. Il sert de repère visuel pour indiquer le sens de pose du bois, agissant comme un détrompeur. Le choix du côté affiché est défini de manière à représenter celui qui est le plus proche des bords de la table, selon la logique suivante :
- Si le montant est horizontal (a.), le trait représenté correspond à l'extrémité basse du montant (située à droite dans la direction du montant).
- Si le montant est vertical (b.), le trait affiché est celui de l'extrémité gauche.
- Pour un montant incliné, le trait est placé respectivement à gauche ou à droite en fonction de l'angle d'inclinaison, comme illustré dans les figures (c.) et (d.).

Découpage en zones

L'opérateur en charge de l'assemblage des caissons travaille généralement dans une zone restreinte, sauf lors de la pose des montants principaux.

Pour optimiser l'affichage et maximiser la puissance du laser, une segmentation de la zone de projection peut être mise en place. Cette segmentation est réglable, mais les dimensions optimales déterminées pour les opérateurs sont "dx = 2000 [mm]" et "dy = 3500 [mm]". Ces valeurs permettent de maintenir une zone de projection suffisamment grande tout en garantissant une luminosité adéquate.

Dans cette optique, de nouveaux calques sont générés afin de diviser les calques "traits de montants" et "médianes" en zones distinctes. L'opérateur, équipé d'une télécommande, peut facilement naviguer entre les différentes zones en appuyant sur un bouton, lui permettant ainsi de projeter uniquement la zone sur laquelle il travaille.

Les calques sont nommés selon le format "*Nom du Calque_Zone_x_y*", où "x" et "y" correspondent aux numéros des lignes et colonnes. Étant donné que la table de montage actuelle mesure 3,5 [m] de largeur, la segmentation ne devrait en principe concerner qu'un seul axe (*zone_1_1*, *zone_2_1*, etc.). Toutefois, le code est conçu pour s'adapter à des zones de production plus vastes si nécessaire. Ce principe de découpage en zone est illustrée dans la figure suivante (4.4).

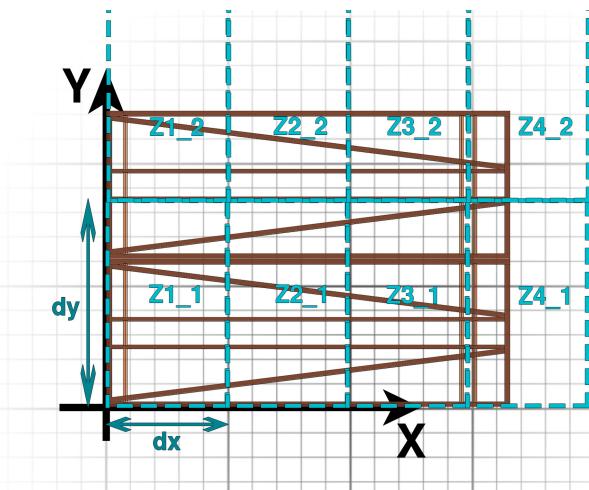


FIGURE 4.4 – Représentation de la nomination donnée aux zones

Emplacement des connecteurs

Une option permet d'afficher des traits directement sur la médiane à un entraxe spécifié, afin de faciliter le bon espacement pour le placement des connecteurs (clous, agrafes). Cette option est disponible, mais dans le cas des grands caissons, l'affichage d'un grand nombre d'éléments oblige le laser à s'allumer et s'éteindre à chaque emplacement, ce qui génère un scintillement important. Elle reste donc utilisable, mais est limitée à certains cas particuliers où le respect précis des entraxes est réellement nécessaire.

4.5.0.2 Protocole de test du casque de réalité augmentée

Protocole d'Expérimentation – Réalité Augmentée pour la Construction d'Ossature Bois

Travail de Fin d'Études

Avril 2025

1 Objectif

Évaluer l'impact de la réalité augmentée via casque (HoloLens 2) dans un environnement réel de construction d'ossature bois. L'expérimentation est divisée en trois parties :

- Test de précision de projection.
- Apprentissage et test réel en atelier avec construction d'un caisson.
- Évaluation UX à chaud via un questionnaire.

2 Matériel

- Casque HoloLens 2
- Vidéo tutorielle filmée depuis le casque
- QR codes pour calibration et positionnement des modèles
- Modèles 3D des caissons (test et réel)
- Table de montage graduée
- Outils de construction (visseuse, scie, équerre, etc.)
- Chronomètre / Application de suivi du temps
- Outils de mesure : grille millimétrée
- Carnet de relevés / Tableur
- Caméra ou smartphone
- Questionnaire UX
- Plans papiers
- Fiches d'observation de terrain

3 Partie 1 : Test de Précision (01 avril 2025)

3.1 Objectif

Évaluer la précision spatiale de projection du modèle 3D dans un environnement fixe.

FIGURE 4.5 – Protocole de test du casque de réalité augmentée (Page 1/3)

3.2 Mise en place

- Calibration du casque dans l'espace.
- Positionnement des QR codes.
- Lancement du modèle test.
- Vérification visuelle et prise de mesures.

3.3 Mesures

- Test de plusieurs emplacements de QR codes pour trouver l'emplacement idéal.
- Axe X/Y : 9 points (4 coins, 3 milieux d'arêtes, centre).
- Axe Z : Mesures avec la grille millimétrée.

4 Partie 2 : Test de Construction (17 avril 2025)

4.1 Objectif

Observer l'utilisation du casque AR pour la construction d'un caisson réel en production par deux opérateurs, avec un seul casque disponible.

4.2 Étape 1 – Apprentissage

4.2.1 Déroulement

- Chaque opérateur passe individuellement par une phase d'apprentissage à l'aide de la vidéo tutorielle.
- Chaque opérateur construit ensuite un caisson test (60 x 70[cm]) afin d'apprendre à utiliser le casque.

4.3 Étape 2 – Construction réelle

4.3.1 Opérateur 1

- Réalisation d'un caisson réel avec intervention possible de l'observateur en cas de problème.
- Complétion du questionnaire UX.

4.3.2 Opérateur 2 – Phase 1 (construction supervisée)

- Réalisation d'un caisson réel avec intervention possible de l'observateur en cas de problème.

4.3.3 Opérateur 2 – Phase 2 (comparaison en autonomie)

- Réalisation d'un nouveau caisson avec le casque sans aucune assistance.
- Mesure minutieuse des temps d'opération par étape.
- Réalisation immédiate du même caisson sans le casque (avec plans papier).

- Mesure des temps pour comparaison directe sur une même tâche par la même personne.
- Complétion du questionnaire UX.

4.4 Critères de comparaison

- Durée totale et par étape pour chaque mode (avec / sans casque).
- Qualité de construction : erreurs, alignement, positionnement des vis.
- Fluidité et autonomie.
- Recours à une assistance.

5 Partie 3 : Expérience Utilisateur (UX)

5.1 In-situ

- Observation continue des réactions.
- Analyse des interventions(besoins d'aide), erreurs, recours au plans version papier.

5.2 Post-expérience – Questionnaire UX

- Utilité
- Utilisabilité
- Affordance
- Précision perçue
- Charge cognitive
- Satisfaction globale et suggestions

6 Liste Globale du Matériel

Matériel	Utilisation
Casque HoloLens 2	Visualisation AR
Vidéo tutorielle	Formation initiale
QR Codes	Calibration
Modèles 3D	Référence visuelle
Outils de construction	Fabrication
Table graduée	Mesures
Outils de mesure	Vérification
Caméra / Smartphone	Documentation
Modem 4G	Connexion wi-fi
Plans papiers	Comparaison
Questionnaire UX	Retours utilisateurs
Ordinateur + tableur	Traitement des données
Chronomètre / App	Suivi du temps

FIGURE 4.7 – Protocole de test du casque de réalité augmentée (Page 3/3)

4.5.0.3 Questionnaire UX casque de réalité augmentée

Questionnaire A : Casque

1

Questionnaire d'utilisation du casque Hololens 2

Ce questionnaire vise à évaluer votre expérience avec le casque Hololens 2.
Merci de cocher les cases correspondant à vos réponses et de compléter les champs libres lorsque cela est demandé.
Vos réponses permettront d'améliorer l'outil.

Échelles de notation

Certaines questions utilisent une échelle de 0 à 5 :

0 = Pas du tout / Très souvent

1 = Un peu / Plutôt souvent

2 = Moyennement

3 = Plutôt oui / Plutôt rarement

4 = Oui / Très rarement

5 = Tout à fait / Jamais

D'autres questions nécessitent une réponse Oui/Non ou un choix parmi plusieurs options.

A propos de vous

1. Quel est votre nom ? _____
2. Quel est votre âge ? _____ ans
3. Était-ce votre première utilisation d'un casque de réalité augmentée? Oui Non
4. Si non, pouvez-vous expliquer dans quel cadre vous avez utilisé un casque ou une technologie semblable ?

Est-ce que le casque vous a été utile ?

Pertinence et valeur ajoutée

5a. Le casque de réalité augmentée m'a aidé à accomplir mes tâches plus efficacement.
 Pas du tout Tout à fait

5b. Le casque a apporté une valeur ajoutée par rapport aux méthodes traditionnelles.
 Pas du tout Tout à fait

Améliorations et suggestions

5c. Avez-vous ressenti un besoin d'améliorer l'affichage des calques ?
 Oui Non

5d. Si oui, comment ? (ex : couleurs, hiérarchie, taille des textes, etc.)

FIGURE 4.8 – Questionnaire UX du casque de réalité augmentée (Page 1/3) de l'utilisateur 1

Questionnaire A : Casque

2

Facilité d'utilisation du casque

Apprentissage et navigation

6a. Était-il facile d'apprendre à utiliser le casque ?
 Pas du tout Tout à fait

6b. Était-il facile d'afficher l'information recherchée ?
 Pas du tout Tout à fait

6c. Avez-vous eu besoin d'aide pour naviguer entre les calques ?
 Très souvent Non, Jamais

Fluidité et interactions

6d. Avez-vous rencontré des erreurs ou des bugs techniques pendant l'utilisation ?
 Très souvent Non, Jamais

6e. Le temps nécessaire à la prise en main vous semble-t-il raisonnable ?
 Pas du tout Tout à fait

6f. Le passage d'un calque à un autre était-il fluide ou perturbant ?
 Perturbant Très fluide

6g. Pensez-vous qu'une autre méthode de navigation serait plus efficace ? (ex : commande vocale, menu simplifié)
 Oui Non

6h. Si oui, laquelle ?

Intuitivité des interactions et organisation des calques

Compréhension des calques

7a. Avez-vous eu du mal à comprendre à quel calque vous étiez ?
 Très souvent Non, Jamais

7b. Le système de calques était-il clair et bien organisé ?
 Pas du tout Tout à fait

7c. Si vous deviez réorganiser les calques, comment le feriez-vous ?

Interface et navigation

7d. L'apparence des éléments vous permettait-elle de deviner leur fonction ?
 Pas du tout Tout à fait

7e. Les gestes ou interactions vous semblaient-ils naturels ?
 Pas du tout Tout à fait

Précision - Exactitude des informations fournies par le casque

8a. Les informations affichées étaient-elles précises et fiables ?
 Pas du tout Tout à fait

FIGURE 4.9 – Questionnaire UX du casque de réalité augmentée (Page 2/3) de l'utilisateur 1

Questionnaire A : Casque

3

8b. Le casque vous a-t-il aidé à éviter des erreurs ?
 Pas du tout Tout à fait

8c. Y a-t-il une information que vous auriez aimé voir affichée mais qui n'était pas disponible ?
 Oui Non

8d. Si oui, laquelle ?

Effort mental demandé par l'utilisation du casque

9a. Avez-vous ressenti une fatigue mentale ou visuelle en utilisant le casque ?
 Très souvent jamais

9b. Avez-vous trouvé qu'il y avait trop d'informations affichées en même temps ?
 Oui, totalement Non, pas du tout

9c. Aviez-vous l'impression de devoir faire attention à trop de choses en même temps ?
 Oui, totalement Non, pas du tout

Expérience globale et recommandations

10a. Si vous deviez donner une note au ressenti d'utilisation du casque, quelle serait-elle ?
 Très mauvaise Excellente

10b. Recommanderiez-vous cet outil à vos collègues ? Pourquoi ?
Oui, gain de temps grâce au positionnement des Bois, idem pour la coupe ainsi que le clouage des Panneaux.

10c. Quelles fonctionnalités supplémentaires aimeriez-vous voir intégrées ? (ex : zoom, annotations, affichage d'étapes animées)
Position des vis ou clou. + Plan sur le côté en cas de Besoin

10d. Si vous pouviez ajouter une seule fonctionnalité, laquelle serait-elle ?

10e. Si vous aviez déjà utilisé un casque dans un cadre similaire, est-ce que vous trouvez que cet essai a été plus enrichissant/concluant ? Pourquoi ?
 Oui Non

FIGURE 4.10 – Questionnaire UX du casque de réalité augmentée (Page 3/3) de l'utilisateur 1

Questionnaire A : Casque

1

Questionnaire d'utilisation du casque Hololens 2

Ce questionnaire vise à évaluer votre expérience avec le casque Hololens 2.
Merci de cocher les cases correspondant à vos réponses et de compléter les champs libres lorsque cela est demandé.
Vos réponses permettront d'améliorer l'outil.

Échelles de notation

Certaines questions utilisent une échelle de 0 à 5 :

0 = Pas du tout / Très souvent
 1 = Un peu / Plutôt souvent
 2 = Moyennement
 3 = Plutôt oui / Plutôt rarement
 4 = Oui / Très rarement
 5 = Tout à fait / Jamais

D'autres questions nécessitent une réponse Oui/Non ou un choix parmi plusieurs options.

A propos de vous

1. Quel est votre nom ? _____
2. Quel est votre age ? _____ ans
3. Était-ce votre première utilisation d'un casque de réalité augmentée? Oui Non
4. Si non, pouvez-vous expliquer dans quel cadre vous aviez utilisé un casque ou une technologie semblable ?

Est-ce que le casque vous a été utile ?

Pertinence et valeur ajoutée

5a. Le casque de réalité augmentée m'a aidé à accomplir mes tâches plus efficacement.
 Pas du tout Tout à fait

5b. Le casque a apporté une valeur ajoutée par rapport aux méthodes traditionnelles.
 Pas du tout Tout à fait

Améliorations et suggestions

5c. Avez-vous ressenti un besoin d'améliorer l'affichage des calques ?
 Oui Non

5d. Si oui, comment ? (ex : couleurs, hiérarchie, taille des textes, etc.)
dimensions des bois important pour le
tracage
(Hauteur tracage = dimensions de la H des Bois)

FIGURE 4.11 – Questionnaire UX du casque de réalité augmentée (Page 1/3) de l'utilisateur 2

Questionnaire A : Casque

2

Facilité d'utilisation du casque

Apprentissage et navigation

6a. Était-il facile d'apprendre à utiliser le casque ?

Pas du tout Tout à fait

6b. Était-il facile d'afficher l'information recherchée ?

Pas du tout Tout à fait

6c. Avez-vous eu besoin d'aide pour naviguer entre les calques ?

Très souvent Non, Jamais

Fluidité et interactions

6d. Avez-vous rencontré des erreurs ou des bugs techniques pendant l'utilisation ?

Très souvent Non, Jamais

6e. Le temps nécessaire à la prise en main vous semble-t-il raisonnable ?

Pas du tout Tout à fait

6f. Le passage d'un calque à un autre était-il fluide ou perturbant ?

Perturbant Très fluide

6g. Pensez-vous qu'une autre méthode de navigation serait plus efficace ? (ex : commande vocale, menu simplifié)

Oui Non

6h. Si oui, laquelle ?

Intuitivité des interactions et organisation des calques

Compréhension des calques

7a. Avez-vous eu du mal à comprendre à quel calque vous étiez ?

Très souvent Non, Jamais

7b. Le système de calques était-il clair et bien organisé ?

Pas du tout Tout à fait

7c. Si vous deviez réorganiser les calques, comment le feriez-vous ?

Interface et navigation

7d. L'apparence des éléments vous permettait-elle de deviner leur fonction ?

Pas du tout Tout à fait

7e. Les gestes ou interactions vous semblaient-ils naturels ?

Pas du tout Tout à fait

Précision - Exactitude des informations fournies par le casque

8a. Les informations affichées étaient-elles précises et fiables ?

Pas du tout Tout à fait

FIGURE 4.12 – Questionnaire UX du casque de réalité augmentée (Page 2/3) de l'utilisateur 2

Questionnaire A : Casque _____ 3

8b. Le casque vous a-t-il aidé à éviter des erreurs ?
 Pas du tout Tout à fait

8c. Y a-t-il une information que vous auriez aimé voir affichée mais qui n'était pas disponible ?
 Oui Non

8d. Si oui, laquelle ?
les cms à respecter entre les clous

Effort mental demandé par l'utilisation du casque

9a. Avez-vous ressenti une fatigue mentale ou visuelle en utilisant le casque ?
 Très souvent Jamais

9b. Avez-vous trouvé qu'il y avait trop d'informations affichées en même temps ?
 Oui, totalement Non, pas du tout

9c. Aviez-vous l'impression de devoir faire attention à trop de choses en même temps ?
 Oui, totalement Non, pas du tout

Expérience globale et recommandations

10a. Si vous deviez donner une note au ressenti d'utilisation du casque, quelle serait-elle ?
 Très mauvaise Excellente

10b. Recommanderiez-vous cet outil à vos collègues ? Pourquoi ?
Presque risque zero d'erreur

10c. Quelles fonctionnalités supplémentaires aimeriez-vous voir intégrées ? (ex : zoom, annotations, affichage d'étapes animées)

10d. Si vous pouviez ajouter une seule fonctionnalité, laquelle serait-elle ?
Musique ☺

10e. Si vous aviez déjà utilisé un casque dans un cadre similaire, est-ce que vous trouvez que cet essai a été plus enrichissant/concluant ? Pourquoi ?
 Oui Non

FIGURE 4.13 – Questionnaire UX du casque de réalité augmentée (Page 3/3) de l'utilisateur 2

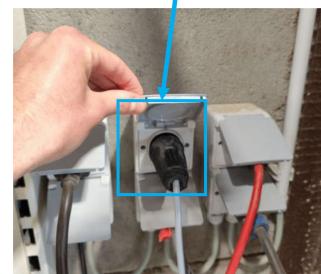
4.5.0.4 Fascicule d'utilisation du laser

1) Mise en marche des lasers

A) Brancher les 2 lasers



B) Vérifier que les lumières vertes clignotent sur les 2 lasers



2) Mise en marche de l'ordinateur

A) Allumer l'ordinateur



B) Allumer l'écran



C) Appuyer sur : CTRL + ALT + DELETE lorsque l'écran le demande (les 3 touches en même temps)



D) Appuyer sur OK

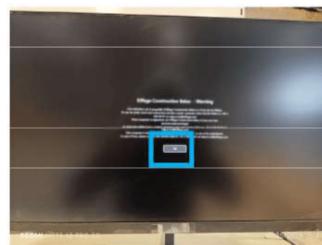


FIGURE 4.14 – Extrait du fascicule d'utilisation du projecteur laser (1/5)

2) Mise en marche de l'ordinateur

E) Entrer le mot de passe

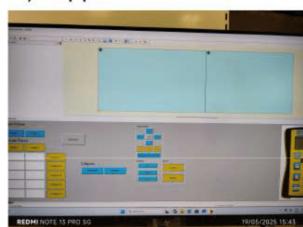
(pour utiliser les chiffres du clavier,
appuyer sur « NUM LOCK »)
faire ENTER pour valider



F) Lancer l'application « LaserPilot »

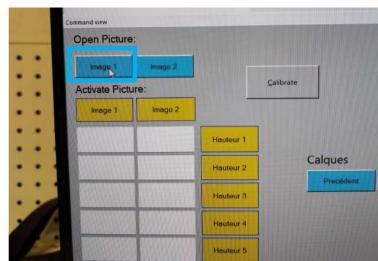


G) L'application s'ouvre



3) Régler l'application

A) Cliquer sur Image 1 pour ouvrir le fichier
(si 2 personnes utilisent des fichiers différents,
il faut assigner un fichier à « Image 1 » et l'autre à
« image 2 »)

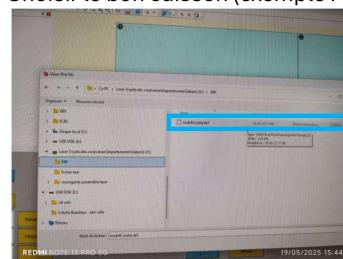


C) Lancer la calibration du laser en
cliquant sur « CALIBRATE »



B) Sélectionner le fichier que l'on souhaite afficher

- Aller dans Laser
- Nom du projet (exemple E6K)
- Choisir le bon caisson (exemple MOB44)



Le laser va parcourir les différentes mires. Si une erreur s'affiche (comme sur l'image) c'est qu'un bois bloque le faisceau du laser ou que de la poussière se trouve sur la mire (il y a 6 mires)

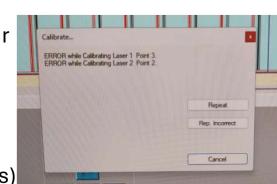
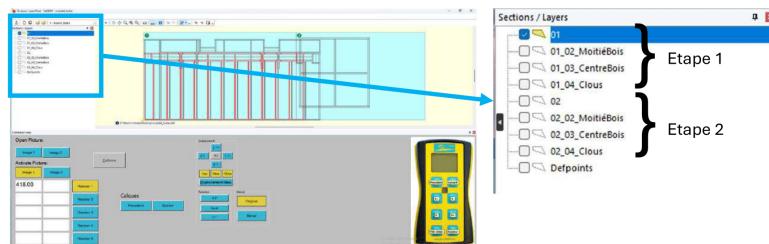


FIGURE 4.15 – Extrait du fascicule d'utilisation du projecteur laser (2/5)

4) Utiliser le laser

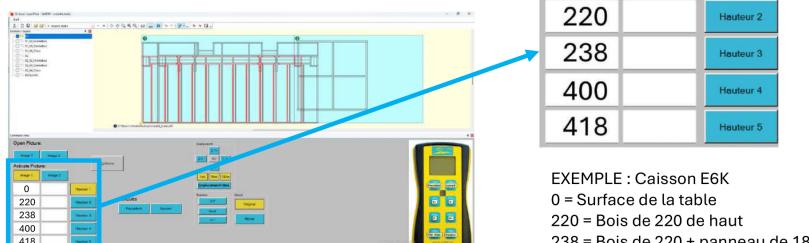
a) Les calques (layers)



- 01: indique la première étape de fabrication, utile pour les caissons complexes fabriqués en plusieurs segments (par exemple : 02_01, 03_01, etc.). Cela affiche la totalité de la structure (du calque)
- MoitiéStructure : montre uniquement la moitié des montants et est situé du côté gauche du montant
- CentreBois : indique la ligne médiane des montants
- Clous : repère les emplacements des clous (clignote plus)

4) Utiliser le laser

b) Les hauteurs d'affichage



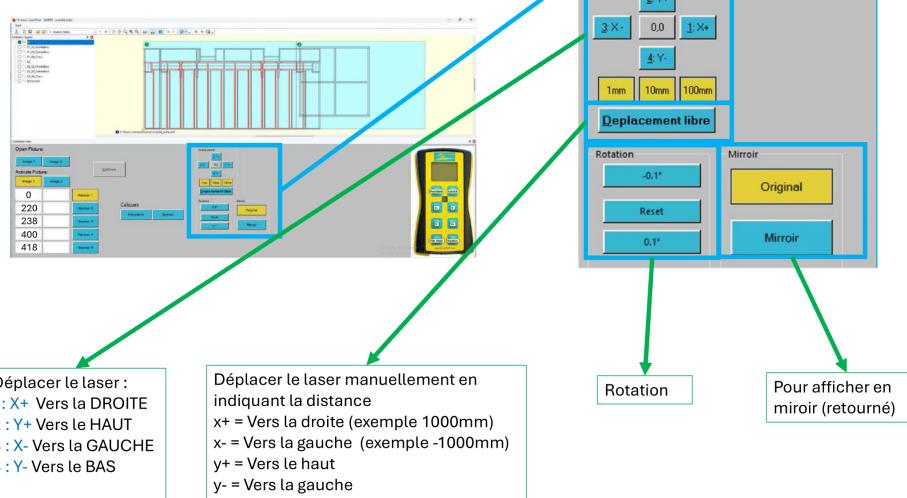
Il faut spécifier toutes les hauteurs auxquelles le laser va devoir afficher des traits
Donc, toujours la « hauteur du bois » et « Hauteur bois + Panneau »

EXEMPLE : Caisson E6K
0 = Surface de la table
220 = Bois de 220 de haut
238 = Bois de 220 + panneau de 18
400 = Bois de 400 de haut
418 = Bois de 400 + panneau de 18

FIGURE 4.16 – Extrait du fascicule d'utilisation du projecteur laser (3/5)

4) Utiliser le laser

c) Déplacer les traits du laser (translation et rotation)



4) Utiliser le laser

d) Utiliser la télécommande

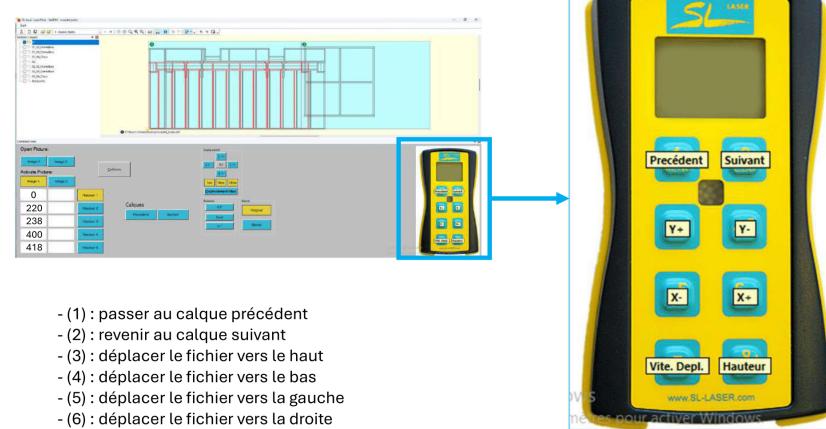
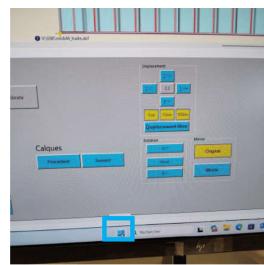


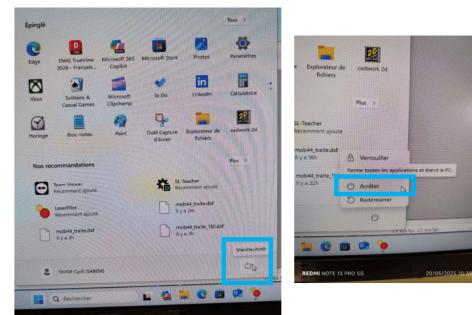
FIGURE 4.17 – Extrait du fascicule d'utilisation du projecteur laser (4/5)

5) Eteindre l'ordinateur et les lasers

A) Cliquer sur le bouton Windows (démarrer)



B) Cliquer sur « Marche/Arrêt » PUIS « Arrêter »



C) Débrancher les prises de courant des lasers (inverse de l'étape 1)

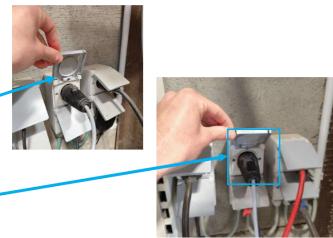


FIGURE 4.18 – Extrait du fascicule d'utilisation du projecteur laser (5/5)

4.5.0.5 Questionnaire UX laser de projection

Questionnaire B : Laser

1

Questionnaire d'utilisation du laser XR

Ce questionnaire vise à évaluer votre expérience avec le laser.
Merci de cocher les cases correspondant à vos réponses et de compléter les champs libres lorsque cela est demandé.
Vos réponses permettront d'améliorer l'outil.

Échelles de notation

Certaines questions utilisent une échelle de 0 à 5 :

0 = Pas du tout / Très souvent
 1 = Un peu / Plutôt souvent
 2 = Moyennement
 3 = Plutôt oui / Plutôt rarement
 4 = Oui / Très rarement
 5 = Tout à fait / Jamais

D'autres questions nécessitent une réponse Oui/Non ou un choix parmi plusieurs options.

A propos de vous

1. Quel est votre nom ? _____
 2. Quel est votre age ? _____ ans
 3. Était-ce votre première utilisation avec un laser de projection ? Oui Non
 4. Si non, pouvez-vous expliquer dans quel cadre vous aviez utilisé un laser de projection ou une technologie semblable ?

Est-ce que le laser vous a été utile ?

Pertinence et valeur ajoutée

5a. Le laser m'a aidé à accomplir mes tâches plus efficacement.
 Pas du tout ———— Tout à fait

5b. Le laser a apporté une valeur ajoutée par rapport aux méthodes traditionnelles.
 Pas du tout ———— Tout à fait

Améliorations et suggestions

5c. Avez-vous gagné du temps grâce à la projection laser ?
 Oui Non

5d. Si oui, ce gain de temps concerne-t-il surtout des étapes redondantes ou répétitives ?
 Oui Non

- Véhiculier
- Vérification par besoin grâce au laser

FIGURE 4.19 – Questionnaire UX du laser de projection (Page 1/3)

Questionnaire B : Laser

2

5e. Ce gain de temps vous semble-t-il bénéfique uniquement pour la productivité de l'entreprise, ou aussi pour votre propre confort au travail ?
Satisfaisant de sentir qu'on va plus vite.

5f. Pensez-vous que ce système pourrait devenir un outil de travail quotidien pour vous, utilisé sur tous les projets d'ossature bois à venir ?
 Pas du tout Tout à fait

Facilité d'utilisation du laser

Apprentissage et navigation

6a. Était-il facile d'apprendre à utiliser le laser ?
 Pas du tout Tout à fait

6b. Était-il facile d'afficher l'information recherchée ?
 Pas du tout Tout à fait

6c. Avez-vous eu besoin d'aide pour naviguer entre les calques et les hauteurs d'affichage ?
 Très souvent Non, Jamais

6d. Après cette première utilisation, pensez-vous être capable d'utiliser le laser de manière autonome, sans avoir besoin d'aide ou d'accompagnement ?
 Pas du tout Tout à fait

Fluidité et interactions

6d. Le passage d'un calque à un autre était-il fluide ou perturbant ?
 Perturbant Très fluide

6e. Selon vous, est-il plus simple d'utiliser l'ordinateur plutôt que la télécommande pour sélectionner un élément à afficher ?
 Oui Non

6f. Si vous trouvez l'ordinateur plus simple à utiliser, pensez-vous que l'expérience avec la télécommande pourrait être améliorée ? De quelle manière ?
Utilisé que 3x par ca n'en change pas obligatoirement

Intuitivité des interactions et organisation des calques

Compréhension des calques

7a. Avez-vous trouvé que les faisceaux laser projetés étaient faciles à interpréter ? Est-il clair pour vous de quel élément il s'agit (par exemple : l'axe des bois, le côté des montants, ou l'ensemble de la structure) ?
 Très souvent Non, Jamais

7b. Le système de calques était-il clair et bien organisé ? ("01" pour la première étape, nom des calques, etc..)
 Pas du tout Tout à fait

7c. Si vous deviez réorganiser les calques, comment le feriez-vous ?
*Axe du bois au lieu de mi-bois
haut, gauche au lieu de malice*

FIGURE 4.20 – Questionnaire UX du laser de projection (Page 2/3)

Questionnaire B : Laser

3

Précision des informations fournies par la RA

8a. Les informations affichées étaient-elles précises et fiables ?
 Pas du tout Tout à fait

9a. Est-ce que les traits affichés étaient suffisamment visibles ?
 Pas du tout Tout à fait

9b. Le laser vous a-t-il aidé à éviter des erreurs ?
 Très souvent Jamais

9c. Y a-t-il une information que vous auriez aimé voir affichée mais qui n'était pas disponible ?
 Oui Non

9d. Si oui, laquelle ?

Effort mental demandé par l'utilisation du laser

10a. Avez-vous ressenti une fatigue mentale ou visuelle en utilisant le laser ?
 Très souvent jamais

11a. Est-ce que le scintillement était gênant et empêchait de se concentrer ou a pu vous donner un mal de tête ?
 Pas du tout Tout à fait

11b. Avez-vous trouvé qu'il y avait trop d'informations affichées en même temps ?
 Oui, totalement Non, pas du tout

Expérience globale et recommandations

12a. Si vous deviez donner une note au ressenti d'utilisation du laser, quelle serait-elle ?
 Très mauvaise Excellente

12b. Recommanderiez-vous cet outil à vos collègues ? Pourquoi ?

12c. Quelles fonctionnalités supplémentaires aimeriez-vous voir intégrées ? (ex : zoom, annotations, affichage d'étapes animées)
Emplacement cléage ; Surlout pour les Vin

12d. Si vous pouviez ajouter une seule fonctionnalité, laquelle serait-elle ?

12e. Si vous aviez déjà utilisé un laser dans un cadre similaire, est-ce que vous trouvez que cet essai a été plus enrichissant/concluant ? Pourquoi ?
 Oui Non
Installé l'ancienne entreprise mais jamais utilisé.

FIGURE 4.21 – Questionnaire UX du laser de projection (Page 3/3)

Bibliographie

- [1] Adam, J. (1993). Virtual reality is for real. *IEEE Spectrum*, 30(10), 22–29.
<https://doi.org/10.1109/6.237580>
- [2] Amtsberg, F., Yang, X., Skoury, L., Calepso, A. S., Sedlmair, M., Wortmann, T., Menges, A. (2023). Multi-actor fabrication for digital timber construction. *eCAADe Proceedings*, 1, 417–426.
<https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2023.1.417>
- [3] Atanasova, L., Mitterberger, D., Sandy, T., Gramazio, F., Kohler, M., Dörfler, K. (2020). Prototype as artefact. *ACADIA Quarterly*. <https://doi.org/10.52842/conf.acadia.2020.1.350>
- [4] Baek, F., Ha, I., Kim, H. (2018). Augmented reality system for facility management using image-based indoor localization. *Automation in Construction*, 99, 18–26.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.034>
- [5] Bartuska, B., Teischinger, A., Riegler, M. (2022). Effects of spatial augmented reality assistance on the efficiency of prefabricating timber frame walls. *Wood Material Science and Engineering*, 18(3), 860–869.
<https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2085528>
- [6] Blahut, S., Harnoncourt-Fuchs, M. (2023). Mixed reality interactive representations for the assembly of a custom timber tower. *eCAADe Proceedings*, 2, 751–760.
<https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2023.2.751>
- [7] Buildwise. (2013). *Construire en bois : Atouts et précautions*.
https://www.buildwise.be/media/iuicz2t5/contact_fr_01_2013.pdf
- [8] Buildwise. (2023). *Gids Hout – Guide du bois* [PDF].
<https://www.buildwise.be/media/zrnjiph5/bw-gids-hout-fr.pdf>
- [9] Calixte, X., Leclercq, P. (2017). Discussion sur 4 situations d'usage d'espaces de réalité augmentée. In *14th International Conference on Cooperative Design, Visualization and Engineering (CDVE 2017)*, Mallorca, Spain. <https://www.researchgate.net/publication/368746841>
- [10] Carrasco, M. D. O., Chen, P. (2021). Application of mixed reality for improving architectural design comprehension effectiveness. *Automation in Construction*, 126, 103677.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103677>
- [11] Cattan, G. (2021). Réalité virtuelle : Définition et engouement [Article]. *IBM*.
<https://hal.science/hal-03181005/document>
- [12] Chai, H., Guo, Z., Yuan, P. F. (2021). Developing a mold-free approach for complex glulam production with the assist of computer vision technologies. *Automation in Construction*, 127, 103710.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103710>
- [13] Chagnon, J. (2020). *Réalités virtuelle, augmentée et mixte*. FCBA.
<https://www.fcba.fr/wp-content/uploads/2020/11/FCBAINFO-2020-4-Ameublement-Realites-virtuelle-augmentee-mixte-Chagnon.pdf>
- [14] Cupereschmid, A. R. M., Grachet, M. G., Fabricio, M. M. (2016). Augmented reality as a tutorial tool for construction tasks. *Advances in Computer-Human Interaction*, 192–197.
https://www.thinkmind.org/articles/achi_2016_9_10_20052.pdf
- [15] Dai, F., Olorunfemi, A., Peng, W., Cao, D., Luo, X. (2020). Can mixed reality enhance safety communication on construction sites? An industry perspective. *Safety Science*, 133, 105009.
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.105009>
- [16] Dalux. (s.d.). *La réalité augmentée avec Dalux Field*. <https://dalux.zendesk.com/hc/fr/articles/360015612953-La-R%C3%A9alit%C3%A9-Augment%C3%A9e-avec-Dalux-Field>

- [17] Dan, Y., Shen, Z., Xiao, J., Zhu, Y., Huang, L., Zhou, J. (2021). HoloDesigner : A mixed reality tool for on-site design. *Automation in Construction*, 129, 103808. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103808>
- [18] Eurostat. (2023). *Structural business statistics – Construction sector*. https://ec.europa.eu/eurostat/data/database?node_code=sbs_na_con_r2
- [19] Fazel, A., Adel, A. (2024b). Enhancing construction accuracy, productivity, and safety with augmented reality for timber fastening. *Automation in Construction*, 166, 105596. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105596>
- [20] Fuchs, P. (2018). *Théorie de la réalité virtuelle : Les véritables usages*. Presses des Mines.
- [21] Gauzin-Müller, D. (1999). *Construire avec le bois*. Éditions Le Moniteur.
- [22] Hout Info Bois. (2023). *État de la construction bois en Belgique 2011-2022*. https://www.houtinfobois.be/wp-content/uploads/2023/03/Enquete_FR_HIB_2011-2022_27-02-23-P06-BR-13_03_23-17h19.pdf
- [23] Hout Info Bois. (s.d.). *Dimensions des bois*. <https://www.houtinfobois.be/informations-techniques/materiaux/dimensions-des-bois/>
- [24] Huang, H., Su, S., Li, L. (2024). Advancing timber construction : Historical growth, research frontiers, and time series forecasting. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 1–30. <https://doi.org/10.1080/13467581.2024.2373829>
- [25] Jahn, G., Newnham, C., Van Den Berg, N. (2022). Augmented reality for construction from steam-bent timber. *Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia*. <https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2022.2.191>
- [26] Kaiser, B., Strobel, T., Verl, A. (2021). Human-robot collaborative workflows for reconfigurable fabrication systems in timber prefabrication using augmented reality. *2021 27th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)*, 576–581. <https://doi.org/10.1109/m2vip49856.2021.9665011>
- [27] Kuniavsky, M. (2010). *Smart things : Ubiquitous computing user experience design*. Morgan Kaufmann Publishers Inc. <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=2597837>
- [28] Kyaw, A. H., Xu, A. H., Jahn, G., Van Den Berg, N., Newnham, C., Zivkovic, S. (2023b). Augmented reality for high precision fabrication of glued laminated timber beams. *Automation in Construction*, 152, 104912. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104912>
- [29] Lallemand, C., Gronier, G. (2015). *Méthodes de design UX : 30 méthodes fondamentales pour concevoir et évaluer les systèmes interactifs*. Éditions Eyrolles.
- [30] Li, X., Yi, W., Chi, H.-L., Wang, X., Chan, A. P. C. (2018). A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety. *Automation in Construction*, 86, 150–165. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.11.003>
- [31] McKinsey Company. (2017). *Reinventing construction through a productivity revolution*. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/reinventing-construction-through-a-productivity-revolution>
- [32] Milgram, P., Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 77(12), 1321–1329. https://cs.gmu.edu/~zduric/cs499/Readings/r76JBo-Milgram_IEICE_1994.pdf
- [33] Norman, D., Miller, J., Henderson, A. (1995). What you see, some of what's in the future, and how we go about doing it : HI at Apple Computer. *Proceedings of CHI 1995*, Denver, Colorado, USA.
- [34] Potseluyko, L., Rahimian, F. P., Dawood, N., Elghaish, F., Hajirasoli, A. (2022). Game-like interactive environment using BIM-based virtual reality for the timber frame self-build housing sector. *Automation in Construction*, 142, 104496. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104496>
- [35] Raskar, R., Welch, G., Fuchs, H. (1999). Spatially augmented reality. In *Augmented Reality : Placing Artificial Objects in Real Scenes* (pp. 64–71).
- [36] Settimi, A., Chutisilp, N., Aymanns, F., Gamerro, J., Weinand, Y. (2024). TTool : A supervised artificial intelligence-assisted visual pose detector for tool heads in augmented reality woodworking. *Applied Sciences*, 14(7), 3011. <https://doi.org/10.3390/app14073011>

- [37] Settimi, A., Gamerro, J., Weinand, Y. (2022b). Augmented-reality-assisted timber drilling with smart retrofitted tools. *Automation in Construction*, 139, 104272. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104272>
- [38] Song, Y., Koeck, R., Luo, S. (2021). Review and analysis of augmented reality (AR) literature for digital fabrication in architecture. *Automation in Construction*, 128, 103762. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103762>
- [39] Suzuki, T., Ikeda, H., Takeuchi, I., Matsunaga, F., Sumitomo, E., Ikeda, Y. (2020). Holonavi – A study on user interface for assembly guidance system with mixed reality in a timber craft of architecture. *Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia*, 1, 691–700. <https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2020.1.691>
- [40] Sutherland, I. E. (1968). A head-mounted three-dimensional display. In *Fall Joint Computer Conference, Part I* (pp. 757–764). <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/1476589.1476686>
- [41] Tsai, L., Chi, H., Wu, T., Kang, S. (2022). AR-based automatic pipeline planning coordination for on-site mechanical, electrical and plumbing system conflict resolution. *Automation in Construction*, 141, 104400. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104400>
- [42] United Nations Economic Commission for Europe. (2023). *Circularity concepts in wood construction*. <https://globalabc.org/resources/publications/circularityconcepts-wood-construction>
- [43] United Nations Environment Programme. (2024). *2023 global status report for buildings and construction : Beyond foundations – Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095>
- [44] Wagner, D., Schmalstieg, D. (2003). First steps towards handheld augmented reality. *Proceedings of the 7th International Conference on Wearable Computers*, White Plains, NY, October 21–23.
- [45] Wu, S., Hou, L., Zhang, G., Chen, H. (2022). Real-time mixed reality-based visual warning for construction workforce safety. *Automation in Construction*, 139, 104252. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104252>
- [46] Wuni, I. Y., Abankwa, D. A., Koc, K., Adukpo, S. E., Antwi-Afari, M. F. (2024). Critical barriers to the adoption of integrated digital delivery in the construction industry. *Journal of Building Engineering*, 83, 108474. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108474>