

Combinaison de la métrologie 3D et de la réalité augmentée  
pour le contrôle de la qualité des assemblages dans la  
construction modulaire

par

Wafa BOUNAOUARA

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE  
LA MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE  
M.Sc.A

MONTREAL, LE 11 NOVEMBRE 2023

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Wafa Bounaouara, 2023



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

**PRÉSENTATION DU JURY**

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Louis Rivest, directeur de mémoire  
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Antoine Tahan, codirecteur de mémoire  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Conrad Botton, président du jury  
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Lucas Hof, membre du jury  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 02 NOVEMBRE 2023

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE



## REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à mon directeur de recherche, M. Louis Rivest, pour sa précieuse guidance et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire. Je suis reconnaissante de l'opportunité qui m'a été donnée de travailler sous sa direction.

Un chaleureux merci également à mon co-directeur de recherche, M. Antoine Tahan, pour son encadrement et son soutien continu. Son expertise et ses conseils éclairés ont été d'une importance cruciale pour la réussite de ce travail de recherche.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance envers M. Joël Grignon pour son assistance précieuse et le partage de son expertise tout au long de la réalisation de ce projet.

Je tiens également à remercier notre partenaire industriel et le programme MITACS Accélération pour leur confiance et soutien financier qui a rendu ce projet possible.

Je remercie mes parents Salha et Mohammed ainsi que mes sœurs, Rahma et Henda pour leur amour inconditionnel et leurs constants encouragements.

À ma famille LIPPS et mes amis, Jérémy et Elodie, merci pour votre écoute et votre bienveillance constante. Votre présence à mes côtés tout au long de cette maîtrise a été une source précieuse de réconfort et de soutien.



# Combinaison de la métrologie 3D et de la réalité augmentée pour le contrôle de la qualité des assemblages dans la construction modulaire

Wafa BOUNAOUARA

## RÉSUMÉ

Dans la construction modulaire de bâtiments, le contrôle géométrique et dimensionnel des modules assemblés en usine est un processus crucial. En effet, le contrôle des caractéristiques clés (ex. les dimensions hors-tout, l'erreur d'équerrage, le parallélisme entre le plafond et le plancher, etc.) est incontournable pour assurer la conformité du module comme tel, et aussi pour l'estimation des cales d'ajustement lors de l'empilement des modules sur site.

Traditionnellement, ce processus est assuré par des mesures manuelles et des outils spécialisés. Si nécessaires, les opérations d'ajustement et de correction sont réalisées *a posteriori* impliquant ainsi des carences de productivité.

L'avènement de la métrologie 3D à moyenne et grande échelle offre une alternative prometteuse puisqu'elle permet des mesures précises *in situ*. Aussi, la réalité augmentée permet la projection immersive d'informations et d'instructions de guidage. Ces deux technologies combinées offrent donc un potentiel pour améliorer les performances du procédé d'assemblage.

L'objectif de ce projet est de présenter *une preuve de concept* d'une solution qui combine la photogrammétrie industrielle et la réalité augmentée dans le but d'intégrer le contrôle de la qualité dimensionnelle et géométrique au processus d'assemblage des modules en usine.

Le système proposé offre aux opérateurs et opératrices des informations utiles et en temps réel. Il projette les données de mesure lors du positionnement et ajustement des pièces de l'assemblage et il permet aussi de documenter le résultat du processus d'inspection. Des tests ont été menés en laboratoire et en usine pour évaluer la convivialité du système et identifier les pistes d'amélioration pour l'implémentation future du système.

**Mots clés:** Métrologie 3D, réalité augmentée, construction modulaire, photogrammétrie





# Combining 3D metrology and augmented reality for assembly quality control in modular construction

Wafa BOUNAOUARA

## ABSTRACT

In modular construction, the geometric and dimensional quality control of factory-assembled modules is crucial. Controlling key characteristics (e.g., overall dimensions, squareness error, and the parallelism of ceilings and floors) is essential to ensure a module's conformity with the technical specifications and estimate the adjustment shims needed when stacking modules on-site.

Traditionally, this process is carried out using manual measurements and specialized tools. If necessary, adjustments and corrections are made *a posteriori*, which leads to a loss of productivity.

The advent of medium- and large-scale 3D metrology offers a promising alternative, since it makes it possible to take precise measurements *in situ*. Augmented reality also enables the immersive projection of information and guidance instructions. When combined, these two technologies offer the potential to improve manufacturing performance.

The aim of this project is to present a *proof of concept* of a solution that combines industrial photogrammetry and augmented reality to integrate dimensional and geometric quality control into the module assembly process in the factory.

The proposed system offers an immersive experience by projecting measurement data in real time when assembly parts are being positioned and adjusted, and also supports the documenting of inspection results. Laboratory and factory tests were conducted to assess the system's user-friendliness and identify areas for improvement for future implementation.

**Keywords:** 3D Metrology, Augmented Reality, Modular Construction, Photogrammetry.



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE INDUSTRIELLE .....	3
1.1 Mise en contexte .....	3
1.2 Organisation de l'usine et processus de fabrication.....	3
1.3 Contrôle de la qualité dimensionnelle et géométrique des modules.....	5
1.4 Problématique .....	7
1.5 Objectif global du projet.....	8
1.6 Synthèse .....	8
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE .....	9
2.1 Contrôle de qualité dans la construction hors site .....	9
2.2 Principes de base de l'Assemblage Assistée par la Mesure (AAM).....	10
2.3 Métrologie grande échelle.....	13
2.4 Technologies de métrologie 3D .....	14
2.4.1 Laser de poursuite (Laser tracker) .....	14
2.4.2 Photogrammétrie.....	15
2.4.3 iGPS (indoor Global Positioning System) .....	16
2.4.4 Le système mobile de mesure des coordonnées spatiales (MScMS).....	16
2.4.5 Les scanneurs / numériseurs .....	17
2.4.6 Combinaison de plusieurs technologies.....	18
2.5 Réalité augmentée (RA).....	20
2.5.1 Définitions.....	20
2.5.2 Composition d'un système de RA .....	21
2.5.2.1 Systèmes d'affichages en RA .....	22
2.5.2.2 Système de suivi .....	23
2.5.3 Applications de la RA dans l'assemblage et l'inspection.....	25
2.6 Synthèse .....	27
CHAPITRE 3 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE .....	29
3.1 Objectifs spécifiques .....	29
3.2 Méthodologie proposée.....	30
3.2.1 Conception d'une maquette réduite .....	30
3.2.2 Choix du matériel et logiciels .....	31
3.2.2.1 Équipement de mesure.....	32
3.2.2.2 Unité de traitement des données .....	34
3.2.2.3 Interface utilisateur .....	35
3.2.3 Validation de la convivialité de système .....	35
3.3 Synthèse .....	36

CHAPITRE 4	PROPOSITION ET EXPÉRIMENTATION .....	37
4.1	Hypothèses de travail.....	37
4.2	Développement des artefacts .....	38
4.2.1	Conception et validation .....	38
4.2.2	Principe de fonctionnement .....	40
4.3	Dispositif expérimental.....	40
4.4	Traitements préliminaires .....	41
4.4.1	Référencement de l'environnement du travail.....	41
4.4.2	Méthode d'alignement .....	42
4.4.3	Création du modèle de suivi .....	42
4.5	Traitement des données.....	43
4.5.1	Identification des cibles .....	45
4.5.2	Déterminer les coordonnées des points critiques.....	45
4.6	Interface utilisateur .....	46
4.7	Synthèse .....	47
CHAPITRE 5	PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION .....	49
5.1	Étude de répétabilité et reproductibilité du système de mesure.....	49
5.1.1	Déroulement des tests expérimentaux .....	51
5.1.2	Résultats.....	52
5.2	Test en usine .....	54
5.2.1	Configuration expérimentale .....	54
5.2.2	Artefacts échelle réelle.....	55
5.2.3	Déroulement du test .....	56
5.2.4	Observations .....	57
5.3	Discussion.....	58
CONCLUSION.....		61
RECOMMANDATIONS .....		63
ANNEXE I	ARTEFACTS.....	65
ANNEXE II	LES SCRIPTS MACROS.....	73
ANNEXE III	RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.....	87
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		91

## LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Chaîne de fabrication de la structure d'un module chez le PI Tirée de Cognet (2020).....	4
Figure 1.2	Supports muraux ajustables utilisés pour l'assemblage des murs .....	5
Figure 1.3	Système de contrôle du parallélisme de deux côtés opposés des modules .....	6
Figure 2.1	L'approche traditionnelle (a) et la technologie d'assemblage assistée par la mesure (b) pour l'assemblage à grande échelle.....	11
Figure 2.2	Ordre de grandeur de la précision et la portée de quelques technologies de mesure 3D .....	18
Figure 2.3	Vue globale du fonctionnement d'un système de RA, Adaptée de Van Krevelen et Poelman (2010).....	21
Figure 2.4	Classification des écrans de la RA en fonction de leur position entre l'observateur et l'environnement réel Tirée de Bimber & Raskar (2006) .....	22
Figure 2.5	Classification des systèmes de suivi d'un système de RA.....	24
Figure 3.1	Vue globale de la méthodologie proposée .....	30
Figure 3.2	Modèle CAO du module réduit.....	31
Figure 3.3	Vue globale du système proposé pour assister l'assemblage de la structure des modules par métrologie 3D .....	33
Figure 3.4	Système de photogrammétrie de <i>Creaform</i> . (a) Le palpeur portable <i>HandyPROBE</i> , (b) La fonctionnalité <i>C-Link</i> .....	34
Figure 4.1	Illustration des différentes configurations obtenues pour la première version d'artefacts.....	38
Figure 4.2	Modèle retenu de l'artefact .....	39
Figure 4.3	Éléments de l'artefact .....	40
Figure 4.4	Nomenclature et dispositif expérimental .....	41
Figure 4.5	Préparation du système de mesure.....	43

Figure 4.6	Diagramme de flux représentant le traitement des données effectué en dynamique.....	44
Figure 4.7	Interface utilisateur générée sur les HoloLens2.....	47
Figure 5.1	Dispositif expérimental du test en usine .....	55
Figure 5.2	Artefact adapté échelle réelle.....	56
Figure 5.3	Déroulement de test en usine .....	57

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AAM	Assemblage Assisté par la Mesure
ADM	Absolute Distance Measurement
AMT	Appareil de Mesure Tridimensionnelle
ANOVA	Analyse de variance
BIM	Building Information Modeling
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CMM	Coordinate Measuring Machine
ÉTS	École de Technologie Supérieure
GPS	Global Positioning System
GPU	Graphics Processing Unit
IFC	Industry Foundation Classes
IFM	Relative-displacement Measuring Interferometer
iGPS	indoor Global Positioning System
LSI	Limite Inférieure de Spécification
LSS	Limite Supérieure de Spécification
MScMS	Mobile Spatial Coordinate Measurement System
ND	Non Défini
PI	Partenaire Industriel
R&R	Répétabilité et reproductibilité
RA	Réalité Augmentée
RM	Réalité Mixte

XVI

RV	Réalité Virtuelle
SMR	Spherical Mount Reflector
TDoA	Time Difference of Arrival
X-bar R	Méthode des étendues



## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Hz	Hertz
m	Mètre
mm	Millimètre
P/T	Ratio Précision Tolérance
$\mu\text{m}$	Micromètre
$\sigma$	Écart Type
$\sigma_{\text{R\&R}}$	Écart Type de répétabilité et reproductibilité
$\sigma_{\text{Répétabilité}}$	Écart Type de répétabilité
$\sigma_{\text{Reproductibilité}}$	Écart Type de reproductibilité



## INTRODUCTION

Le concept de construction modulaire sous-entend la fabrication d'éléments en unités préfabriquées, appelées "modules", dans un environnement contrôlé en dehors du site de construction. Ces modules sont ensuite transportés sur site et assemblés pour former des bâtiments complets. Chaque module résulte de l'assemblage d'éléments structurels et des éléments de finition (conduites d'eau, câbles, meubles, etc.).

Les avantages de la construction modulaire sont nombreux. On peut invoquer l'amélioration de la prévisibilité des coûts, l'augmentation de la productivité, l'assurance qualité, la rapidité du montage final, et bien d'autres. Cependant, garantir la qualité dimensionnelle et géométrique lors de l'assemblage des modules demeure un enjeu crucial. Cela permet d'évaluer la qualité des modules tels qu'ils sont fabriqués et de déterminer les ajustements nécessaires lors de l'élévation des bâtiments sur site.

Traditionnellement, cette étape est réalisée après l'assemblage complet de chaque module (taille de lot unitaire). Le cas échéant, des opérations de rectification sont effectuées par la suite, ce qui engendre une réduction de la productivité. De plus, le contrôle de qualité s'appuie souvent sur des mesures manuelles, compromettant les impératifs de traçabilité.

L'assemblage assisté par la mesure AAM est une procédure qui consiste à intégrer le processus d'inspection aux opérations d'assemblage. Cela inclut entre autres le suivi et le positionnement des pièces à assembler en temps réel par les technologies de mesure 3D.

Cette approche offre une solution prometteuse pour l'assemblage des modules en usine, garantissant une précision géométrique optimale tout au long du processus. Associée à des solutions logicielles, elle permet aussi de documenter la qualité dimensionnelle et géométrique des modules, répondant ainsi aux exigences de traçabilité.

Cependant, les opérateurs ont besoin de garder leurs mains libres pendant l'assemblage. La Réalité Augmentée (RA) se présente donc comme une technologie permettant de projeter des informations dans l'environnement de travail, offrant ainsi une interaction simplifiée avec les éléments numériques.

En collaboration avec notre Partenaire Industriel (PI), un leader national en construction modulaire, ce projet vise à fusionner les technologies de métrologie 3D et la RA pour créer une solution intégrant le contrôle qualité dans le processus d'assemblage.

Ce mémoire est structuré comme suit : dans le CHAPITRE 1, nous analysons la problématique industrielle chez le PI. Une description du processus de fabrication et d'inspection tel que réalisé chez le PI au moment du début de projet est donnée.

Le CHAPITRE 2 explore les travaux existants dans la littérature au tour des trois thématiques clés qui vont permettre de répondre à l'objectif global du projet : L'automatisation du contrôle de la qualité dans la construction hors site, l'assemblage assisté par la mesure AAM et les technologies de mesure 3D à grande échelle, ainsi que la réalité augmentée et ses applications dans les opérations d'assemblage et d'inspection.

Dans le CHAPITRE 3 nous fixons les objectifs spécifiques de ce projet et nous détaillons le choix du matériel et logiciel pour l'implémentation d'une solution métrologique numérique qui permet d'assister l'assemblage de la structure extérieure des modules afin de garantir la qualité géométrique et dimensionnelle. Dans le CHAPITRE 4, nous explicitons l'implémentation du système proposé et détaillons les algorithmes élaborés pour assurer l'échange des données. Le CHAPITRE 5, décrit les tests effectués à la fois au laboratoire de métrologie et en usine pour évaluer la convivialité du système ainsi que les résultats obtenus et donne une discussion sur ces résultats.

Finalement, une conclusion rassemblant les points clés de cette étude, nos contributions majeures ainsi que des suggestions et des recommandations pour des recherches ultérieures sont exposées.

# CHAPITRE 1

## PROBLÉMATIQUE INDUSTRIELLE

### 1.1 Mise en contexte

Le partenaire industriel du projet (PI) est une entreprise spécialisée dans la fabrication des bâtiments modulaires pour différents secteurs d'activité tels que l'hôtellerie, la santé et l'immobilier qui cherche à améliorer sa productivité et son niveau de contrôle de la qualité. Sur ce dernier point, l'augmentation de la hauteur des bâtiments modulaires implique impérativement l'utilisation de cales d'ajustement entre les étages. Les épaisseurs de ces cales doivent être estimées précisément pour chaque module. Par conséquent, l'identification de l'état géométrique et dimensionnel (ex. les dimensions hors-tout, l'erreur d'équerrage, le parallélisme entre le plafond et le plancher, etc.) de chaque module devient une opération incontournable. Aujourd'hui, cette captation est réalisée après l'assemblage des modules. Si nécessaires, les opérations d'ajustement et de correction sont réalisées *a posteriori* impliquant des carences de productivité.

Des visites à l'usine et des visioconférences ont permis de cerner la problématique spécifique du présent projet et d'en identifier les objectifs. Dans cette section nous allons décrire le processus de fabrication des modules et de contrôle qualité tel qu'il est réalisé actuellement chez le PI. Ensuite, nous élaborons la problématique et identifions l'objectif global du projet.

### 1.2 Organisation de l'usine et processus de fabrication

Les modules sont construits en usine avec la finition intérieure quasi complète (telle qu'exigée par le client) incluant la plomberie, l'électricité, l'isolation et même le mobilier. Ils sont ensuite transportés sur le site pour être empilés correctement. La structure des modules peut être constituée entièrement de bois, d'acier ou hybride, en fonction des besoins des clients et de la hauteur finale du bâtiment.

L'usine est divisée en plusieurs stations auxquelles sont attribuées des tâches spécifiques. Le plancher est fabriqué sur les stations S1 et S2 au rez-de-chaussée de l'usine (niveau  $N$ ), il est ensuite déplacé de station en station sur des rails. Les murs et le plafond sont construits de manière indépendante au niveau  $N + 1$  et ramenés à l'aide d'un pont roulant au niveau  $N$ . Les murs et le plafond sont fixés au plancher sur les stations d'assemblage S3 et S4 respectivement. Il existe également un niveau  $N - 1$  qui permet de fixer des éléments de plomberie et des gaines électriques dans le plancher du module. La Figure 1.1 représente schématiquement la chaîne de fabrication de la structure d'un module chez le PI.

Notre projet ne vise que l'assemblage des six côtés d'un module, c'est-à-dire, le plancher, les quatre murs et le plafond. Cette étape est considérée comme la plus critique pour l'assemblage ultérieur sur site du bâtiment, particulièrement pour les bâtiments de plusieurs étages (intervalles de tolérances plus serrés). En effet, les défauts de qualité (ex. perpendicularité des murs par rapport au plancher, parallélisme du plafond par rapport au plancher, dimensions hors-tout, positions des ouvertures, etc.) non détectés à cette étape engendrent inéluctablement un cumul des erreurs au fur et à mesure que les étages s'ajoutent. Ces défauts sont coûteux à corriger sur site.

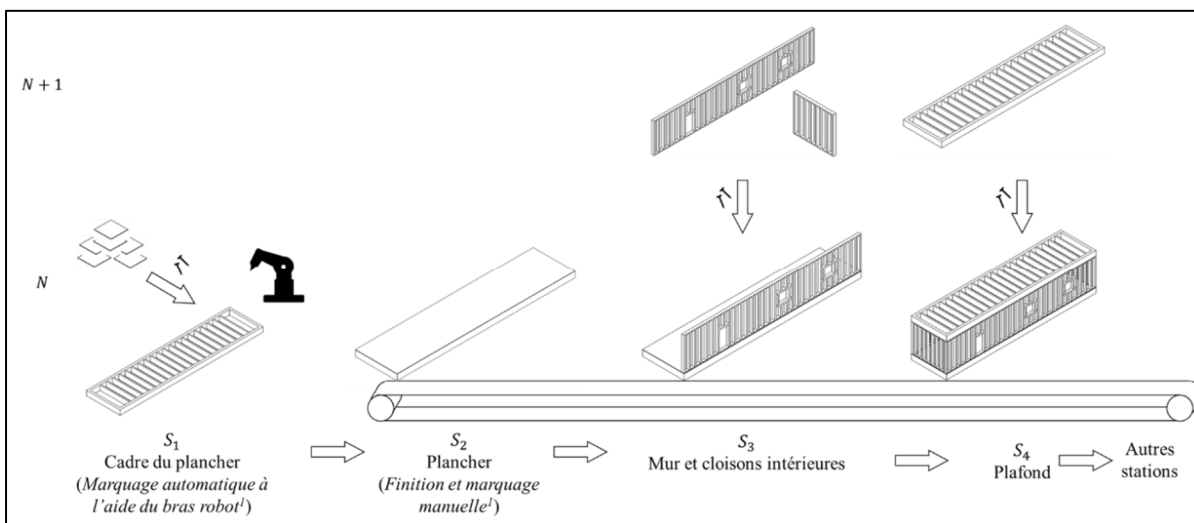


Figure 1.1 Chaîne de fabrication de la structure d'un module chez le PI  
Tirée de Cognet (2020)

### 1.3 Contrôle de la qualité dimensionnelle et géométrique des modules

Avant le transport du plancher et du plafond à la station de l'assemblage, une vérification de la qualité dimensionnelle et géométrique de ces composants est effectuée.

L'inspection est réalisée par un équipement d'arpentage *Total®* de *Leica®*. Les caractéristiques clés contrôlées sont essentiellement l'équerrage et les dimensions linéaires des côtés.

À la station d'assemblage, les opérateurs commencent par positionner et fixer les murs intérieurs et extérieurs avec le plancher. Les positions des murs sur le plancher sont déterminées par des mesures manuelles. Ensuite, des supports muraux ajustables sont installés (voir Figure 1.2). Les opérateurs vérifient la perpendicularité des murs par rapport au plancher à l'aide d'équerres, de niveaux à bulle et de rubans à mesurer. Si la mesure de la perpendicularité n'est pas dans les tolérances, des ajustements des supports muraux permettent de modifier l'assemblage. Ce processus continu jusqu'à ce que les mesures soient dans les tolérances.



Figure 1.2 Supports muraux ajustables utilisés pour l'assemblage des murs

Le plafond est le dernier composant assemblé à la structure. La géométrie de l'assemblage final est contrôlée visuellement et par un système conçu par les opérateurs sur la station d'assemblage : deux poutres de bois de 1 ½" d'épaisseur sont fixés aux deux coins en haut du mur (voir Figure 1.3(b)). Les deux morceaux sont ensuite liés par un fil. Une tige de même épaisseur (1 ½") est translaturée entre le mur et le fil tout au long du mur pour vérifier que les murs sont bien droits (voir Figure 1.3(a)).

La position des ouvertures est vérifiée à l'étape où les installations intérieures sont ajoutées. Pour contrôler la position d'une ouverture, l'inspecteur réalise des mesures en utilisant un ruban à mesurer. Les mesures sont ensuite comparées aux spécifications détaillées dans le schéma de définition 2D créé par le dessinateur à l'aide du logiciel *AutoCAD*. L'inspecteur marque sur le dessin 2D les dimensions inspectées en vert (si les mesures sont dans les limites de tolérances) ou en rouge (si les mesures sont hors les limites de tolérances). Le document est ensuite sauvegardé dans le dossier du projet partagé en ligne avec le reste de l'équipe.



Figure 1.3 Système de contrôle du parallélisme de deux côtés opposés des modules

Le Tableau 1.1 présente la liste des requis fonctionnels contrôlés lors des opérations d'assemblage.



Tableau 1.1 Liste des requis fonctionnels des modules chez le PI

Étape d'assemblage	Caractéristiques clés contrôlées	Tolérance permise
Fabrication du plancher	Longueur Équerrage	$\pm 1/8$ "
Fabrication du plafond	Longueur Équerrage	$\pm 1/8$ "
Fabrication des murs	ND	ND
Assemblage des murs avec le plancher	Perpendicularité	$\pm 0,05$ degré
Assemblage du plafond	Parallélisme	ND
Installation intérieure	Position des ouvertures	$\pm 1/2$ "

#### 1.4 Problématique

En nous appuyant sur les observations détaillées dans la section précédente, nous pouvons identifier plusieurs opportunités d'amélioration.

- L'inspection de l'assemblage et le contrôle dimensionnel sont des opérations réalisées *a posteriori*. Si des non-conformités se produisent, des opérations de retouche et d'ajustement sont nécessaires. Cela peut causer des carences de productivités.
- À l'étape de l'assemblage, les opérateurs utilisent des mesures manuelles pour vérifier certaines caractéristiques clés. Cette méthode induit des erreurs humaines (lecture de la mesurée, calcul des dimensions à la main, etc.) et une difficulté à quantifier l'erreur de mesure produite.
- La station *Total*® permet de valider l'équerrage du plancher et du plafond. Cependant, il n'existe aucun moyen pour valider la qualité des modules après l'assemblage, ce qui n'assure pas la traçabilité de qualité telle qu'exigée par plusieurs clients.
- Pour vérifier les spécifications dimensionnelles, il faut consulter plusieurs dessins du projet. Avec la migration de l'entreprise vers un logiciel de conception assistée par ordinateur (*Revit*) et l'existence d'une maquette numérique, une solution métrologique qui tire avantage des données 3D représentant les données nominales serait plus pertinente.

## 1.5 Objectif global du projet

L'objectif de ce projet est de réaliser une *preuve de concept* d'un système de mesure pour assister les opérateurs pendant l'étape de positionnement et d'ajustement des pièces lors de l'assemblage des modules, soit le plancher, les murs extérieurs et le plafond. Également, la solution doit permettre d'assurer le contrôle géométrique et dimensionnel lors de l'opération de l'assemblage et garantir ainsi les impératifs de la traçabilité d'un système qualité.

## 1.6 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons décrit les procédures d'assemblage et d'inspection tels qu'elles sont réalisées aujourd'hui chez le PI. Cela nous a permis de mettre en évidence la problématique industrielle ainsi que l'objectif global du projet. Dans le prochain chapitre, nous effectuerons une étude de la littérature afin d'identifier les différentes approches relatives à l'automatisation du contrôle de la qualité en construction hors site. Ensuite nous explorons les pratiques et les technologies existantes dans le domaine de l'assemblage assisté par la métrologie 3D, ainsi que de la réalité augmentée (RA).

## CHAPITRE 2

### REVUE DE LA LITTÉRATURE

Pour atteindre l'objectif défini dans le chapitre précédent, un examen des travaux relatifs à l'automatisation du contrôle qualité dans le domaine de la construction hors site est de mise. Également, nous examinons d'une manière plus détaillée la thématique de l'assemblage assisté par métrologie et la métrologie à grande échelle. Enfin, nous explorons les principes de fonctionnement de la réalité augmentée (RA) et ses applications dans les domaines de l'assemblage et de l'inspection.

#### 2.1 Contrôle de qualité dans la construction hors site

La construction hors site consiste à fabriquer et à pré-assembler des composants, des modules ou des éléments de construction en quantités déterminées avant de les expédier et de les installer sur le site de construction. Ce terme générique englobe diverses approches telles que la préfabrication, la fabrication de panneaux et la modularisation (Qi *et al.*, 2021)

Dans cette section, nous allons examiner les différentes méthodes de contrôle de la qualité utilisées dans *la construction hors site*, puisque toutes les techniques regroupées sous ce concept, incluant la construction modulaire, partagent la caractéristique commune de fabriquer et d'assembler des éléments de bâtiment dans des conditions contrôlées avant de les transporter sur le site de construction.

L'avènement de la métrologie 3D sans contact *in situ* procure des mesures précises et pratiquement en temps réel. Aussi, l'intégration de la modélisation des données du bâtiment (BIM) fournit une représentation numérique en 3D des bâtiments tels qu'ils ont été conçus. Ces deux avancées technologiques conjuguées ensemble offrent des opportunités pour automatiser le processus de contrôle qualité dans la construction hors site.

De récentes recherches ont porté sur l'automatisation du contrôle qualité dans l'industrie de la construction hors site. Par exemple (Bae et Han, 2021) ont proposé une approche basée sur la vision pour le contrôle de la qualité hors site qui reconstruit des nuages de points 3D à l'aide

d'un système de caméras. Après le recalage du nuage de points, l'écart entre les numérisations et le modèle virtuel est calculé pour générer des cartes des erreurs et évaluer ainsi la conformité. (Kim *et al.*, 2019) ont également proposé une approche de balayage laser pour inspecter les exigences dimensionnelles et géométriques des éléments préfabriqués de type plan. La méthode proposée utilise un miroir afin d'éliminer l'étape du relage des nuages de points.

(Xu, Kang et Lu, 2020) ont utilisé la technologie de reconstruction par balayage laser pour inspecter les défauts de surface des éléments préfabriqués en béton. Les informations collectées au cours du contrôle sont ensuite sauvegardées à l'aide de la norme *Industry Foundation Classes* (IFC) et intégrées dans une plateforme BIM.

Dans une autre perspective, (Rausch *et al.*, 2023) ont comparé différentes manières selon lesquelles le jumeau numérique peut être déployé pour maintenir et gérer la qualité des ouvrages construits dans la construction hors site.

## **2.2 Principes de base de l'Assemblage Assistée par la Mesure (AAM)**

Dans l'industrie, les progrès des systèmes de mesure 3D ont permis d'intégrer l'inspection directement dans le processus d'assemblage, ce qu'on désigne par l'assemblage assisté par la mesure (AAM).

Le concept est introduit à l'origine comme un changement de paradigme dans l'assemblage de structures complexes, à grande échelle et de haute qualité, comme les structures d'aéronefs.

L'assemblage des structures aéronautiques inclut de grands composants qui doivent être assemblés en respectant les exigences de qualité. La méthode classique consiste à maintenir les composants en place au moyen d'un gabarit dédié à cette tâche, les écarts sont mesurés dans une structure préassemblée à l'aide de jauges d'épaisseur, d'indicateur à cadran ou autres équipements de mesure. Si nécessaire, des cales d'ajustement sont ajoutées et la structure est réassemblée avec les cales en place. Ce processus peut nécessiter un certain nombre d'itérations avant que tous les écarts ne soient conformes aux tolérances. Des alésages (trous) sont ensuite percés à travers les composants et ceux-ci sont fixés ensemble. Il est ensuite nécessaire de séparer l'assemblage pour ébavurer les trous, nettoyer et appliquer un produit d'étanchéité avant l'assemblage final.

Ces approches conventionnelles sont considérées comme robustes (à cause de l'usage de gabarit), mais coûteuses. Elles entraînent des délais considérables dans l'exécution des tâches. De plus, la qualité de l'assemblage est étroitement liée à la qualité des gabarits, qui sont très peu flexibles et coûteux. La Figure 2.1 illustre l'approche traditionnelle et la technologie d'assemblage par la mesure pour l'assemblage des structures aéronautiques.

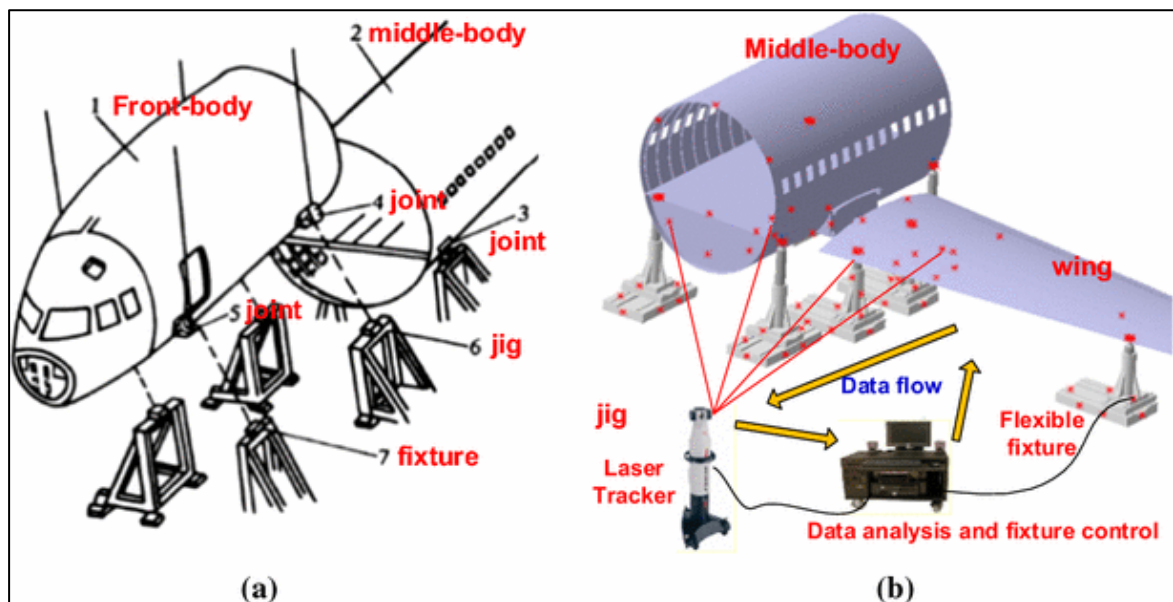


Figure 2.1 L'approche traditionnelle (a) et la technologie d'assemblage assistée par la mesure (b) pour l'assemblage à grande échelle

Tirée de Zhehan et al. (2015)

L'AAM propose un ensemble intégré de procédures et de techniques qui permettent l'assemblage pièce sur pièce (*part-to-part*) de structures aéronautiques complexes (mais pas uniquement) à coût réduit. (Maropoulos *et al.*, 2014) présentent quatre méthodes utilisées dans un processus d'AAM typique :

#### 1) Les procédés prédictifs (*Predictive processes*)

Les procédés prédictifs impliquent que les opérations d'ébarbage, calage et perçage soient réalisées avant l'assemblage. Les mesures des composants sont utilisées pour former de

manière adaptative les interfaces des composants afin qu'ils s'adaptent les uns aux autres avant de les assembler physiquement.

Par exemple, au lieu de déterminer les écarts à l'aide de jauges d'épaisseur, le profil de la surface est caractérisé à l'aide de la technologie de balayage en 3D. Cette approche élimine le besoin de réaliser un préassemblage. Pour le placement des trous l'assemblage déterminé assisté par des mesures (MADA) a été proposée comme une approche prédictive potentielle (Muelaner et Maropoulos, 2010). Dans cette approche, les trous sont d'abord placés dans de grands composants avec des tolérances exigeantes (<1 mm). Les positions des trous d'un composant sont ensuite mesurées et les trous de l'autre composant sont placés avec précision pour assurer une parfaite correspondance. Les processus prédictifs permettent donc de gérer l'interface avant l'assemblage, ce qui permet un processus d'assemblage rapide à *sens unique* appelé aussi assemblage pièce à pièce (Muelaner *et al.*, 2011).

## 2) Processus de suivi et de positionnement (*Assemble-Measure-Move processes*)

Ce processus consiste à placer un composant dans un assemblage approximativement, sa position est évaluée par la suite par une mesure, puis sa position est ajustée pour atteindre sa position finale. Cette séquence peut être répétée plusieurs fois jusqu'à ce que l'élément se trouve précisément à sa destination prévue. Des mesures en temps réel doivent donc être employées pour suivre le déplacement de l'élément jusqu'à son emplacement final. Cette technique est intéressante, car elle élimine le besoin d'utiliser les gabarits précis utilisés traditionnellement pour fixer les composants.

## 3) Outillages flexibles (*Active tooling*)

L'outillage flexible est une forme d'outillage d'assemblage qui utilise des capteurs de composants actionnés pour s'adapter au retour d'information provenant de sources telles que la mesure dimensionnelle de l'outillage. L'application de l'outillage actif peut permettre de résoudre les problèmes d'inflexibilité liés à l'utilisation des gabarits monolithiques typiquement utilisés dans les opérations d'assemblage, mais cela dépendra de la capacité à mesurer précisément et directement les caractéristiques clés de l'outillage ou même de la structure en cours d'assemblage (Muelaner *et al.*, 2011).

#### 4) Contrôle en boucle fermé (*Closed-loop control*)

Ce processus est utilisé pour améliorer la précision des systèmes d'automatisation flexibles tel que les robots industriels. Tous les systèmes d'automatisation de haute précision utilisent une forme d'un contrôle en boucle fermée à l'aide d'encodeurs situés sur l'axe de mouvement.

(Drouot *et al.*, 2018) présentent une application du concept d'assemblage assisté par des mesures. Le système proposé est constitué d'une seule cellule d'assemblage reconfigurable capable d'assembler automatiquement une large gamme de produits aérospatiaux. Le système proposé est équipé de trois (3) robots industriels *KUKA*, chacun pouvant être utilisé comme dispositif de fixation adaptatif. Deux robots ont une fonction supplémentaire qui est de réaliser les processus de perçage et de rivetage des composants pour compléter l'assemblage. Les robots permettent d'obtenir une précision de positionnement de l'ordre de  $\pm 0,1$  mm. Un système de mesure par photogrammétrie de haute précision permet de rectifier automatiquement la position des robots et un radar laser est utilisé pour surveiller l'assemblage durant sa construction.

### 2.3 Métrologie grande échelle

Le changement de paradigme introduit par l'AAM est motivé par les progrès et l'accessibilité croissante des systèmes de métrologie 3D à grande échelle qui ont permis d'apporter la mesure au sein du processus de fabrication (*in situ*) d'une manière précise et économique. Cela est particulièrement bénéfique, car les structures à grande échelle sont souvent trop grandes pour l'usage des appareils de mesure conventionnels (robot de mesure, AMT/CMM) ou pour être transportées vers des laboratoires de métrologie (Schmitt *et al.*, 2016).

(Franceschini *et al.*, 2014) présentent un cadre général pour l'analyse et la classification des systèmes de métrologie à grande échelle. Cette classification se base sur différentes perspectives d'analyse (ex. principes de fonctionnement, domaine d'application, contraintes d'utilisation, etc.). L'une des classifications proposées repose sur la manière dont les

composants du système sont organisés. Deux catégories peuvent ainsi être définies : les systèmes centralisés et les systèmes distribués :

*Systèmes centralisés* : un système centralisé est une unité autonome qui peut fonctionner indépendamment pour fournir la mesure d'une coordonnée spatiale sur la surface d'intérêt d'un objet (ex. un laser tracker). Dans certains cas, plusieurs systèmes centralisés peuvent être déployés et exploités simultanément pour améliorer la précision et l'étendue des mesures.

*Systèmes distribués* : un système distribué consiste en une série de stations de mesure qui travaillent en coopération pour collecter des informations permettant de déterminer les coordonnées d'un point. En général, les stations individuelles ne peuvent pas mesurer les coordonnées séparément. Les stations individuelles peuvent être des dispositifs identiques ou différents types de dispositifs (dispositifs Ultra Son, dispositifs Infrarouge, caméras, etc.), répartis dans le volume de mesure (Peggs *et al.*, 2009).

Grâce à leur caractère portable, les systèmes centralisés peuvent être adaptés à certains contextes tels que la construction navale (Maisano *et al.*, 2023). En ce qui concerne les systèmes de métrologie distribués, ils offrent une souplesse et une modularité permettant de s'adapter aisément à des volumes de travail étendus, en ajoutant de manière opportune une ou plusieurs stations de mesure (Franceschini *et al.*, 2011).

## **2.4 Technologies de métrologie 3D**

### **2.4.1 Laser de poursuite (Laser tracker)**

Les lasers de poursuite sont des systèmes centralisés de mesure des coordonnées qui mesurent la position tridimensionnelle d'une cible coopérative telle qu'un rétro réflecteur à montage sphérique (SMR). L'instrument enregistre la distance à la cible ainsi que deux angles, fournissant des données de position dans un système de coordonnées sphériques (Muralikrishnan, Phillips et Sawyer, 2016). Il existe deux types de systèmes utilisés pour les mesures de haute précision : l'interféromètre à comptage de franges (IFM) et le système de mesure absolue de la distance (ADM). L'IFM est caractérisé par sa grande précision, alors que



le système ADM permet une mesure plus rapide de la cible. De plus, les ADM offrent la possibilité de réinitialiser le système de mesure sans avoir à remettre le rétro réflecteur en position de référence.

### 2.4.2 Photogrammétrie

La photogrammétrie est une technique de mesure des coordonnées tridimensionnelles qui utilise des photographies (chacune en 2D) comme support fondamental pour la métrologie ou la mesure. Le principe fondamental de la photogrammétrie est la triangulation. En prenant des photos à partir d'au moins deux endroits différents, il est possible d'identifier ce qu'on désigne comme des "lignes de vues" à partir de chaque appareil photo vers des points de l'objet. La position de l'appareil photo et les angles des lignes de vues étant connus, il est possible de calculer les coordonnées tridimensionnelles des points d'intérêt (Horswell, 2013).

Les systèmes de photogrammétrie peuvent être des systèmes *hors ligne* ou *en ligne* selon si les résultats de mesure sont obtenus immédiatement ou nécessitent un traitement postérieur à l'acquisition de mesure (Boesemann, 2003).

Les nouvelles générations d'appareils photo numériques ont favorisé la capacité de fournir des résultats de mesure 3D sur plusieurs points immédiatement après la prise de mesure d'où *la photogrammétrie en ligne*. En outre, si la fréquence de la mesure correspond à la fréquence de changement ou de mouvement de la pièce (typiquement  $>20$  Hz), ces systèmes sont considérés comme des systèmes en *temps réel*. Cette évolution a largement favorisé l'adoption de la photogrammétrie comme outils d'inspection en milieu industriel.

Les systèmes de photogrammétrie industrielle sont souvent utilisés avec des cibles rétro réfléchissantes qui permettent d'avoir des images quasi binaires qui donnent une bonne séparation de la cible et de l'arrière-plan. Cela permet d'obtenir une rapidité de calcul lors de l'opération de recalage (corrélation d'images) entre les images et d'avoir une précision supérieure d'au moins un ordre de grandeur à celle obtenue par l'utilisation de caractéristiques naturelles des objets tels que les arêtes ou les coins (Peggs *et al.*, 2009).

Le principal inconvénient pratique de l'utilisation de cibles est la nécessité de les appliquer à la surface de l'objet. En outre, si l'emplacement physique de la cible est commun à un emplacement tridimensionnel dans le modèle CAO, la cible doit être placée sur ce point ou à un décalage physique prédéfini et connu de ce point.

### **2.4.3 iGPS (indoor Global Positioning System)**

Le iGPS se compose généralement de trois parties : les émetteurs, les capteurs (avec ou sans fil, récepteur) et leur système de contrôle. Les émetteurs sont situés à différentes positions spatiales et génèrent trois signaux optiques : un signal d'impulsion et deux signaux de plan laser en forme d'éventail, les capteurs sont placés là où se trouvent les points cibles et reçoivent les signaux optiques émis par les émetteurs, puis les convertissent en signaux électriques, qui sont finalement envoyés par des moyens filaires ou sans fil au système de contrôle. Le système de contrôle utilise une minuterie pour convertir les signaux électriques en données temporelles multiples et calcule ensuite la position spatiale des points cibles sur la base des données temporelles, des vitesses de rotation et des fréquences des différents émetteurs (Chen et Du, 2017).

Les émetteurs utilisent un laser infrarouge pour déterminer les angles relatifs entre les émetteurs et les sondes-capteurs. Ces derniers possèdent des photodiodes à l'intérieur de leurs modules qui peuvent détecter les signaux transmis. Sur la base de l'emplacement connu des émetteurs, qui est normalement obtenu lors d'une phase initiale d'étalonnage du réseau, la position des capteurs peut être calculée ultérieurement.

### **2.4.4 Le système mobile de mesure des coordonnées spatiales (MScMS)**

Le système mobile de mesure des coordonnées spatiales (MScMS) a été conçu pour effectuer des mesures dimensionnelles d'objets de taille moyenne à grande (de 30 m jusqu'à 60 m). (Franceschini *et al.*, 2009). Il se compose de trois éléments clés : (a) une constellation de dispositifs sans fil disposés autour de la zone de travail, (b) une sonde de mesure qui interagit avec les dispositifs sans fils pour obtenir les coordonnées des points touchés sur l'objet à mesurer et, (c) un système informatique qui reçoit les données de la sonde de mesure (par

Bluetooth) et qui effectue les analyses pour évaluer les propriétés géométriques de l'objet en question. La sonde de mesure et les dispositifs de la constellation placés autour de la zone de travail sont équipés d'un dispositif appelé *Cricket*. Tous les *Cricket*s sont équipés d'émetteurs-récepteurs radio fréquence RF et ultrason US qui transmettent des signaux. La technique mise en œuvre par chaque paire de *Cricket* pour estimer la distance mutuelle est connue sous le nom de différence de temps d'arrivée (TDoA).

(Maisano *et al.*, 2009) ont réalisé une comparaison entre l'iGPS et le MScMS motivé par la similitude en termes d'architecture et le mode de fonctionnement entre les deux systèmes. L'étude a montré que les performances métrologiques de l'iGPS sont supérieures à celles du MScMS. Toutefois, le coût global élevé de l'iGPS (15 fois plus chère que le MScMS) rend le MScMS beaucoup plus intéressant pour les applications qui ne nécessitent pas un niveau de précision élevé.

#### **2.4.5 Les scanners / numériseurs**

(Peggs *et al.*, 2009) regroupent tous les instruments optiques qui permettent d'effectuer des mesures sans cibles coopératives sous la catégorie des scanners optiques. Le type de mesure de la distance peut varier d'un appareil à l'autre, il peut être basé sur la mesure du temps de vol, la technologie de déphasage ou les méthodes de triangulation. Les systèmes peuvent effectuer des mesures unidimensionnelles, bidimensionnelles ou tridimensionnelles.

Les avantages évidents de ces technologies sont la densité et la rapidité de collecte des données. Cependant, elles ne garantissent pas le même niveau de précision que d'autres systèmes tels que les lasers trackers, les iGPS, etc. En outre, leur application est limitée à des volumes plus petits et à des surfaces dont les dimensions linéaires sont de l'ordre de quelques mètres (Franceschini *et al.*, 2014).

Ces systèmes sont très utilisés pour la rétro-ingénierie ou pour l'arpentage des chantiers de construction où une densité de données élevée est nécessaire et les niveaux d'incertitude de l'ordre du millimètre sont acceptables (Peggs *et al.*, 2009).

### 2.4.6 Combinaison de plusieurs technologies

Les technologies présentées précédemment ont toutes leurs points faibles et points forts. La Figure 2.2 présente l'ordre de grandeur de la précision et la portée de ces technologies.

Les assemblages à grandes échelles surtout dans l'industrie aéronautique nécessitent des exigences différentes qui sont difficiles à satisfaire avec une seule technologie. Ainsi plusieurs systèmes métrologiques qui combinent plusieurs instruments (ou technologies) sont proposés. (Chen & Du, 2017) ont proposé un réseau de mesure construit par un iGPS et un scanner portable. Le réseau proposé est constitué d'un champ de mesure global basé sur l'iGPS qui permet de créer une unité de mesure autour l'assemblage et un champ de mesure local basé sur un scanner portable.

Le scanner portable permet d'acquérir le nuage de points nécessaire pour obtenir la géométrie de surface d'un objet. De son côté, l'iGPS compense les limites de portée du scanner portable en étendant le champ de mesure. Un robot est utilisé pour localiser le scanner portable dans le système de coordonnées global créé par l'iGPS.

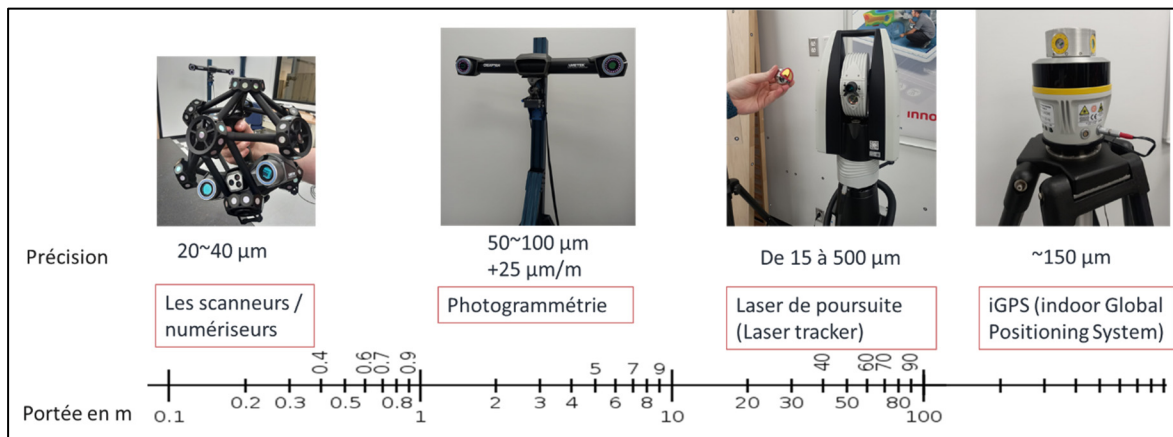


Figure 2.2 Ordre de grandeur de la précision et la portée de quelques technologies de mesure 3D

D'une manière similaire, (Wang *et al.*, 2022) proposent une méthode de mesure de l'écart d'assemblage entre le fuselage et l'aile d'avion en temps réel. Cette méthode combine

l'utilisation d'un scanner 3D, de la photogrammétrie industrielle à courte portée et de lasers de poursuite pour obtenir des mesures précises de l'écart d'assemblage global.

Le scanner portable est employé pour caractériser les surfaces, le laser de poursuite assure le suivi de la position spatiale de la structure, et le système de photogrammétrie permet l'alignement des données de mesure dans le système de coordonnées global.

L'un des défis rencontrés lors de la combinaison de plusieurs capteurs est l'approche à adopter pour la fusion des données. Il existe deux méthodes de fusion de données : la méthode compétitive et la méthode coopérative.

Dans une *fusion compétitive*, chaque système permet d'obtenir une mesure indépendante des coordonnées 3D du point d'intérêt, les mesures résultantes sont ensuite fusionnées entre elles en effectuant une moyenne pondérée en tenant compte de l'incertitude associée à chaque mesure.

Dans la *fusion coopérative*, les données fournies par deux ou plusieurs capteurs indépendants sont traitées afin d'obtenir des informations qui ne peuvent pas être obtenues par des capteurs individuels. Selon cette logique, les différents capteurs partagent leurs mesures locales et coopèrent pour déterminer une mesure unique de la position du point d'intérêt. Par exemple, les données de (i) deux capteurs d'un système effectuant des mesures angulaires et (ii) un capteur d'un autre système effectuant des mesures de distance, ces deux sources peuvent être combinées pour déterminer les coordonnées 3D du point d'intérêt (Franceschini *et al.*, 2015).

Le principal avantage de l'approche coopérative par rapport à l'approche compétitive réside dans le fait qu'elle devient la seule option viable lorsque les capteurs individuels ne sont pas en mesure d'effectuer des mesures de position du point d'intérêt de manière autonome. Cependant, en comparaison avec l'approche compétitive de fusion de données, l'approche coopérative est plus complexe à mettre en place, car elle nécessite que les différents systèmes de mesure puissent fournir des données intermédiaires, telles que les mesures de distance et d'angle obtenues à partir des capteurs en question (Schmitt *et al.*, 2016).

## 2.5 Réalité augmentée (RA)

Dans cette section, nous abordons la thématique de la réalité augmentée (RA). Pour commencer, nous fournirons les définitions de la RA, de la réalité virtuelle (RV) et de la réalité mixte (RM). Ensuite, nous examinerons de près la structure d'un système de RA. Enfin, nous citons les applications de la RA trouvées dans la littérature, dans les domaines de l'assemblage et de l'inspection.

### 2.5.1 Définitions

Avant d'explorer les travaux existants sur les applications de RA dans le contexte industriel, il est important de distinguer les concepts de la réalité virtuelle, de la réalité mixte et de la réalité augmentée puisque ces concepts peuvent être confondus.

**La réalité virtuelle (RV)** permet de présenter à l'utilisateur un monde imaginaire en générant un contenu numérique par une simulation sensorielle artificielle. L'utilisateur est complètement isolé du monde réel et il est amené à interagir avec le contenu numérique en manipulant les objets et en faisant l'expérience des effets visuels et sonores générés par ordinateur (Park, Bokijonov et Choi, 2021).

**La réalité augmentée (RA)** permet de fusionner des informations générées par ordinateur avec nos sensations du monde réel à l'aide d'un dispositif (par exemple, écran monté sur la tête, un projecteur, une tablette, etc.). Ce dispositif permet à l'utilisateur de visualiser à la fois les informations générées et l'environnement réel (Barfield et Caudell, 2001).

**La réalité mixte (RM)** permet, comme la réalité augmentée, de superposer une couche d'information numérique sur le réel, mais, dans ce cas, le virtuel est ancré sur le réel. En d'autres termes, le réel et le virtuel peuvent interagir. Appelée parfois réalité hybride, la RM combine les deux points forts de la RV et RA (Peddie, 2017). Elle permet à l'utilisateur d'être présent

dans le monde réel et d'interagir avec les objets virtuels, offrant ainsi une expérience plus immersive.

La RM peut être vue comme une évolution du concept de la RA. Elle a été rendue accessible grâce aux avancées technologiques des capteurs et des techniques d'imagerie. Dans de nombreux travaux de la littérature, les termes de réalité augmentée (RA) et de réalité mixte (RM) sont confondus, et le terme prédominant est celui de RA. Par conséquent, dans les sections suivantes, la terminologie RA sera utilisée de manière générique pour englober également les applications et les technologies de réalité mixte.

### 2.5.2 Composition d'un système de RA

Les composantes clés nécessaires au développement d'un système de RA incluent les écrans, les systèmes de suivi de position, les ordinateurs et les logiciels graphiques. La Figure 2.3 donne une représentation globale des différentes composantes technologiques qui forment un système de RA.

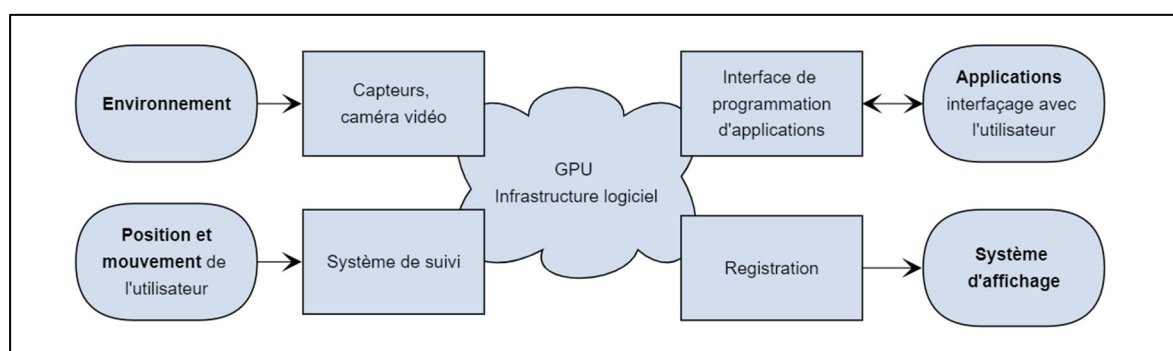


Figure 2.3 Vue globale du fonctionnement d'un système de RA, Adaptée de Van Krevelen et Poelman (2010)

(Van Krevelen et Poelman, 2010) proposent une définition complète d'un système de RA et les caractéristiques des technologies permettant sa mise en œuvre. Une étude plus récente de l'état de l'art des technologies et défis associés à l'implémentation d'un système de RA est donnée par (Syed *et al.*, 2023).

Dans cette section, nous nous intéressons seulement à deux composantes de système de RA : (1) le système de suivi et, (2) le système d'affichage. Le système de suivi est une composante critique, elle assure un recalage correct du virtuel sur le réel. En outre, les systèmes d'affichage permettent de projeter l'information virtuelle dans l'environnement réel. Par conséquent, une description plus approfondie de ces deux composantes permettra une meilleure compréhension du fonctionnement d'un système de RA, en mettant en évidence certaines limitations technologiques et les alternatives possibles en termes de configurations spatiales.

### 2.5.2.1 Systèmes d'affichages en RA

Les systèmes d'affichage en RA peuvent être classés en trois catégories selon leur position par rapport à l'utilisateur et l'environnement réel (Bimber et Raskar, 2006) : écrans attachés à la tête, portés par les mains ou distribués dans l'espace (voir Figure 2.4 ).

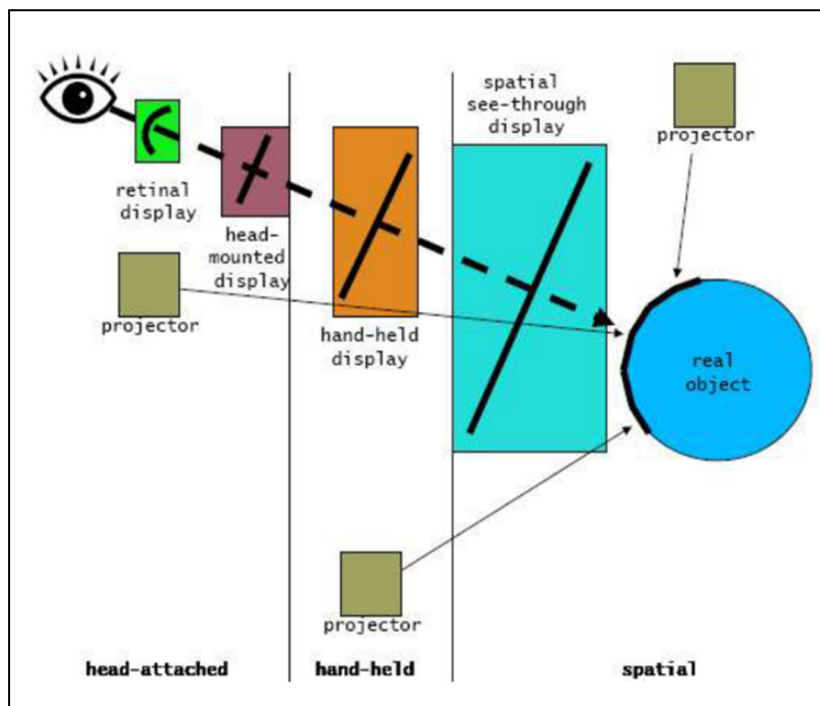


Figure 2.4 Classification des écrans de la RA en fonction de leur position entre l'observateur et l'environnement réel  
Tirée de Bimber & Raskar (2006)



Écrans attachés à la tête : La RA basée sur des écrans portés sur la tête peut être classée et mise en œuvre de différentes manières en fonction de sa taille et de son emplacement, par exemple les lentilles de contact, les casques et les lunettes. (Danielsson, Magnus, & Syberfeldt, 2020) englobent toutes les formes de systèmes RA portés sur la tête sous la catégorie des lunettes intelligentes de réalité augmentée : *Augmented Reality Smart Glasses* (ARSG), ils examinent l'état actuel et les défis associés à cette catégorie de système de RA dans le contexte d'applications industrielles. L'étude conclut que bien que les ARSG aient atteint une maturité technologique élevée, il existe encore des limitations dans les composants individuels surtout en ce qui concerne l'adaptation industrielle. L'auteur identifie trois défis majeurs pour cette catégorie de système de RA : (1) l'amélioration de la durée de vie des batteries, (2) la réduction des prix, (3) les contraintes ergonomiques.

Écrans portés par les mains : Ces systèmes englobent essentiellement les applications sur Tablet PC et les téléphones intelligents. Les principaux avantages de ces systèmes sont leur faible coût et leur facilité d'utilisation. Cependant, ils peuvent limiter l'efficacité de l'utilisateur en l'obligeant à le porter au moins par une main.

Écrans installés dans l'environnement : Les écrans spatiaux détachent la plupart des technologies de l'utilisateur et les intègrent dans l'environnement. Exemple : les systèmes basés sur les projecteurs. Avec une solution spatiale, l'utilisateur n'a pas besoin de porter d'équipement, mais elle limite la conception du poste de travail en exigeant que l'équipement soit installé dans l'environnement.

### **2.5.2.2 Système de suivi**

Le système de suivi est une composante critique dans un système de RA puisqu'il est chargé de calculer la position réelle de l'utilisateur, ce qui permet au GPU d'afficher le contenu numérique ou virtuel au bon endroit. Il existe plusieurs technologies de système de suivi utilisées dans les systèmes de RA. Dans la littérature ces systèmes sont classés en systèmes de

suivi basés sur la vision, systèmes de suivi basés sur des capteurs et systèmes de suivi hybrides (Van Krevelen et Poelman, 2010).

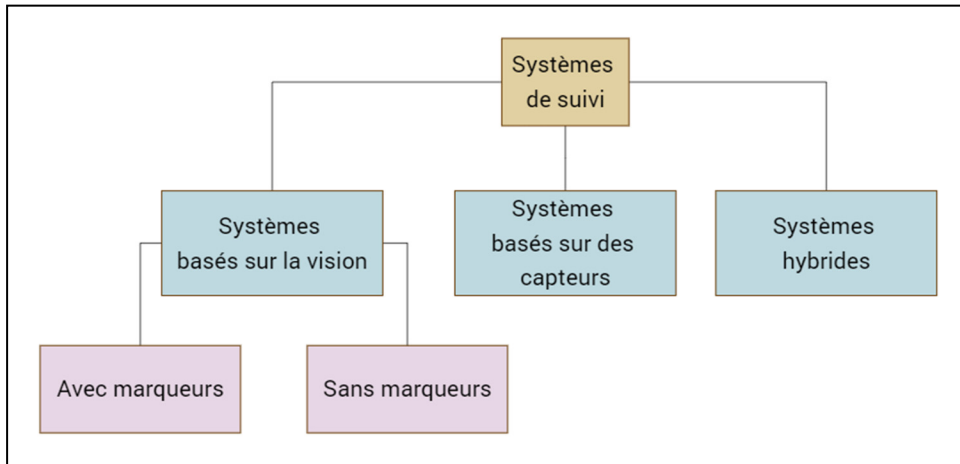


Figure 2.5 Classification des systèmes de suivi d'un système de RA

### 1) Systèmes de suivi basés sur la vision

Les systèmes de suivi basés sur la vision incluent les systèmes avec marqueurs et sans marqueurs.

Les systèmes de suivi avec marqueurs sont capables de détecter un marqueur et calculer sa position. Il devient donc possible d'afficher le contenu numérique correspondant et le superposer sur le marqueur. Ces systèmes sont plus précis que les systèmes sans marqueurs, ce qui permet de réduire la latence et exige moins de performances de la part du système. Toutefois, ces systèmes peuvent être considérés comme des systèmes invasifs et nécessitent du temps pour installer les marqueurs et les calibrer.

Les systèmes de suivi sans marqueurs permettent de détecter des objets ou images par reconnaissance de leurs caractéristiques clés (forme). Cela peut être contraignant puisque la reconnaissance des objets peut être affectée par les conditions d'éclairage, l'angle de vue et les caractéristiques de l'objet.

Le principal avantage de ces systèmes est qu'ils ne nécessitent pas de placer des cibles sur les objets et donc ils ne sont pas invasifs. L'inconvénient de ces systèmes est que des

désalignements peuvent se produire pendant la superposition du contenu virtuel sur l'environnement réel en raison d'une mauvaise correspondance des caractéristiques clés.

## 2) Systèmes de suivi basés sur des capteurs

Les capteurs normalement utilisés pour ces techniques de suivi comprennent des capteurs tels que le GPS, des capteurs à ultrasons, des capteurs optiques, une diode laser infrarouge pulsée et des capteurs inertiels. Presque tous les capteurs de suivi mentionnés précédemment calculent leur position par triangulation. Les techniques mises en œuvre pour les systèmes basés sur des capteurs de RA sont considérées comme rapides et robustes et peuvent être utilisées pour la prédiction du mouvement. Cependant, ces systèmes sont considérés comme étant moins précis que les systèmes basés sur la vision.

## 3) Systèmes de suivi hybrides

Les deux types de systèmes précédemment expliqués peuvent causer des désalignements de la superposition du contenu numérique sur le réel. Afin de créer un système plus robuste, des systèmes basés sur les systèmes de vision (avec marqueurs/sans marqueurs) et des capteurs ont été proposés. Puisqu'il y a des occasions où un système basé sur la vision ne peut pas fournir entièrement les emplacements nécessaires, les capteurs peuvent fournir un soutien supplémentaire pour calculer avec précision les positions nécessaires, ou vice-versa, lorsque les capteurs ne peuvent pas fournir les emplacements eux-mêmes.

### **2.5.3 Applications de la RA dans l'assemblage et l'inspection**

De nombreux travaux ont étudié l'application de la RA dans les tâches d'assemblage (Wang, Ong et Nee, 2016). L'une des applications les plus courantes de la RA aux tâches d'assemblage est le guidage de l'assemblage manuel. Il s'agit de générer des informations numériques ou des entités virtuelles qui permettent de fournir à l'utilisateur des informations pertinentes à l'opération ou au processus en cours, comme quelle pièce choisir, où assembler une pièce particulière et quel outil utiliser. Les entités virtuelles se présentent comme des modèles et

animations 3D, icônes, texte, etc. Elles sont sensibles au contexte réel et peuvent être superposées sur la pièce physique. Cela permet d'éliminer les instructions longues et élimine le besoin de chercher les informations ailleurs, ce qui rend l'information plus facile à comprendre et la tâche plus intuitive. Un exemple d'une telle application est donné par (Chiew et Sung, 2022). L'application développée facilite l'assemblage étape par étape d'un ordinateur portable. À chaque étape, l'opérateur est guidé par des animations de modèles 3D et du texte. Des flèches accompagnent certaines étapes. La progression entre les différentes étapes de l'assemblage est contrôlée par des commandes vocales.

L'efficacité de la RA pour l'aide à l'assemblage manuel a été démontrée par des recherches qui ont comparé les applications de RA avec des supports informatiques (les instructions sont affichées sur un écran) et des manuels papier.

Les résultats de ces études montrent que la RA réduit le nombre d'erreurs d'assemblage, le temps d'identification et de localisation des pièces, et le temps d'assemblage en général. En outre, les tâches de coordination main-œil et la charge mentale peuvent être minimisées (Tang *et al.*, 2003).

La RA trouve également des applications dans les tâches d'assemblage dans le domaine de la construction préfabriquée. (Qin *et al.*, 2021) ont étudié la facilité d'utilisation de différents types d'affichages d'un dispositif de RA montés sur la tête pour les tâches d'assemblage de charpentes en bois. (Ahn, Han et Al-Hussein, 2019) ont proposé un système de RA basé sur la projection pour fournir aux travailleurs un guidage visuel lors de l'assemblage manuel de panneaux. Le système projette les modèles tels qu'ils ont été conçus (le dessin du panneau) dans la station d'assemblage.

En ce qui concerne le processus d'inspection, la RA est employée pour afficher les résultats des mesures, par exemple en superposant une carte couleur représentant les données de mesure sur la pièce réelle, ou pour orienter l'opération de mesure.

(Kwiatk et al. 2019) ont démontré que l'utilisation d'une application mobile de RA en conjonction avec la numérisation 3D lors de l'assemblage et de l'inspection de sections de tuyaux améliorerait la productivité, réduisait la quantité de travail à refaire et améliorerait les compétences spatiales des travailleurs. (Talamas 2017) propose un prototype d'application qui

permet d'automatiser le flux de processus d'inspection lors d'un processus d'assemblage in situ. L'application permet de commander à la fois l'équipement de mesure et le logiciel d'inspection.

En outre, plusieurs compagnies qui commercialisent des solutions métrologiques ont intégré la RA. La compagnie FARO propose le logiciel *FARO Visual Inspect AR* qui permet d'étendre les fonctionnalités de sa solution mobile *Visual Inspect* qui permet de contrôler les processus de production. La solution permet d'importer des données 3D de pièces et d'assemblages et d'autres informations telles que les détails du processus et du flux de travail sur un appareil mobile (FARO, 2022).

La compagnie *8-tree* propose une application RA qui permet de projeter les résultats des mesures justes à côté des caractéristiques qui ont été mesurées. Un article publié en 2013 (Klaas, Chhabra et Böttcher, 2013) présente trois applications de la solution proposée. Les exemples sont basés sur un scanneur à lumière structurée très rapide qui intègre un logiciel d'inspection spécifique. Un test *Gage R&R* a été effectué pour démontrer que les résultats sont répétables et reproductibles.

La compagnie InnovMetric propose une application pour les lunettes de la RA de Microsoft HoloLens : *PolyWorks|AR*. L'application communique avec un projet *PolyWorks|Inspector* : le module d'inspection proposé par InnovMetric. Ainsi, un projet d'inspection peut être ouvert directement sur les HoloLens. Il est possible de superposer des hologrammes 3D, tels que des cartes de couleurs représentant les données de mesures ou des annotations et des formes sur la vue de l'utilisateur d'une pièce du monde réel. Cela permet aux opérateurs d'examiner les résultats d'inspection en regardant simplement la pièce (InnovMetric, 2022).

## 2.6 Synthèse

Dans ce chapitre, une revue concise de la littérature est réalisée. Dans une première partie, diverses recherches axées sur l'automatisation du contrôle qualité dans le domaine de la

construction hors site sont analysées. Ces études démontrent un intérêt marqué pour les technologies de numérisation 3D et la documentation des résultats issus des processus d'inspection.

Dans la seconde partie, la thématique de l'Assemblage Assisté par Mesure (AAM) est abordée. Les pratiques introduites par ce concept ont profondément transformé l'assemblage des structures aéronautiques et pourraient servir de source d'inspiration pour l'intégration du processus de contrôle qualité dans le domaine de la construction modulaire. L'assistance en temps réel à l'assemblage par la mesure 3D s'avère particulièrement pertinente pour répondre à l'objectif identifié à la fin du Chapitre 1. De plus, les différentes technologies 3D de la métrologie à grande échelle, explorées dans la troisième partie, mettent en lumière plusieurs solutions potentielles pour atteindre les objectifs de ce projet. Parmi celles-ci, nous pouvons citer les systèmes de mesure distribués caractérisés par leur capacité à s'adapter au volume de travail et à créer une unité de mesure autour de la station d'assemblage, simplifiant ainsi l'inspection in situ.

Finalement, les applications de la réalité augmentée (RA) sont analysées en tant qu'outil d'assistance pour l'assemblage et l'inspection. Le potentiel de cette technologie en tant qu'outil pratique et susceptible d'améliorer la productivité (réduire les exigences de coordination main-œil) est démontré.

## CHAPITRE 3

### OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

La revue de littérature a permis de constater qu'il n'existe pas, à l'heure actuelle, une solution industrielle mature et déployable, qui combine les technologies de mesure 3D sans contact et les RA pour assister et assurer la qualité d'un assemblage de charpente dans le contexte de la construction modulaire.

L'objectif général de cette recherche est donc de proposer une solution répondant à la problématique vécue par le partenaire industriel (PI), un chef de file dans la fabrication de bâtiments modulaires. Cette problématique est résumée en plusieurs questions :

- 1) Comment peut-on s'affranchir de l'utilisation de gabarits fixes et modifier la méthodologie actuelle d'assemblage pour profiter pleinement du potentiel des mesures 3D sans contact?
- 2) Comment peut-on intégrer la RA comme outils d'assistance lors des opérations d'assemblage?
- 3) Comment peut-on profiter des capacités et des performances des mesures 3D pour intégrer les opérations de contrôle de la qualité lors des opérations d'assemblage (et pas *a posteriori* comme c'est le cas actuellement)?

#### 3.1 Objectifs spécifiques

Pour résoudre la problématique mentionnée ci-dessous, nous décomposons l'objectif général en trois objectifs spécifiques :

- 1) Développer un prototype d'un système qui permet d'assister l'assemblage manuel de la structure extérieure des modules par la métrologie 3D sans contact et l'assistance d'un système de Réalité Augmentée (RA).
- 2) Évaluer le système proposé dans un contexte industriel réel avec les opérateurs et un montage de dimensions réelles.
- 3) Formuler des recommandations pour orienter l'implémentation future de la solution en contexte réel.

### 3.2 Méthodologie proposée

Les différentes étapes de la démarche visant à atteindre les objectifs spécifiques sont explicitées dans la Figure 3.1. Il est important de noter que les expérimentations ont principalement eu lieu au laboratoire de métrologie, où l'humidité et la température sont surveillées et maintenues constantes.

Dans l'usine, l'humidité du bois est continuellement mesurée pour contrôler sa dilatation. D'où dans le cadre de ce projet, les variations dimensionnelles du bois dues à l'humidité et à la température ne seront pas prises en considération.

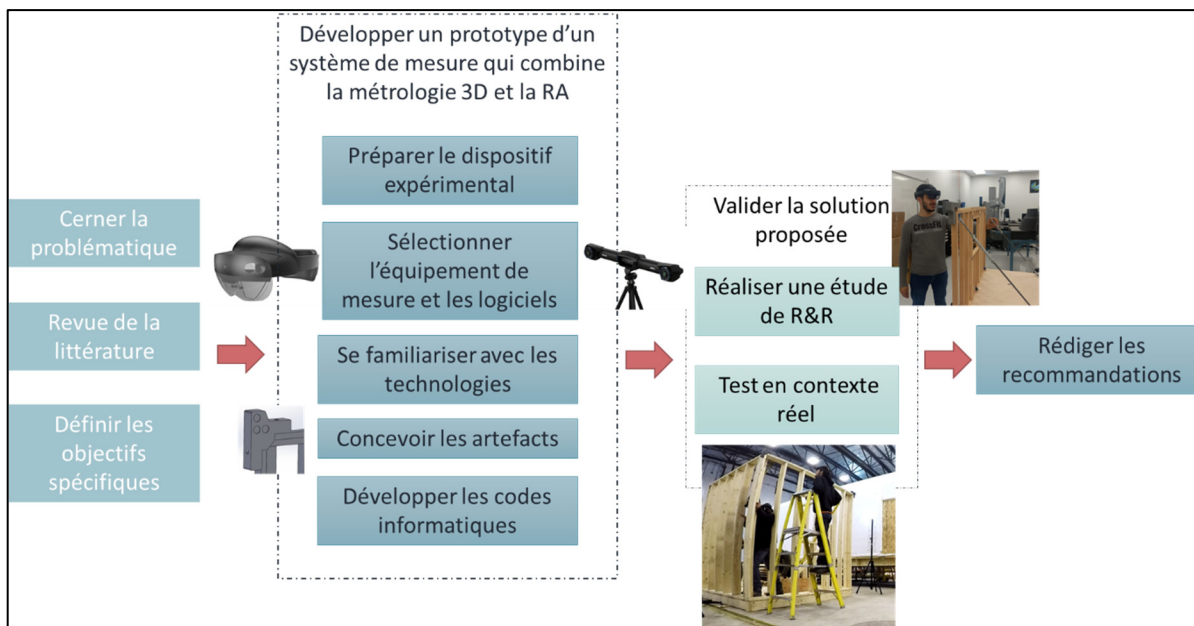


Figure 3.1 Vue globale de la méthodologie proposée

#### 3.2.1 Conception d'une maquette réduite

Pour pouvoir réaliser des tests au laboratoire de métrologie à l'ÉTS, un module de taille réduite a été construit pour répondre aux contraintes d'espace et d'ergonomie. Le module est fabriqué



à une échelle de 1/8, il inclut six fenêtres et une porte. Seule la structure extérieure a été construite, c'est-à-dire le plancher, les quatre murs extérieurs et le plafond. La Figure 3.2 représente le modèle CAO du module réduit.

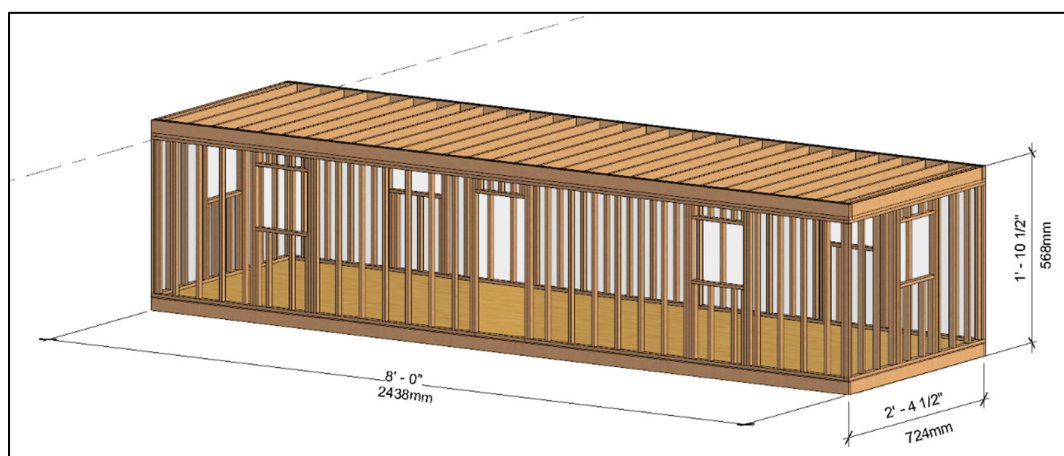


Figure 3.2 Modèle CAO du module réduit

### 3.2.2 Choix du matériel et logiciels

Nous avons pour objectif de concevoir un système qui permet d'assister l'opération d'assemblage et d'inspection pour garantir la qualité géométrique et dimensionnelle. D'un point de vue fonctionnel, ce système est constitué de trois différentes composantes qui intercommuniquent entre elles. Tout d'abord, *l'équipement de mesure* permet d'obtenir les mesures (acquisition des coordonnées) en temps réel des différents points d'intérêts. Ensuite, une *unité logicielle* est chargée du traitement des données brutes pour extraire les caractéristiques clés (ex. erreur de parallélisme, dimension, etc.) et de l'interprétation des mesures en fonction des spécifications techniques. Finalement, une composante est dédiée à fournir des informations en *temps réel* à l'utilisateur pour indiquer si la valeur se situe dans l'intervalle de tolérance ou non, ou encore proposer des actions correctives pour s'assurer de la conformité (ex. vecteur déplacement). Les détails du choix du matériel et du logiciel pour chaque composante sont décrits dans la suite. La Figure 3.3 présente une vue globale du système proposé.

### 3.2.2.1 Équipement de mesure

L'équipement de mesure doit offrir la capacité de suivre, en temps réel ( $\geq 10$  Hz), plusieurs cibles simultanément et de fournir leurs positions dans l'espace 3D. En plus, comme le flux de travail dans l'usine exige que les opérateurs se déplacent fréquemment pendant la phase d'assemblage, il serait plus efficace d'opter pour un système de mesure distribué. Cela permettrait de créer une unité de mesure autour des stations d'assemblage, éliminant ainsi la nécessité de transporter l'équipement de mesure d'un poste à l'autre.

La compagnie *Creaform* propose un système de photogrammétrie qui répond à ces deux contraintes. Le système comprend deux types d'équipements de mesure :

- 1) Le *C-Track* est un appareil de photogrammétrie qui comprend deux caméras numériques entourées d'un ensemble de LED d'éclairage. Le *C-Track* permet de mesurer les coordonnées des cibles rétro réfléchissantes dans l'espace 3D. Le volume d'utilisation s'étend jusqu'à  $16 \text{ m}^3$ .
- 2) Le *HandyPROBE* est un palpeur (sonde) portable qui permet d'acquérir des points par la mesure tactile. Des cibles rétro réfléchissantes attachées au palpeur permettent de localiser sa position spatiale en 3D avec le *C-Track* (voir Figure 3.4(a)). Une compensation automatique du rayon de la pointe de la sonde en fonction de l'orientation du palpeur permet d'identifier le point palpé.

Les spécifications de précision volumétrique fournies par le fabricant pour les *C-Track* sont de  $0.075 \text{ mm}$ . Cependant, une étude menée par (Émond-Girard, 2022) a évalué la précision métrologique des *C-Track* en association avec des artefacts pour le suivi de positionnement, et a montré que, dans ce contexte, les *C-Track* offrent une précision métrologique de  $1.5 \text{ mm}$ . Étant donné que la tolérance acceptable chez le PI est de  $6 \text{ mm}$ , il est clair que les *C-Track* surpassent largement ces exigences.

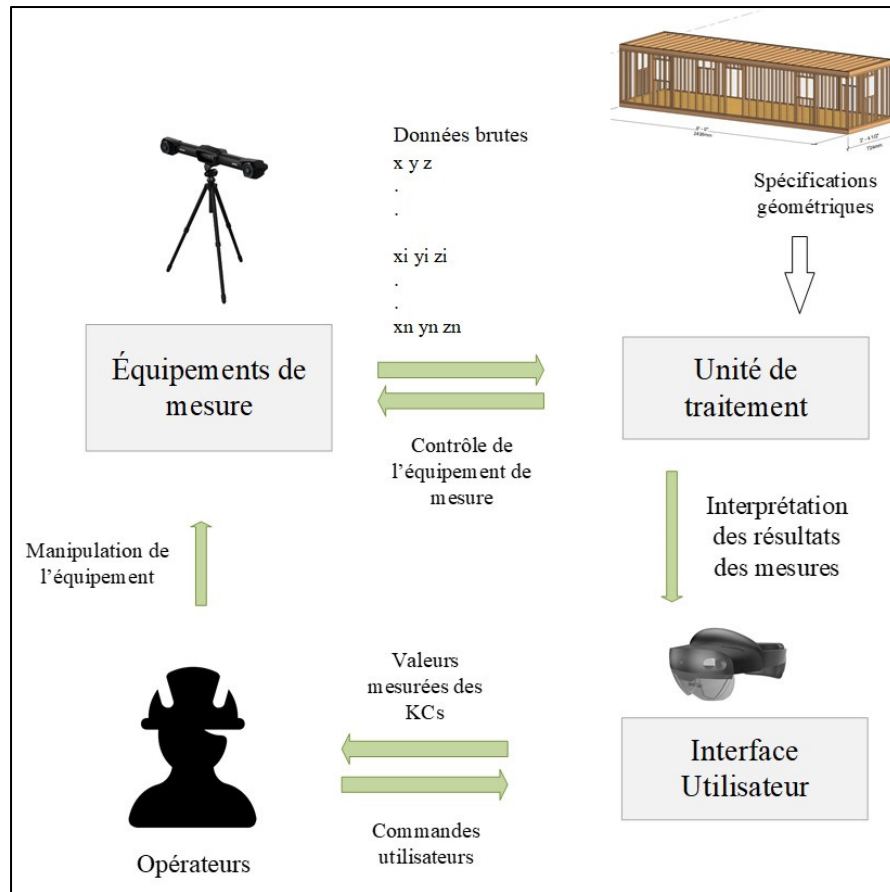


Figure 3.3 Vue globale du système proposé pour assister l'assemblage de la structure des modules par métrologie 3D

Il est possible de combiner jusqu'à quatre appareils *C-Track* pour augmenter le volume de mesure (voir Figure 3.4.(b)). Cette fonctionnalité permet de créer un système de mesure distribué autour de la station d'assemblage. Elle permet aussi un palpage à l'intérieur de volume de mesure à l'aide du palpeur *HandyPROBE*.

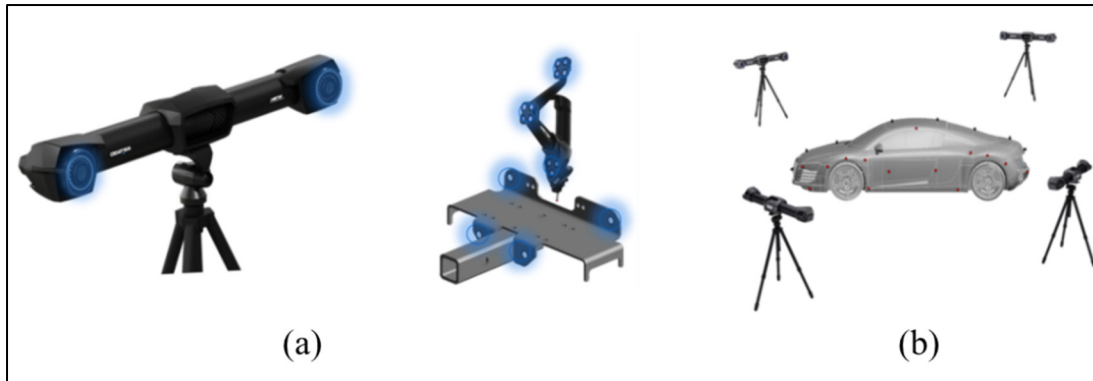


Figure 3.4 Système de photogrammétrie de *Creaform*. (a) Le palpeur portable *HandyPROBE*, (b) La fonctionnalité *C-Link*.

Tirée de (Creaform, 2022)

### 3.2.2.2 Unité de traitement des données

La solution de *Creaform* comprend aussi un logiciel : *VxElements*®, qui permet l'acquisition de données par les différentes technologies de numérisation et de mesure 3D commercialisées par la compagnie. *VxElements*® est composé de différents modules logiciels. Le module *Vx-Track*® permet de réaliser des mesures en dynamique et de suivre plusieurs cibles simultanément. *Vx-Probe*® permet d'acquérir les entités de référencements palpées.

Toutefois, *VxElements*®, comme la plupart des autres logiciels fournit avec les équipements de mesure, possède des fonctionnalités limitées et ne permet pas de manipuler les données mesurées. Pour le post-traitement des données, les logiciels d'inspection offrent une gamme plus large d'outils. Dans le cadre de ce projet, nous optons pour le logiciel d'inspection *PolyWorks|Inspector*® car il propose les fonctionnalités suivantes :

- 1) Extraire les données et dimensions nominales à partir d'un modèle CAO.
- 2) Importer les données de mesure et définir les mesures des entités géométriques.
- 3) Automatiser le flux de travail, structurer la présentation des résultats et personnaliser le retour d'information en utilisant les macro-scripts.
- 4) Exporter les résultats d'inspection sous une forme conviviale.

L'unité de traitement se composera donc de *VxElements*® et *Polyworks|Inspector*® la démarche suivie pour interfacier entre les deux logiciels sera détaillée dans la section 4.5.

### 3.2.2.3 Interface utilisateur

L'interface utilisateur doit fournir à l'opérateur l'information sur la valeur de la caractéristique critique mesurée afin de guider les ajustements à effectuer pour garantir la qualité géométrique de l'assemblage.

En outre, cette interface doit permettre à l'opérateur de réaliser certaines commandes de contrôle du système de mesure, telle que l'exportation des résultats et la navigation entre les différentes étapes d'inspection.

La RA représente un support idéal pour une telle interface puisqu'elle permet de projeter des informations virtuelles dans l'environnement réel sous forme d'hologrammes 3D. Elle offre ainsi une expérience utilisateur plus immersive en éliminant l'exigence de maintenir le regard sur un écran fixe pour chercher des informations. Elle permet également de détecter des commandes utilisateurs, grâce à la reconnaissance des gestes de la main et le mouvement des yeux.

*Innovmetrics* propose une application *PolyWorks|AR* pour les lunettes de RA *MS-HoloLens2*. L'application est en mesure d'interagir avec le module d'inspection *PolyWorks|Inspector®* pour simplifier le processus d'inspection. Elle permet de projeter les résultats d'inspection directement sur la pièce réelle, de guider le palpement des entités géométriques et d'assister l'assemblage des gabarits. Il est également possible d'adapter le processus d'inspection selon le besoin en utilisant la programmation des macros. C'est cette dernière fonctionnalité que nous utilisons pour créer l'interface utilisateur qui aidera les opérateurs à positionner et ajuster les pièces pendant l'assemblage des modules en projetant les valeurs mesurées des caractéristiques clés.

### 3.2.3 Validation de la convivialité de système

Pour valider la solution proposée et mesurer son applicabilité dans un contexte industriel, nous proposons en premier temps de réaliser des tests avec un représentant du PI au laboratoire de métrologie de l'ÉTS pour s'assurer que la solution proposée répond aux exigences du flux de travail et aux contraintes rencontrées durant l'assemblage de la structure des modules.

Ensuite, des tests de répétabilité et de reproductibilité seront réalisés pour permettre l'évaluation des performances métrologiques du système de mesure.

Finalement, un test est réalisé en usine afin d'évaluer le comportement du système en contexte réel et avoir un retour d'expérience des opérateurs.

### **3.3 Synthèse**

La problématique, observée chez le PI et décrite dans le premier chapitre a permis d'identifier l'opportunité de développer une solution métrologique numérique plus robuste qui permet d'assister l'assemblage de la structure extérieure des modules afin de garantir la qualité géométrique et dimensionnelle. Dans le présent chapitre, nous avons donné une vue globale du système proposé en détaillant le choix de matériels et logiciel qui constitue les différentes composantes du système proposé.

Dans le prochain chapitre, nous explicitons l'implémentation proposée pour assurer la communication et l'échange des données entre les différentes composantes du système proposé.

## CHAPITRE 4

### PROPOSITION ET EXPÉRIMENTATION

Dans le chapitre précédent, nous avons exposé la sélection du matériel et du logiciel retenus pour la mise en œuvre de la preuve de concept. Dans ce chapitre, nous détaillons l'implémentation du système. Nous commençons par fournir des détails sur le développement des artefacts, puis nous expliquons les étapes suivies pour préparer le système de mesure. Ensuite, nous détaillons les algorithmes mis en œuvre pour le traitement des données. Enfin, nous fournissons une description de l'interface utilisateur.

#### 4.1 Hypothèses de travail

- 1) Les composantes sont considérées comme étant parfaitement rigides.
- 2) Les erreurs de fabrication des artefacts sont considérées comme négligeables par rapport aux tolérances permises ( $\pm 2$  mm).
- 3) Les incertitudes liées à la fabrication des artefacts et aux performances des *C-Track* dans des conditions réelles n'ont pas été évaluées. Cependant, lors de nos manipulations, nous avons respecté les conditions suivantes:
  - a) Le système est mis en marche 24 heures avant son utilisation afin d'assurer la stabilité des mesures et pour permettre au *C-Track* d'atteindre la température requise pour un bon fonctionnement.
  - b) Les *C-Track* sont calibrés fréquemment afin de minimiser tout biais potentiel.
  - c) Nous avons suivi les recommandations du fournisseur concernant le référencement de l'environnement, le palpation des objets et la création des modèles de suivi.

## 4.2 Développement des artefacts

### 4.2.1 Conception et validation

Comme mentionné dans la section 3.2.2.1, le *C-Track* permet de suivre les positions 3D des cibles rétro réfléchissantes en temps réel. Les cibles sont fournies sous forme d'autocollants ou d'artefacts métalliques aimantés. Cependant, ces formats ne sont pas adaptés aux caractéristiques de la charpente de bois et ne permettent pas de calibrer les points mesurés par rapport au modèles préparés à l'aide d'un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO). Par conséquent, nous avons développé des artefacts spécifiques pour obtenir les positions des *points critiques*.

Les premières versions d'artefacts proposés étaient composées de deux parties: une première partie se fixe sur la pièce et une deuxième partie permettant de fixer les cibles rétro réfléchissantes. Cette approche nous offre plusieurs configurations pour capturer différents points et s'adapter à la localisation des *C-Track*. La Figure 4.1 illustre les différentes configurations obtenues pour la première version d'artefacts. Une représentation de toutes les pièces est donnée en ANNEXE I.

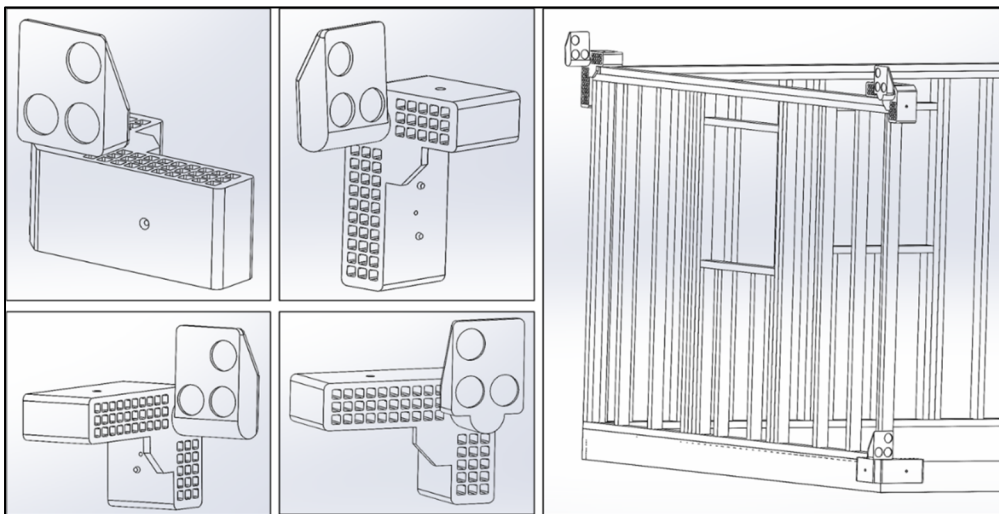


Figure 4.1 Illustration des différentes configurations obtenues pour la première version d'artefacts



Le prototypage des artefacts a été réalisé par impression 3D en polylactide polymère (PLA). Ensuite, des tests ont été effectués pour valider la conception proposée. Les tests réalisés sur les premières versions ont mené aux constatations suivantes :

- 1) Les points de contact des surfaces, sous forme de butées, ne conviennent pas à la charpente en bois en raison des imperfections du matériau et sa variation dues à l'humidité.
- 2) L'assemblage de deux pièces introduit des incertitudes de mesure liées à la fabrication des artefacts.
- 3) Le représentant du PI a exprimé que la conception est trop complexe pour être utilisée en usine durant le processus d'assemblage.

Suite à ces constatations, une deuxième itération des artefacts a été proposée. L'artefact est donné sous la forme d'une seule pièce et les butées des surfaces de contacts ont été éliminées. On suppose que l'erreur induite par le contact des surfaces est négligeable par rapport à l'intervalle de tolérance permis en contexte de construction.

Dans cette deuxième itération, nous avons choisi de considérer un seul cas d'utilisation : les coins supérieurs des murs. Étant donné que la maquette en bois est fragile et ne peut supporter de multiples perçages nécessaires pour tester les artefacts dans tous les cas d'utilisation, nous avons décidé de nous limiter à un seul modèle qui permettra de valider la preuve de concept. La Figure 4.2 illustre le modèle final retenu des artefacts. Une représentation du modèle est donnée en ANNEXE I.

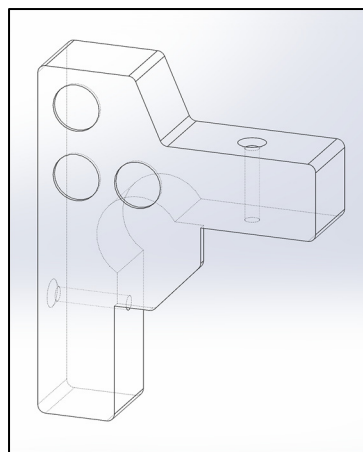


Figure 4.2 Modèle retenu de l'artefact

### 4.2.2 Principe de fonctionnement

Le *C-Track* permet d'obtenir la position  $(x, y, z)$  des trois cibles composant l'artefact (notées dans la Figure 4.3 **C1**, **C2** et **C3**). Il est donc possible de créer un système de coordonnées local lié à l'artefact dont la position est connue dans le système de coordonnées global.

En supposant que l'artefact est parfait, la position de **Pt** est connue dans le repère local. Où **Pt** correspond à l'intersection des trois plans représentés en **bleu** dans la Figure 4.3. En supposant que les surfaces de contact entre la charpente en bois et l'artefact sont parfaites, **Pt** correspond au *point critique* sur la charpente en bois dont on cherche à mesurer la position.

Ainsi la position du *point critique* dans le repère global peut être calculée par une transformation géométrique.

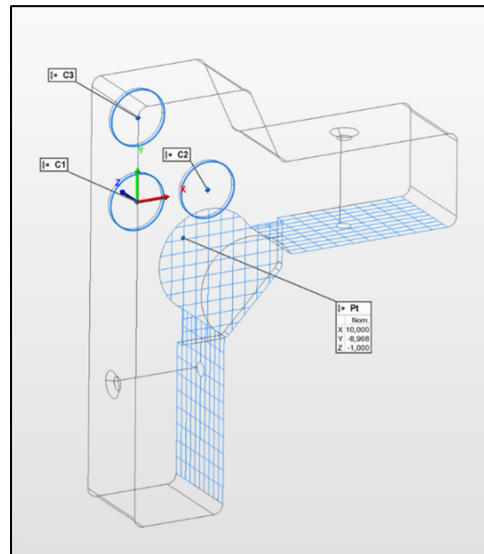


Figure 4.3 Éléments de l'artefact

### 4.3 Dispositif expérimental

Dans la suite, nous allons considérer le scénario suivant : pour pouvoir assembler le mur 1 avec le plancher, nous allons suivre les deux coins supérieurs, en utilisant deux artefacts. Le mur sera positionné approximativement dans sa position nominale. Ensuite l'utilisateur sera amené

à ajuster la position du mur en utilisant un système de renfort ajustable (voir Figure 4.4) jusqu'à ce que les deux points soient à l'intérieur de l'intervalle de tolérance. Dans la suite, on réfère aux deux points comme *point critique 1* et *point critique 2*. La position du *point critique i* (où  $i \in \{1, 2\}$ ) sera suivi par l'artefact  $i$ . On notera les cibles de l'artefact  $i$  :  $C1\_i$ ,  $C2\_i$  et  $C3\_i$ .



Figure 4.4 Nomenclature et dispositif expérimental

## 4.4 Traitements préliminaires

Avant de commencer le processus d'inspection, il est nécessaire d'effectuer une série de traitements préliminaires afin de préparer le système de mesure. Ces étapes comprennent le référencement de l'environnement, l'alignement (ou le recalage) et l'enregistrement du modèle de suivi. Les détails de ces étapes sont expliqués ci-dessous.

### 4.4.1 Référencement de l'environnement du travail

Cette étape a pour but de référencer les *C-Track* dans l'environnement réel en mode dynamique. Il s'agit de repérer l'environnement du travail par des cibles rétro réfléchissantes. Ces cibles sont ensuite enregistrées par le *C-Track* primaire (en cas d'utilisation de plusieurs *C-Track*) et exportées sous forme d'un fichier de référencement *Ref.txt* (Voir Figure 4.5).

Il est ensuite possible de prendre des mesures en déplaçant les *C-Track* dans tout l'environnement référencé.

#### 4.4.2 Méthode d'alignement

Lorsqu'un point mesuré est enregistré, ses coordonnées ( $X, Y, Z$ ) sont données par rapport au système de référence de l'instrument. Avant de pouvoir comparer les coordonnées du point mesurées aux coordonnées nominales données par le modèle CAO, il faut procéder à l'alignement de l'instrument dans le volume CAO 3D. Ce processus consiste à créer des entités de référence qui vont être utilisées pour aligner l'instrument de mesure dans l'espace de travail du logiciel de métrologie afin qu'il corresponde à l'instrument dans le monde réel.

Pour réaliser cet alignement, nous avons utilisé le plancher comme pièce maîtresse, car il est le premier élément fixé dans l'assemblage. La méthode proposée consiste à palper trois plans du plancher qui seront recalés par rapport au modèle CAO. Pour cette étape, nous avons utilisé le palpeur portable *Handyprobe*, qui communique directement avec les *C-Track* via le module *Vx-probe* du logiciel *Vx-Elements*. Nous avons suivi les recommandations fournies par le fournisseur de l'équipement afin de minimiser les erreurs associées à ce processus. Ensuite, un système de coordonnées global a été créé à partir des trois plans palpés (voir Figure 4.5).

#### 4.4.3 Création du modèle de suivi

On appelle un modèle de suivi l'ensemble de cibles rétro réfléchissantes que les *C-Track* vont suivre en dynamique.

Cette étape consiste à l'acquisition des cibles constituant le modèle à suivre par les *C-Track* pour l'exporter sous format d'un fichier texte (nommé *Modèle.txt*), qui sera utilisé dans la suite durant le processus d'inspection. Le modèle de suivi est constitué des cibles formant les artefacts et des cibles attachées aléatoirement sur le mur (voir Figure 4.5). Ces cibles ont été rajoutées pour minimiser les erreurs de mesure associées à cette étape.

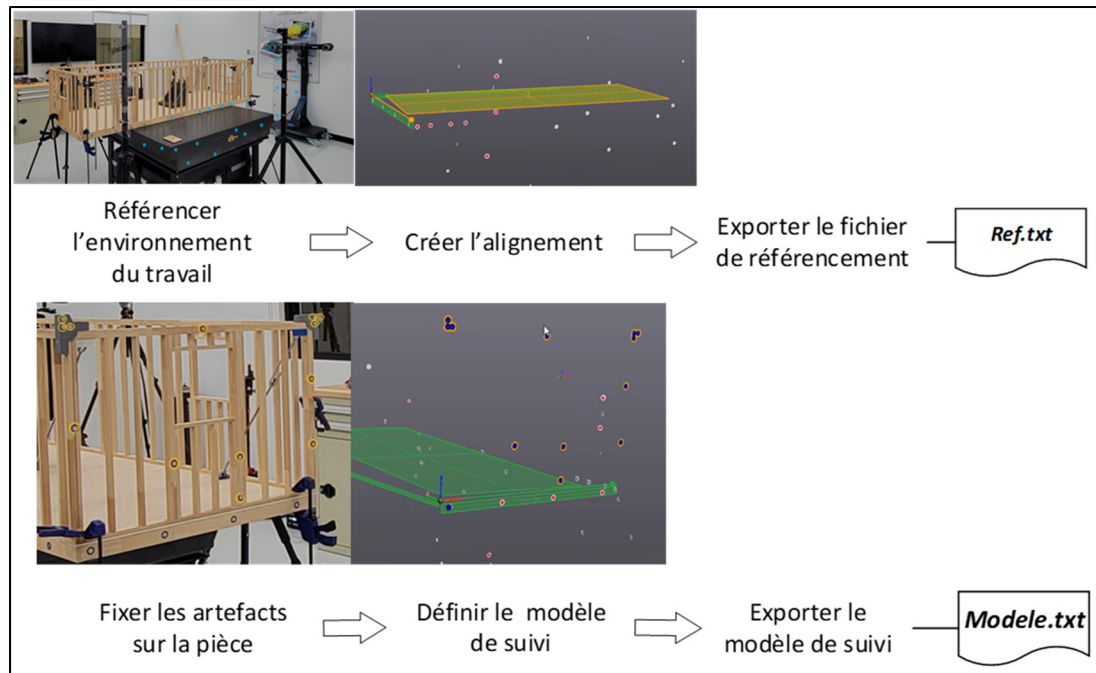


Figure 4.5 Préparation du système de mesure

## 4.5 Traitement des données

Une fois que le système de mesure est prêt, il est possible de commencer le suivi de la position du modèle de suivi. Les coordonnées des cibles qui composent le modèle sont exportées vers un fichier texte, qui est constamment mis à jour en temps réel. Ces données brutes sont ensuite importées et traitées à l'aide d'un ensemble de scripts développés sur le logiciel d'inspection *Polyworks Inspector*®. Les données sont importées lors de chaque rafraîchissement du fichier par le logiciel, qui établit une communication avec les C-Track. En cas d'absence de cette opération et si une seconde s'écoule, l'interface utilisateur sera alors actualisée.

La Figure 4.6 illustre le traitement effectué sur les données brutes en temps réel. Il est à noter que la variable "Tracking" indique si le mode de suivi est activé ou non par l'utilisateur. "Tracking" prend la valeur "On" lorsque l'opération de positionnement est en cours et "Off" lorsque l'opération est terminée et que l'opérateur décide d'arrêter le processus de mesure. Ce fonctionnement est géré par le script *Démarrer* fourni en ANNEXE II. Chaque étape est ensuite gérée par un script distinct.

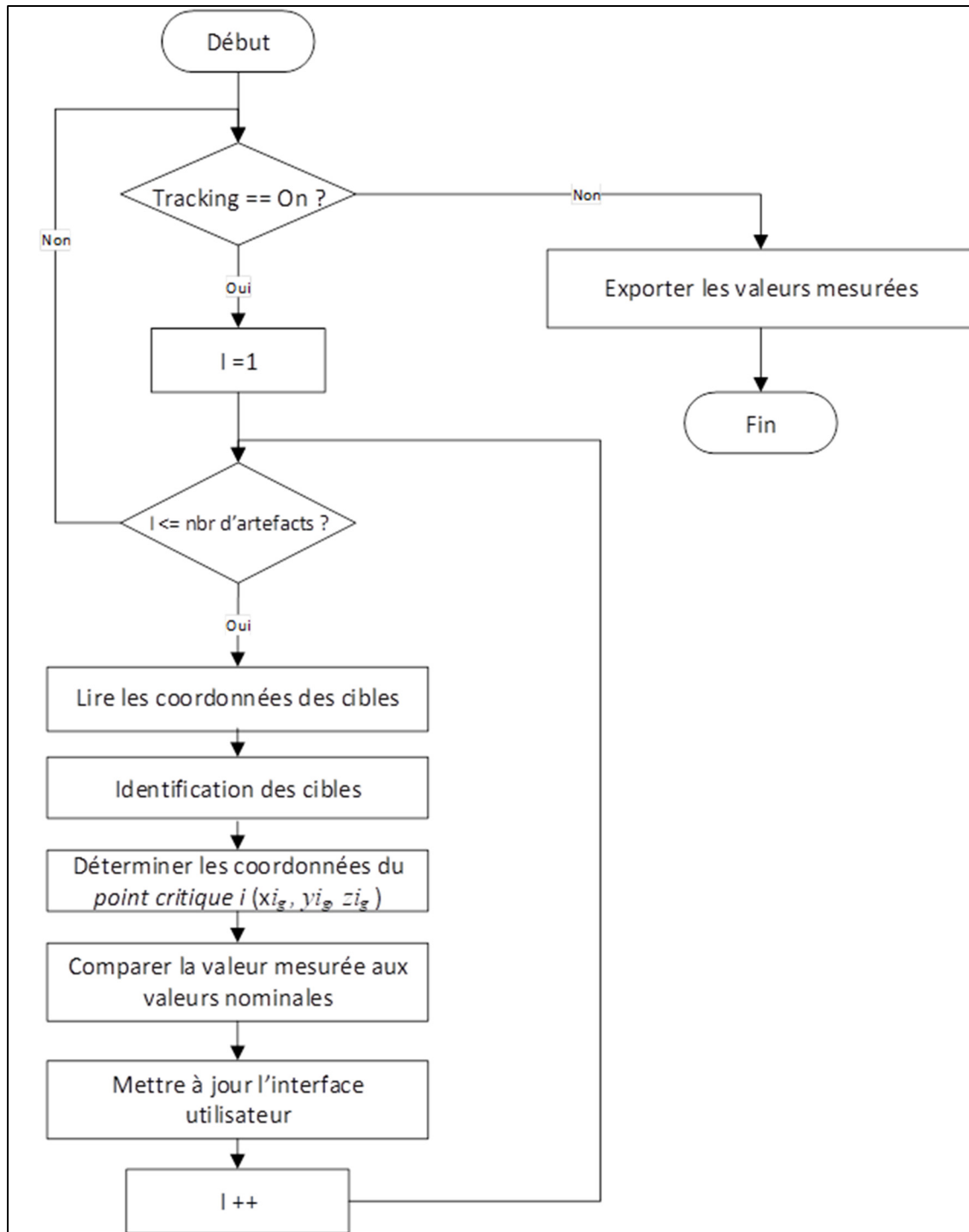


Figure 4.6 Diagramme de flux représentant le traitement des données effectué en dynamique

#### 4.5.1 Identification des cibles

La première étape consiste à identifier les cibles, ce qui implique d'associer les cibles à chaque *point critique*, et de distinguer les différentes cibles pour chaque artefact.

Pour identifier les cibles correspondant à chaque *point critique*, nous calculons les distances euclidiennes entre la position nominale du *point critique* et les cibles. Les trois cibles qui se trouvent à l'intérieur d'une sphère de rayon de 10 cm autour d'un *point critique*  $i$  sont considérées comme les cibles associées à l'artefact  $i$ . Si une ou plusieurs cibles manquent, un message d'erreur est affiché.

Cette approche repose sur l'hypothèse que la pièce (le mur par exemple) est positionnée approximativement à sa position nominale. L'implémentation de cette étape est donnée par le script *IdentifyArtefact* en ANNEXE II.

Une fois les trois cibles associées à l'artefact identifiées, les trois cibles sont distinguées en comparant les distances entre les cibles à la géométrie de l'artefact.

#### 4.5.2 Déterminer les coordonnées des points critiques

Une fois les cibles identifiées, un repère local est créé autour de chaque artefact  $(\vec{i}_l, \vec{j}_l, \vec{k}_l)$  où :

$$\vec{i}_l = \frac{C2_i - C1_i}{\|C2_i - C1_i\|} ; \vec{j}_l = \frac{C3_i - C1_i}{\|C3_i - C1_i\|} ; \vec{k}_l = \vec{i}_l \wedge \vec{j}_l \quad (4.1)$$

La position du  $(\vec{i}_l, \vec{j}_l, \vec{k}_l)$  est maintenant connue dans le repère global. La position du *point critique*  $i$  dans le repère global  $g$  :  $P_{ig}(x_g, y_g, z_g)$  est calculé par transformation géométrique à partir de la position du *point critique*  $i$  dans le repère local  $l$ ,  $P_{il}(x_l, y_l, z_l)$ . Comme exprimé par l'équation (4.1).

$$P_{ig} = \mathbf{T}_{g/l} \cdot P_{il} \quad (4.2)$$

Où  $\mathbf{T}_{g/l}$  est la matrice de transformation du repère local ( $l$ ) vers repère global ( $g$ ). En utilisant les coordonnées homogènes, l'équation (4.2) s'écrit comme suit :

$$\begin{pmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Où la matrice de rotation est donnée par :

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x\vec{l}_g & x\vec{j}_g & x\vec{k}_g \\ y\vec{l}_g & y\vec{j}_g & y\vec{k}_g \\ z\vec{l}_g & z\vec{j}_g & z\vec{k}_g \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Et le vecteur de translation est donnée par les coordonnées de l'origine du repère locale soit  $\mathbf{c1}$  dans le repère global

$$\begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} xc1_g \\ yc1_g \\ zc1_g \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

Les codes détaillant ce calcul sont donnés par le script *Mes2Actual* en ANNEXE II.

## 4.6 Interface utilisateur

L'utilisateur interagit avec le système à travers l'interface utilisateur générée sur les lunettes de RA (voir Figure 4.7). Cette interface se compose de deux parties :

- 1) Le menu ou *ToolBar* qui permet à l'utilisateur de passer trois commandes:
  - a) Lancer la mesure en dynamique.
  - b) Exporter les résultats des mesures.
  - c) Afficher/masquer l'hologramme du CAO.



- 2) Les annotations qui permettent d'afficher les valeurs de l'écart de la valeur mesurée par rapport à la valeur nominale. Les annotations sont affichées à la position nominale du point critique correspondant, elles changent de couleur selon si la valeur mesurée est l'intérieur de l'intervalle de tolérance ou pas.

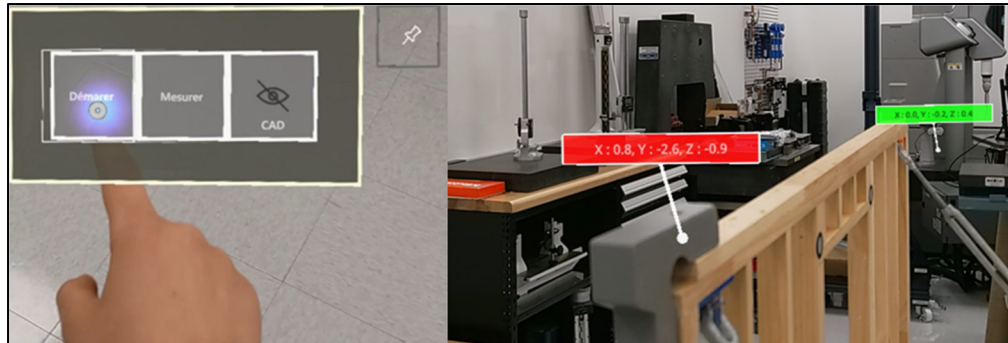


Figure 4.7 Interface utilisateur générée sur les HoloLens2

Il est à noter que pour aligner les hologrammes (information numérique) avec l'environnement réel, nous avons utilisé les capacités de reconnaissance de forme de HoloLens. Cette fonctionnalité est assurée l'application Polywork AR.

#### 4.7 Synthèse

Au cours de ce chapitre, nous avons fourni une explication détaillée de la mise en œuvre de la solution suggérée. Dans le chapitre suivant, nous détaillons les tests effectués à la fois au laboratoire de métrologie et en usine pour évaluer la convivialité du système ainsi que les résultats obtenus et nous mènerons une discussion sur ces résultats.



## CHAPITRE 5

### PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans ce chapitre, nous détaillons la démarche suivie pour estimer l'erreur de répétabilité et de reproductibilité inhérente au système de mesure dans sa configuration telle que détaillée dans le CHAPITRE 4. Nous exposons aussi les étapes suivies pour évaluer la convivialité du système dans un contexte industriel réel. Les résultats et les analyses obtenus y sont présentés, et enfin, nous concluons le chapitre avec une discussion de ces derniers.

#### 5.1 Étude de répétabilité et reproductibilité du système de mesure

Lorsqu'une opération d'inspection est réalisée, les caractéristiques clés sont mesurées pour vérifier si elles sont conformes aux spécifications techniques. Ces dernières sont généralement définies par un intervalle de tolérance. Toutefois, cette mesure n'est jamais parfaite ou exacte, elle est influencée par diverses sources de variation (équipement, conditions, etc.), ce qui entraîne une incertitude de mesure associée à chaque résultat de mesure. L'estimation de cette incertitude est primordiale pour s'assurer de la cohérence des conclusions qui peuvent être retenues de ladite opération d'inspection.

Il est important de noter que l'incertitude de mesure ne correspond pas à l'erreur maximale de la mesure. L'erreur de mesure représente l'écart entre la valeur mesurée et la valeur réelle, tandis que l'incertitude de mesure est une évaluation quantitative du doute lié aux résultats de la mesure, basée sur des distributions de probabilités. On peut caractériser la dispersion d'un ensemble de mesures d'une grandeur en utilisant l'estimateur de son écart-type, également appelé incertitude type ( $\sigma$ ) (Bureau International des poids et mesures, 2008).

Un système de mesure est défini comme l'ensemble des instruments, de normes, d'opérations, de méthodes, d'installations, de logiciels, de personnel, de l'environnement et les hypothèses utilisés pour quantifier une caractéristique. En d'autres termes, l'ensemble du processus utilisé pour obtenir des mesures (Automotive Industry Action Group (AIAG), 2010)

Ainsi, l'évaluation de l'incertitude associée à un système de mesure doit tenir compte de toutes les variations associées aux différentes composantes d'un système de mesure. Il est crucial d'évaluer cette incertitude afin de déterminer si le système de mesure est approprié pour détecter avec efficacité les écarts sur les caractéristiques clés. Cela permet d'évaluer les performances du système de mesure.

Une évaluation complète de l'incertitude du système de mesure étudié et de sa capacité de détecter la non-conformité est hors contexte de travail du présent projet. D'autres travaux se sont focalisés sur cet aspect spécifique. (Émond-Girard, 2022) a réalisé une analyse de l'erreur de positionnement associé à un système de photogrammétrie lié à l'utilisation des artefacts. L'étude a permis d'identifier empiriquement les incertitudes en fonction de la position du point dans le volume de travail. Ces résultats ont été utilisés par la suite dans l'étude de (Bou-Gebayel, 2023) pour estimer l'incertitude associée à des caractéristiques dimensionnelles et géométriques dans l'espace 3D (ex. distance entre deux points, erreur de parallélisme, etc.) par simulation Monte-Carlo.

Cependant, dans le cadre du présent projet, nous nous intéressons à évaluer l'étendue de variation dans les mesures du système de mesure tel qu'il sera déployé dans le contexte d'utilisation industrielle décrite précédemment.

La variation des mesures se compose de deux facteurs importants: la répétabilité ( $\sigma_{\text{Répétabilité}}$ ) et la reproductibilité ( $\sigma_{\text{Reproductibilité}}$ ) (Automotive Industry Action Group (AIAG), 2010). La *répétabilité* se réfère à l'évaluation quantitative de la capacité d'un système de mesure à produire des résultats identiques dans des conditions théoriquement identiques, en utilisant les mêmes opérateurs et les mêmes pièces, mais sans se limiter à un environnement de laboratoire, c'est-à-dire dans des conditions réelles d'utilisation. En ce qui concerne la *reproductibilité*, elle permet de modéliser l'influence des variations provoquées par différents opérateurs. Ces deux incertitudes sont déterminées de manière empirique par une étude de répétabilité et de reproductibilité de l'instrument (Gage R&R). La section suivante détaillera la démarche suivie pour collecter les données de l'étude R&R du système de mesure dans la configuration proposée.

### 5.1.1 Déroutement des tests expérimentaux

Deux (2) opérateurs ont procédé au positionnement du mur en suivant la position  $(x, y, z)$  de deux (2) points critiques représentant les coins supérieurs du mur. Avant de démarrer les tests, les préparatifs suivants ont été faits :

Le module est placé sur une table en granite et fixé à la table avec un poids supplémentaire en dessous pour immobiliser le plancher. Ensuite, nous avons procédé à l'acquisition des cibles de référencement, à l'alignement et à l'acquisition du modèle de suivi, comme expliqué dans la section 4.4.

Ensuite chaque opérateur a réalisé 37 tests dans un ordre aléatoire. Pour chaque test six (6) mesures ont été enregistrées soit Point1  $x$ , Point1  $y$ , Point1  $z$ , Point2  $x$ , Point 2  $y$ , Point2  $z$ . Les mesures collectées sont fournies en ANNEXE III.

Pour le déroulement comme tel, chaque opérateur commence par porter les lunettes de réalité augmentée (RA) et ouvrir le projet dans l'ordinateur. L'interface affiche l'hologramme du fichier CAD du mur dans sa position nominale, ainsi qu'un menu composé de trois (3) boutons, comme décrit dans la section 4.6.

Ensuite, l'opérateur positionne approximativement le mur dans sa position nominale en le fixant au plancher et en assemblant le système de renfort ajustable. Il fixe les artefacts aux deux coins supérieurs du mur. L'opérateur lance ensuite la mesure dynamique en appuyant sur le *Bouton 1*, et les annotations s'affichent pour indiquer l'erreur de positionnement sur les axes  $x$ ,  $y$  et  $z$  pour chaque point critique.

L'opérateur commence par ajuster la position du mur selon l'axe  $x$  en suivant la valeur de l'écart affiché par l'annotation pour le Point 1 et le Point 2. Une fois que la coordonnée  $x$  est dans l'intervalle de tolérance (jugée comme satisfaisante), l'opérateur ajuste la position du Point 1 sur les axes  $y$  et  $z$  en ajustant le système de renfort ajustable. Lorsque la position du point se trouve dans l'intervalle de tolérance sur les trois axes, l'annotation devient verte. La même procédure est effectuée pour l'ajustement de la position du Point 2.

Une fois que les deux annotations seront vertes, l'opérateur arrête la mesure à travers le *Bouton 3*, ce qui permet d'exporter les valeurs dans un fichier texte.

### 5.1.2 Résultats

Plusieurs méthodes existent pour estimer l'incertitude due à la répétabilité et la reproductibilité (R&R) d'un système de mesure. Les deux méthodes les plus communes sont la méthode des étendues de mesure (X-bar R) et celle de l'analyse de variance (ANOVA). Dans cette étude, nous avons opté pour la méthode ANOVA. L'analyse de variance ANOVA est une analyse statistique qui permet de décomposer les sources de variations d'un système de mesure de la façon suivante: (i) Pièce : Variation provenant des pièces à l'étude; (ii) Opérateur : Variation provenant des opérateurs; (iii) Interaction pièce/opérateur : Variation provenant de l'interaction entre les opérateurs et les pièces (lorsqu'un opérateur mesure différemment différentes pièces); (iv) Répétabilité : Variation provenant du système de mesure qui n'est pas attribuable aux autres sources de variation.

Habituellement, une étude de répétabilité et de reproductibilité se réalise sur différentes pièces, cela a pour but d'évaluer l'influence de la variation due au procédé de fabrication et l'influence de l'interaction entre l'opérateur et la pièce mesurée (source de variation (i) et (iii)). Dans cette étude, nous nous intéressons seulement aux variations provenant de la répétabilité de système et de l'influence de l'opérateur. Donc une étude R&R de l'instrument avec plusieurs opérateurs et une pièce a été effectuée.

Le Tableau 5.1 résume les résultats de l'étude R&R. Les déviations standard de la répétabilité et de la reproductibilité de  $x, y, z$  du Point 1 et du Point 2 sont données. Les formules utilisées pour calculer la déviation totale et le ratio précision/ tolérance sont données respectivement par l'équation (5.1) et (5.2).

$$\sigma_{R\&R} = \sqrt{\sigma_{\text{Reproductibilité}}^2 + \sigma_{\text{Répétabilité}}^2} \quad (5.1)$$

$$P/T = \frac{6 \sigma_{R\&R}}{LSS - LSI} \quad (5.2)$$

Où  $LSS$  est la limite supérieure de spécification (valeur nominale +3 mm),  $LSI$  est la limite inférieure de spécification (valeur nominale -3 mm)

Tableau 5.1 Résultat de l'étude R&R

	Point 1			Point 2		
	X	Y	Z	X	Y	Z
$\sigma_{\text{Répétabilité}}$	0,335	0,487	0,152	0,325	0,413	0,089
$\sigma_{\text{Reproductibilité}}$	0,000	0,019	0,028	0,000	0,237	0,029
$\sigma_{R\&R}$	0,335	0,487	0,154	0,325	0,476	0,093
$P/T$	33,5%	49%	15%	33%	48%	9%

Les résultats montrent un écart-type total maximal de 0,476. Cela signifie qu'au seuil de 95% de probabilité (risque d'erreur de 5%), la valeur mesurée varie entre  $\pm 2\sigma_{R\&R} = \pm 0,952$  mm, ce qui est inférieur à la tolérance spécifiée par le fabricant :  $\pm 3$  mm

Toutefois, pour qu'un système de mesure soit considéré comme bon, il doit avoir un rapport précision/tolérance  $P/T \leq 10\%$ , un rapport  $10\% < P/T \leq 30\%$  est considéré comme limite et un rapport  $P/T > 30\%$  est jugé comme inacceptable.

Il est à noter que la variation de système est influencée par le fait qu'on demande à l'opérateur de positionner, au mieux, le point à l'intérieur d'un intervalle de  $\pm 1$  mm. Lors de positionnement du point, l'opérateur agit essentiellement sur la position selon l'axe  $x$  et  $y$  ce qui explique la variation plus importante pour  $x$  et  $y$  en comparant à  $z$ . En plus, vu la disposition expérimentale, l'axe  $y$  correspond à l'axe de profondeur de  $C\text{-Track}$ . Une étude de l'effet du champ de profondeur des  $C\text{-Track}$  a montré que le champ de profondeur des  $C\text{-Track}$  a un effet sur la répétabilité de système de mesure (Émond-Girard, 2022).

Dans tous les cas l'erreur de répétabilité est plus importante que celle associée à la reproductibilité. Cela veut dire que la plus grande source de variation provient du système de mesure et non des manipulations effectuées par les opérateurs.

## **5.2 Test en usine**

Dans le but d'évaluer la convivialité du système proposé et de mettre en évidence les contraintes potentielles liées à son utilisation en milieu industriel, un test avec les opérateurs et en conditions de travail réelles a été réalisé. Ce qui suit est une description de la configuration expérimentale et du déroulement du test, ainsi que des constatations et observations notées à la suite de ce dernier.

### **5.2.1 Configuration expérimentale**

Le volume de mesure de deux *C-Track* combinés ne permettait pas de réaliser un test avec un module de dimensions tel que typiquement fabriqué en usine. En effet, il faut que l'équipement de mesure couvre l'assemblage de la charpente du module au complet et les cibles de référencement. Les cibles de référencement devaient être réparties sur les trois axes du volume englobant la station d'assemblage, de manière à être détectées par les *C-Track* et il est nécessaire de garder un minimum de six (6) cibles visibles pour chaque prise de mesure effectuée par les *C-Track*.

Ainsi, un module de dimensions quasi réel a été conçu pour réaliser le test. La Figure 5.1 illustre le dispositif expérimental utilisé lors du test en usine, avec les dimensions du module indiquées et le volume de mesure couvert par les deux *C-Track* représentés.



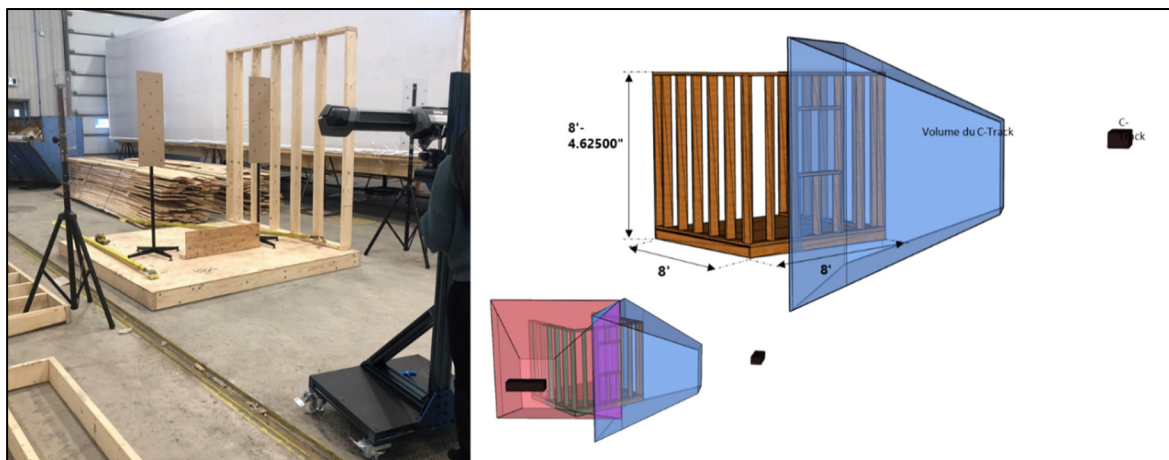


Figure 5.1 Dispositif expérimental du test en usine

### 5.2.2 Artefacts échelle réelle

Les artefacts présentés dans la section 4.2 ont été ajustés à l'échelle du module de test.

Dans les expériences réalisées en laboratoire, un modèle de suivi était composé des deux artefacts. C'est-à-dire que pour une séquence de mesure, la position des deux artefacts est suivie simultanément. Dans le scénario de l'essai en usine, il n'était pas possible de capter les deux artefacts simultanément à cause de la limitation du volume de mesure de *C-Track*.

Par conséquent nous avons choisi de considérer un artefact comme un modèle de suivi, cela signifie que la position de chaque point (coin) est suivie séparément. Par conséquent, deux cibles supplémentaires ont été ajoutées à la conception initiale de l'artefact, car un modèle de suivi doit être composé d'au moins quatre cibles. La Figure 5.2 présente la conception de l'artefact adapté à l'échelle réelle.

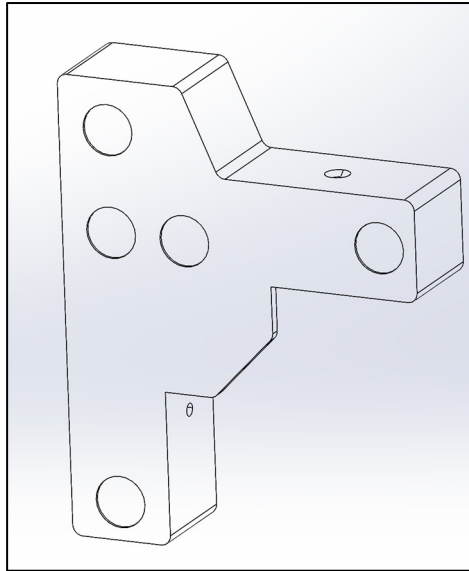


Figure 5.2 Artefact adapté échelle réelle

### 5.2.3 Déroulement du test

Avant de commencer les tests, nous avons effectué les étapes de préparation du système, notamment le référencement de l'environnement, l'alignement et la création du modèle de suivi et l'alignement de l'hologramme CAO sur l'environnement réel (détaillés dans la section 4.4) puisque cette procédure est complexe et nécessite une certaine familiarisation avec l'équipement de mesure. Ensuite, nous avons expliqué le fonctionnement du système aux opérateurs allant participer aux tests. Trois (3) opérateurs ont ensuite procédé au préassemblage du module et à l'ajout des supports muraux ajustables.

Par la suite, un opérateur a fixé les artefacts et a porté les *HoloLens 2* pour commencer le positionnement du mur en suivant la position du Point 1. Étant donné que l'annotation affichée sur les *HoloLens 2* était de petite taille, l'opérateur a dû monter sur l'échelle pour lire la valeur, pendant que les deux autres opérateurs ajustaient la position du mur en fonction des indications données par l'opérateur portant les *HoloLens 2*. Une fois que la position du point se trouvait dans la plage de tolérance souhaitée l'assemblage est renforcé (à l'aide des vis) dans la position enregistrée. Cette étape a été répétée pour le Point 2, en suivant la même procédure. La Figure 5.3 représente le déroulement du test.



Figure 5.3 Déroulement de test en usine

#### 5.2.4 Observations

Lors de ce test nous avons constaté que les manipulations préliminaires associées au référencement de l'environnement et l'alignement peuvent être contraignantes en contexte industriel. En effet, les cibles de référencement nécessaires au *C-Track* pour se localiser dans l'environnement réel peuvent bouger en raison des vibrations, des déplacements fréquents des opérateurs et des manipulations de la charpente de bois. En outre, pendant l'étape de l'assemblage, le plancher est susceptible de bouger (perçage du plancher pour fixer les supports muraux ajustables, le déplacement des opérateurs, etc.) ce qui rend la méthode proposée pour le recalage (alignement des données mesurées et données CAO) peu adaptée au contexte industriel.

L'opérateur qui a réalisé les manipulations avec les *HoloLens 2* a mentionné que les lunettes étaient faciles à utiliser et confortables à porter. Cependant, certaines pistes d'amélioration de l'interface utilisateur ont été identifiées lors des tests. La taille des annotations est très petite. En plus, il a fallu expliquer à l'opérateur l'orientation des axes et la signification des valeurs d'écarts affichées par les annotations à cause de l'absence d'indication des axes de système de coordonnées et de vecteurs de déplacement dans l'interface utilisateur.

### 5.3 Discussion

Suite aux tests de validation effectués au laboratoire et en usine, nous pouvons affirmer que l'utilisation de la métrologie 3D combinée à la réalité augmentée (RA) représente une solution très prometteuse pour intégrer le contrôle de la qualité dans le processus d'assemblage de la structure extérieure des modules en construction modulaire.

Malgré certaines pistes d'amélioration de l'interface utilisateur identifiées lors des tests en usine, la solution proposée permet d'accéder facilement à l'information. En effet, elle permet à l'opérateur de visualiser les résultats des mesures dynamiques projetés sur l'environnement réel, et fournit une indication sur la conformité de la valeur mesurée par rapport aux tolérances permises tout en donnant la liberté à l'opérateur d'interagir avec l'environnement réel.

L'approche proposée facilite également la documentation des résultats de mesure, ce qui améliorera l'accès aux informations sur le contrôle qualité géométrique de la structure extérieure des modules lors des prochaines phases des projets.

L'étude R&R du système de mesure dans la configuration proposée a révélé un ratio maximal de 49% entre l'erreur de R&R et l'intervalle de tolérance spécifié ( $\pm 3$  mm). Cette variation est influencée par l'intervalle imposé lors de l'étape de positionnement ( $\pm 1$  mm) et par l'effet de profondeur de champ des *C-Track*. Pour évaluer de manière plus appropriée les performances métrologiques du système de mesure proposé, il serait plus adapté d'estimer les incertitudes liées aux différents facteurs influençant le système de mesure. Ensuite, d'estimer numériquement l'incertitude totale par une simulation Mont Carlo tel que réalisé par les travaux précédents de (Émond-Girard, 2022) et (Bou-Gebayel, 2023).

Les tests en usine ont mis en évidence certaines difficultés liées aux préparatifs du système de mesure dans un contexte de production réelle, notamment en ce qui concerne le géoréférencement de l'environnement et la méthode d'alignement. De plus, pour couvrir l'ensemble de la station d'assemblage en usine, idéalement, il faudrait combiner quatre *C-Track*, ce qui entraînerait une augmentation significative des coûts. Par conséquent, la

photogrammétrie industrielle telle que fournie par le système *C-Track* ne semble pas être l'équipement de mesure idéal pour l'assemblage assisté par métrologie en construction modulaire.



## CONCLUSION

L'objectif initial de ce projet était de créer *une preuve de concept* d'un système de mesure destiné à assister les opérateurs lors de l'étape de positionnement et d'ajustement des composants lors de l'assemblage de la structure extérieure des modules. Ce système devait garantir la qualité dimensionnelle et géométrique des modules assemblés. Nous considérons avoir atteint cet objectif dans ce travail. En effet, un prototype d'un système de mesure qui combine la photogrammétrie industrielle et la RA a été proposé et validé à travers les tests au laboratoire de métrologie à l'ÉTS et en usine.

Le système proposé permet de suivre, en temps réel, les positions des points d'intérêt et de les comparer aux données nominales représentées par le modèle CAO.

L'écart entre la valeur nominale (cible) et la valeur mesurée (réelle, tel que fabriquée) a été projeté sur l'assemblage réel à l'aide du casque de RA Microsoft-HoloLens 2. La solution proposée a également permis de documenter les résultats des mesures et d'estimer l'incertitude inhérente à l'opération.

Bien que l'étude R&R a montré que la variation du système de mesure est inférieure à la tolérance autorisée (en valeurs absolues), le rapport (valeurs relatives) précision/tolérance est encore plus élevé que ce qui est recommandé. Cependant, la valeur de ce rapport est influencée par le fait que l'opérateur a tenté de positionner les points d'intérêt à l'intérieur d'un intervalle de positionnement fixé à une  $\pm 1$  mm, et qu'un changement de cette dernière directive, induirait inévitablement une modification du rapport précision/tolérance.

En outre, différentes pistes d'améliorations ont été identifiées lors des essais en usine. On peut citer l'optimisation de la géométrie des artefacts de leur système de fixation sur la structure, l'optimisation de l'étape de l'alignement, etc. Ces améliorations peuvent être apportées au système et validées par des essais *in situ* afin d'améliorer les performances métrologiques du système.

Le test réalisé dans le contexte industriel a permis aussi d'identifier quelques contraintes associées à l'implémentation de la solution tel que proposée en contexte *terrain*. Ainsi, le présent projet a permis de définir les lignes directrices nécessaires pour la mise en œuvre future d'un système de contrôle de la qualité combinant la métrologie 3D et la RA et qui permet d'intégrer directement le contrôle de la qualité dans le processus d'assemblage.

En conclusion, nous avons pu démontrer qu'un système qui combine la métrologie 3D sans contact et la RA est une solution très prometteuse pour l'assemblage et le contrôle de qualité hors site en construction modulaire. Toutefois, il convient d'accorder une attention à l'amélioration des performances métrologiques du système proposé. De plus, les efforts déployés au cours de ce projet ont permis de formuler des recommandations éclairées en vue de la future mise en œuvre du projet.



## RECOMMANDATIONS

- Pour mettre en œuvre la solution proposée, la photogrammétrie industrielle a été choisie comme équipement de mesure. L'utilisation de cette technologie, pour assister l'assemblage des modules par mesure en usine, a mis en évidence deux défis majeurs :
  - Le processus de préparation et de mise en marche est relativement complexe et long à réaliser.
  - Les cibles nécessaires pour que l'équipement de photogrammétrie puisse assurer le géoréférencement dans le volume de mesure sont encombrantes, rendant leur installation difficile compte tenu des mouvements des opérateurs et de la manipulation d'éléments de grande taille.

Des solutions logicielles qui permettent d'automatiser le processus de préparation et des formations aux opérateurs peuvent résoudre la première limitation. En ce qui concerne la seconde contrainte, une approche envisageable serait d'intégrer des installations fixes et robustes à l'aménagement de l'usine pour installer les cibles de géoréférencement. Alternativement, l'utilisation d'autres équipements de mesure tels que le système iGPS pourrait être envisagée, et intéressante à explorer, pour la mise en place de la solution.

- L'impression 3D des artefacts peut ajouter des incertitudes de mesures qui n'ont pas été considérées dans le cadre de ce travail. L'erreur associée à la fabrication de l'artefact peut avoir une contribution significative et, par conséquent, les recherches ultérieures devraient porter sur l'optimisation des artefacts. De plus, il est recommandé d'utiliser la géométrie réelle des artefacts tels qu'ils sont fabriqués lors du calcul des données de mesure, afin de réduire au minimum les variations induites par les éléments.
- La solution proposée exige de passer par le logiciel qui communique directement avec l'équipement de mesure (Vx-Elements) et une application intermédiaire afin de réaliser les traitements préliminaires d'alignement et d'assurer l'échange de données en dynamique entre l'équipement de mesure et le logiciel d'inspection. Ce processus peut être contraignant en termes d'expérience utilisateur. Une solution alternative sera de

développer un plugiciel (*plugin*) qui s'intègre directement avec le logiciel d'inspection afin d'améliorer les performances dynamiques de la solution proposée et d'automatiser davantage le flux de données.

- Lors des tests réalisés en usine, nous avons constaté que les informations affichées à travers les lunettes de RA ne sont pas adaptées à l'échelle réelle de l'assemblage (taille de texte et d'annotation). Nous recommandons donc d'améliorer l'interface graphique pour améliorer l'expérience utilisateur en termes d'interaction avec les lunettes de RA. Des améliorations peuvent également être apportées à l'interface utilisateur afin de fournir davantage de conseils visuels tels que des indicateurs directionnels pour signaler les vecteurs de déplacement.

## ANNEXE I

### ARTEFACTS

Le présent annexe donne les illustrations des divers artefacts développés dans le cadre de ce projet. Figure-A I-2, Figure-A I-3, Figure-A I-5 et Figure-A I-6 représentent les conceptions des pièces envisagées pour la première itération d'artefacts. Dans cette première itération, chaque artefact se compose d'une base qui s'attache directement à la structure en bois, ainsi que d'une composante permettant la fixation des cibles rétro réfléchissantes (voir Figure-A I-1). La Figure-A I-7 représente la conception de l'artefact réalisée dans la deuxième itération et retenu pour les tests expérimentaux.

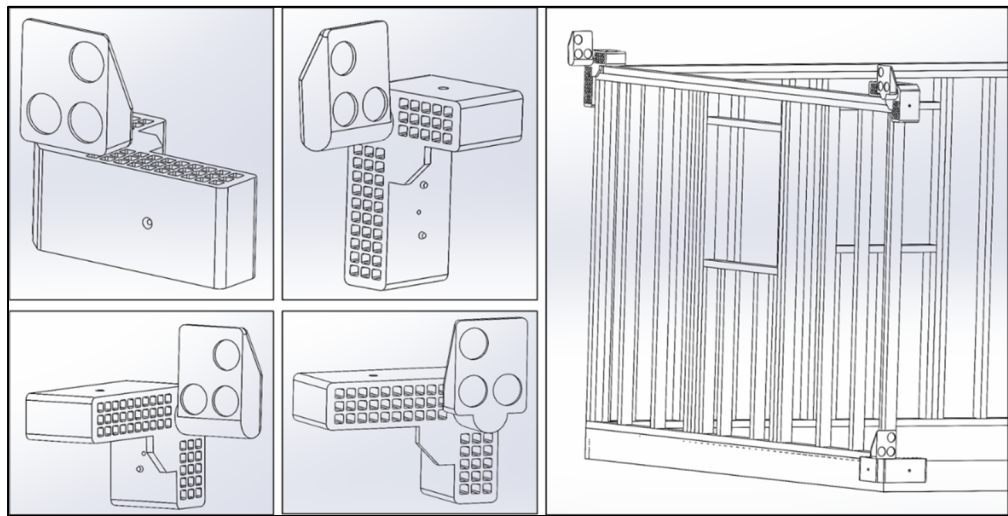


Figure-A I-1 Illustration des différentes configurations obtenues pour la première version d'artefacts

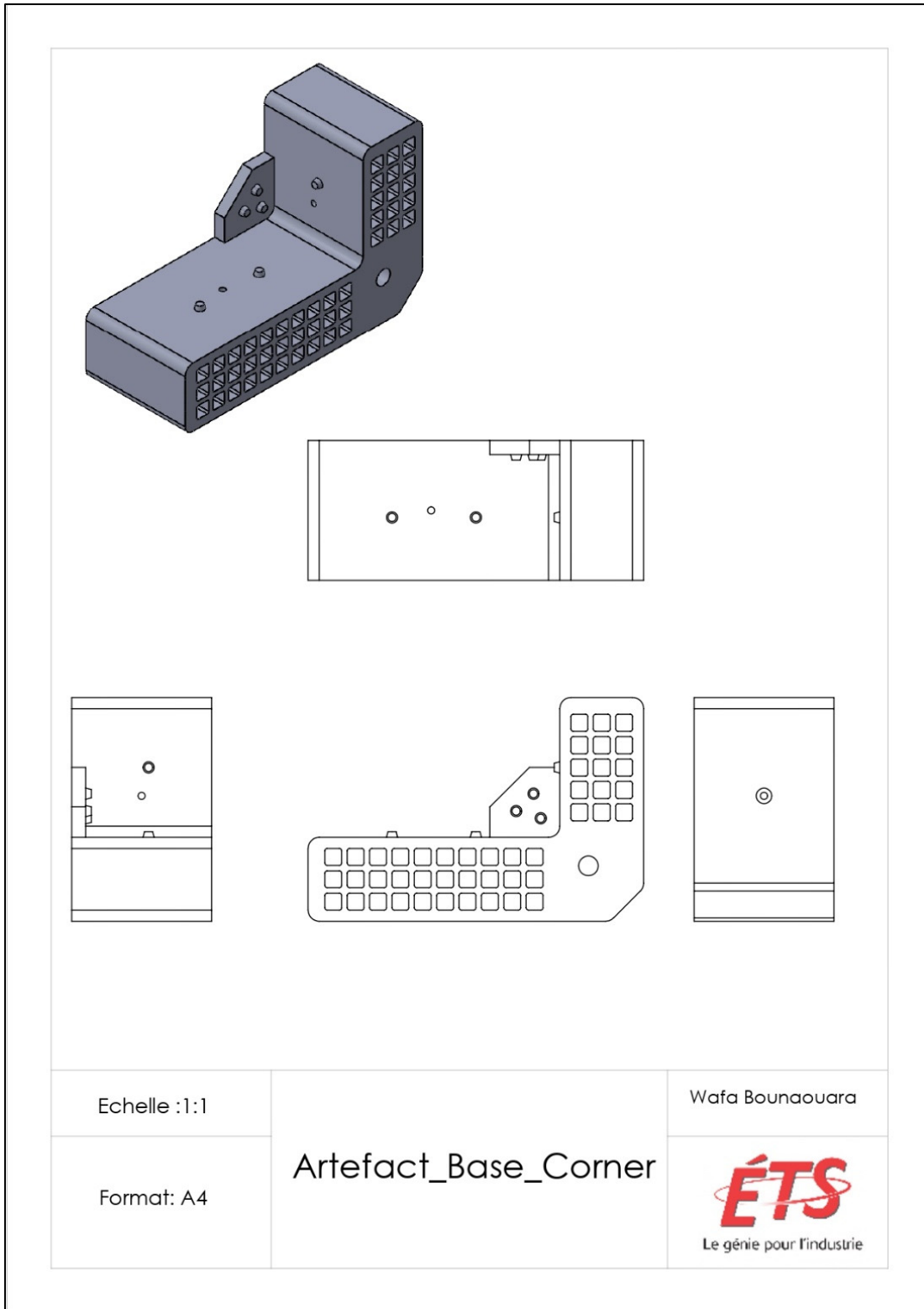


Figure-A I-2 Représentation de l'artefact « Base\_Corner »

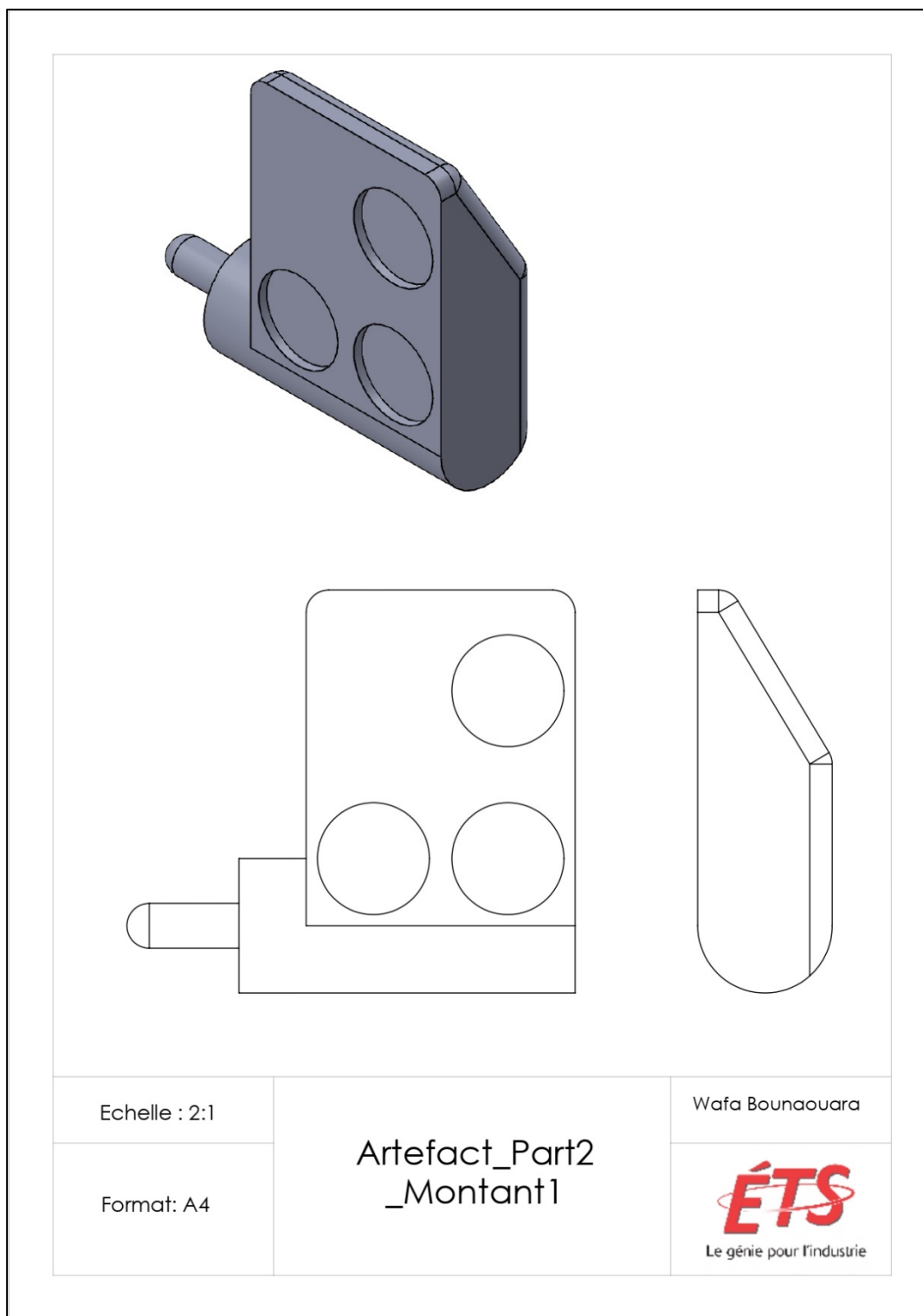


Figure-A I-3 Représentation artefact "part2\_montant1"

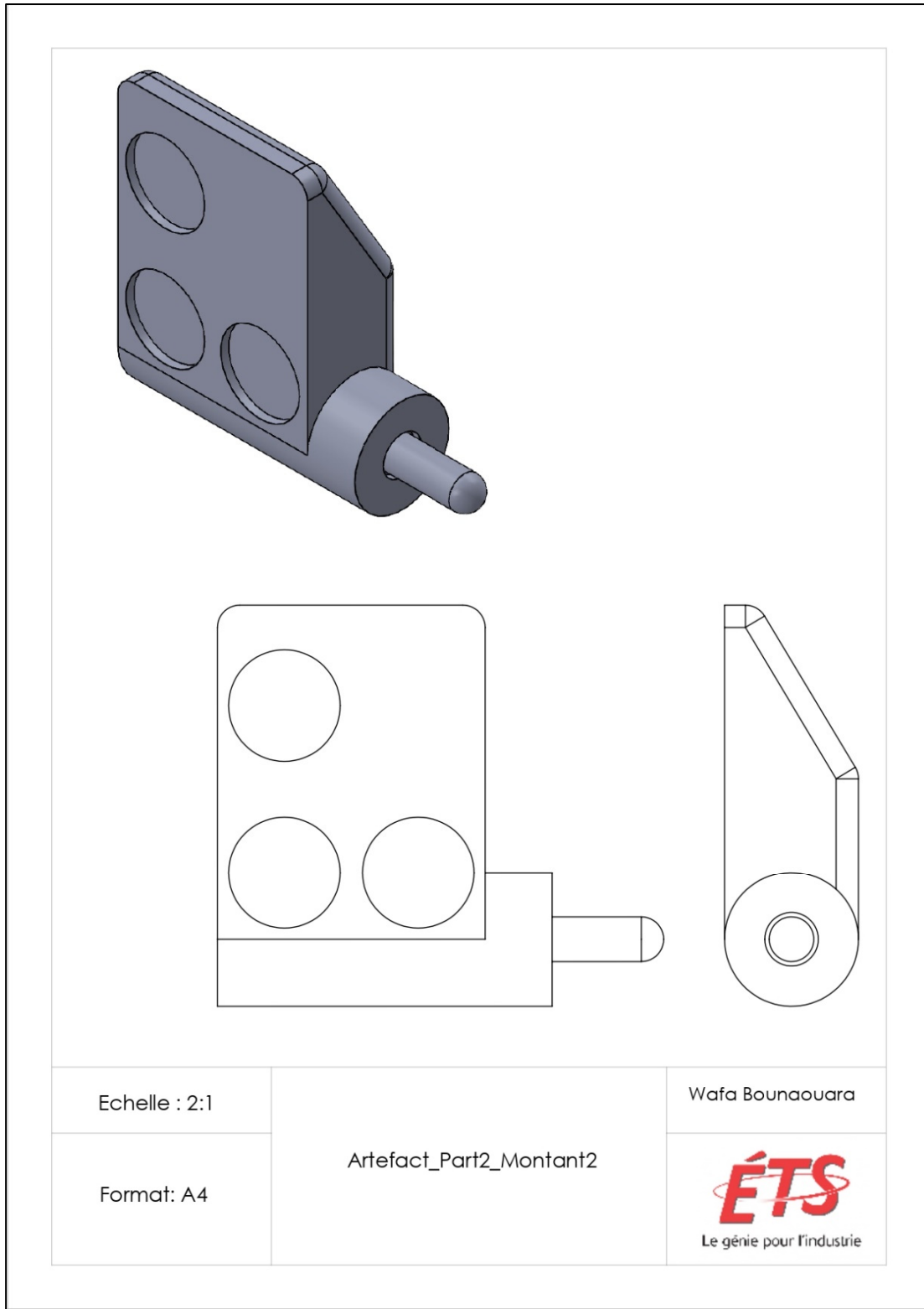


Figure-A I-4 Représentation artefact "Part2\_Montant2"

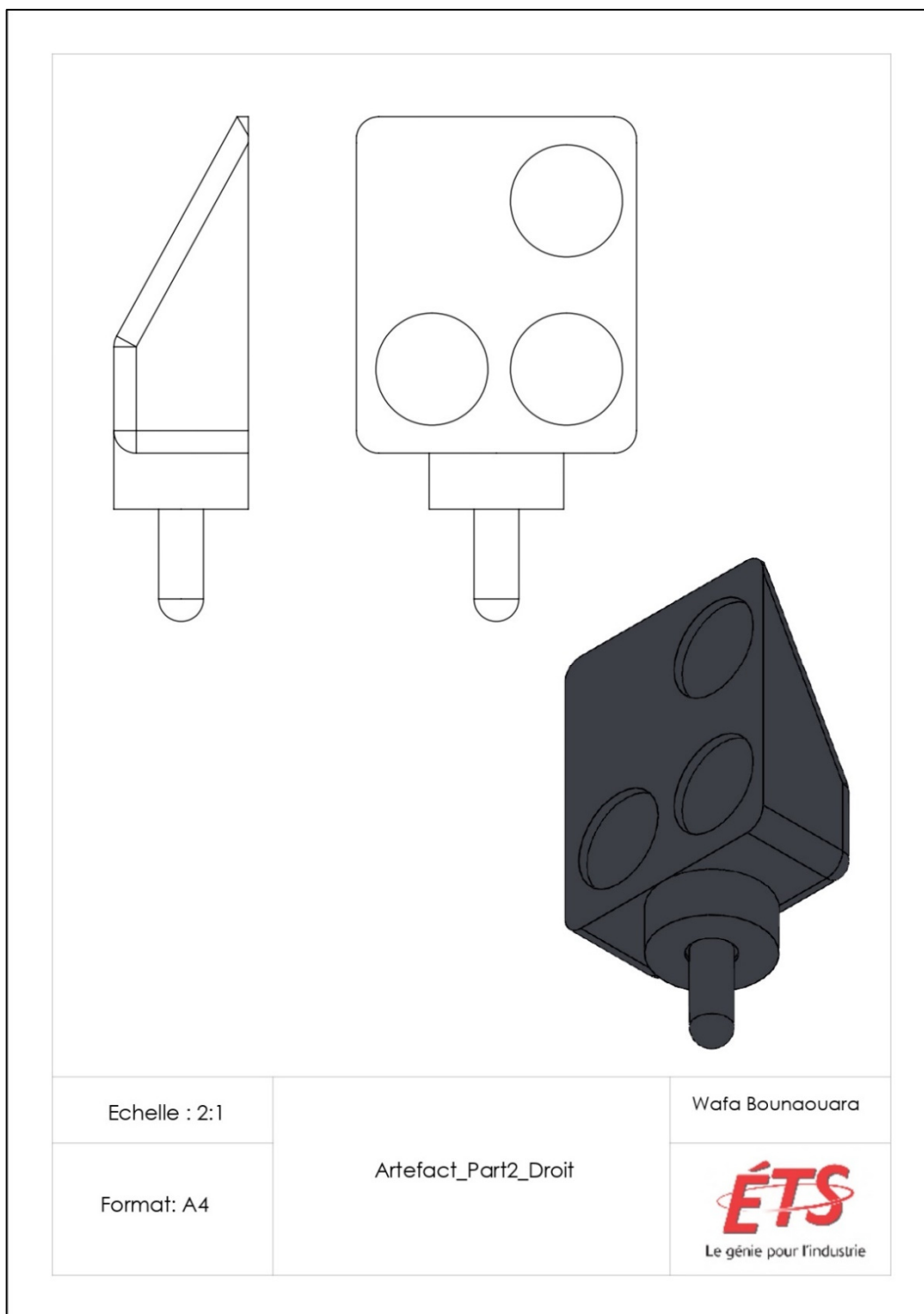


Figure-A I-5 Représentation artefact "Paet2\_plancher"

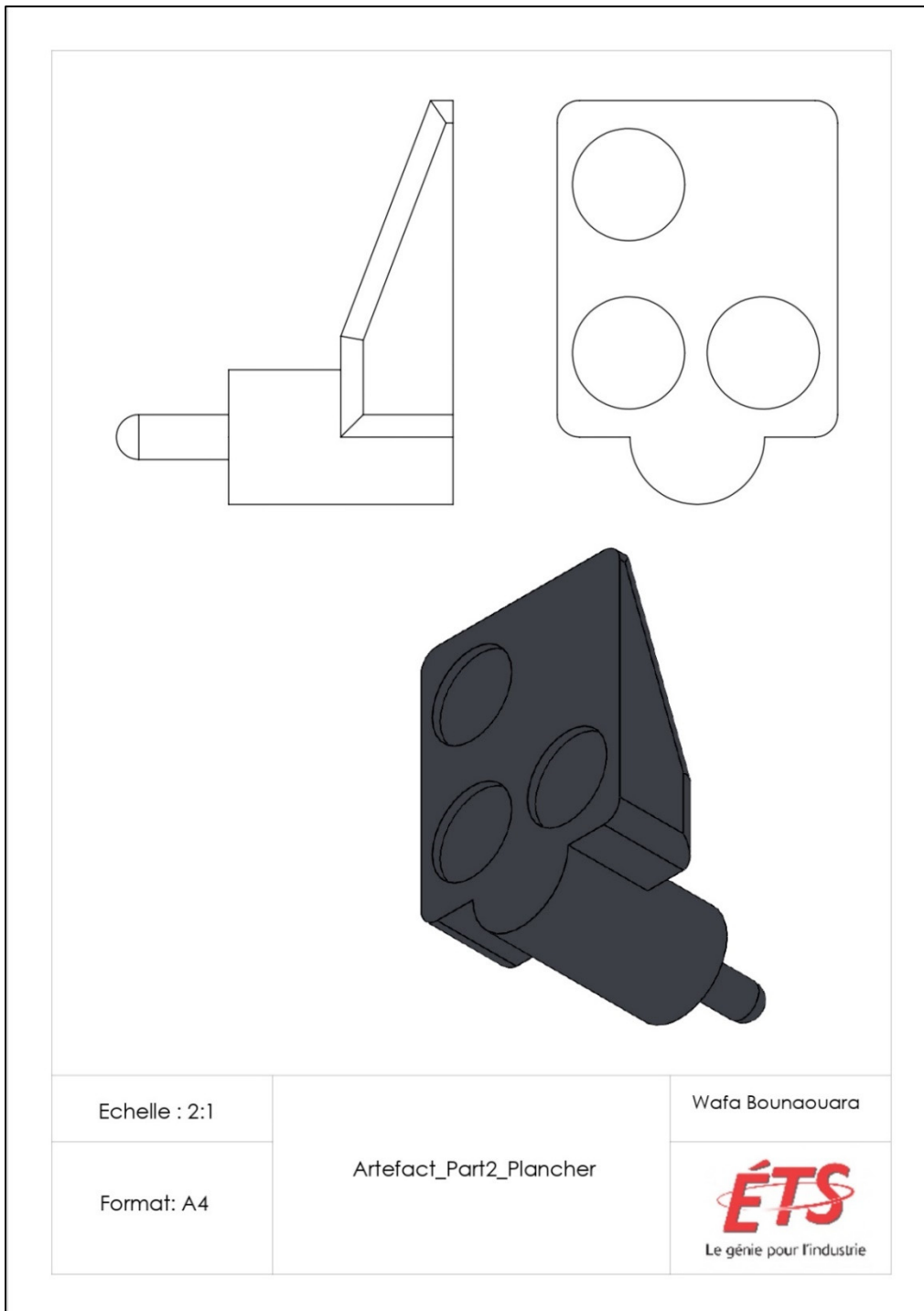


Figure-A I-6 Représentation artefact "part2\_plancher"



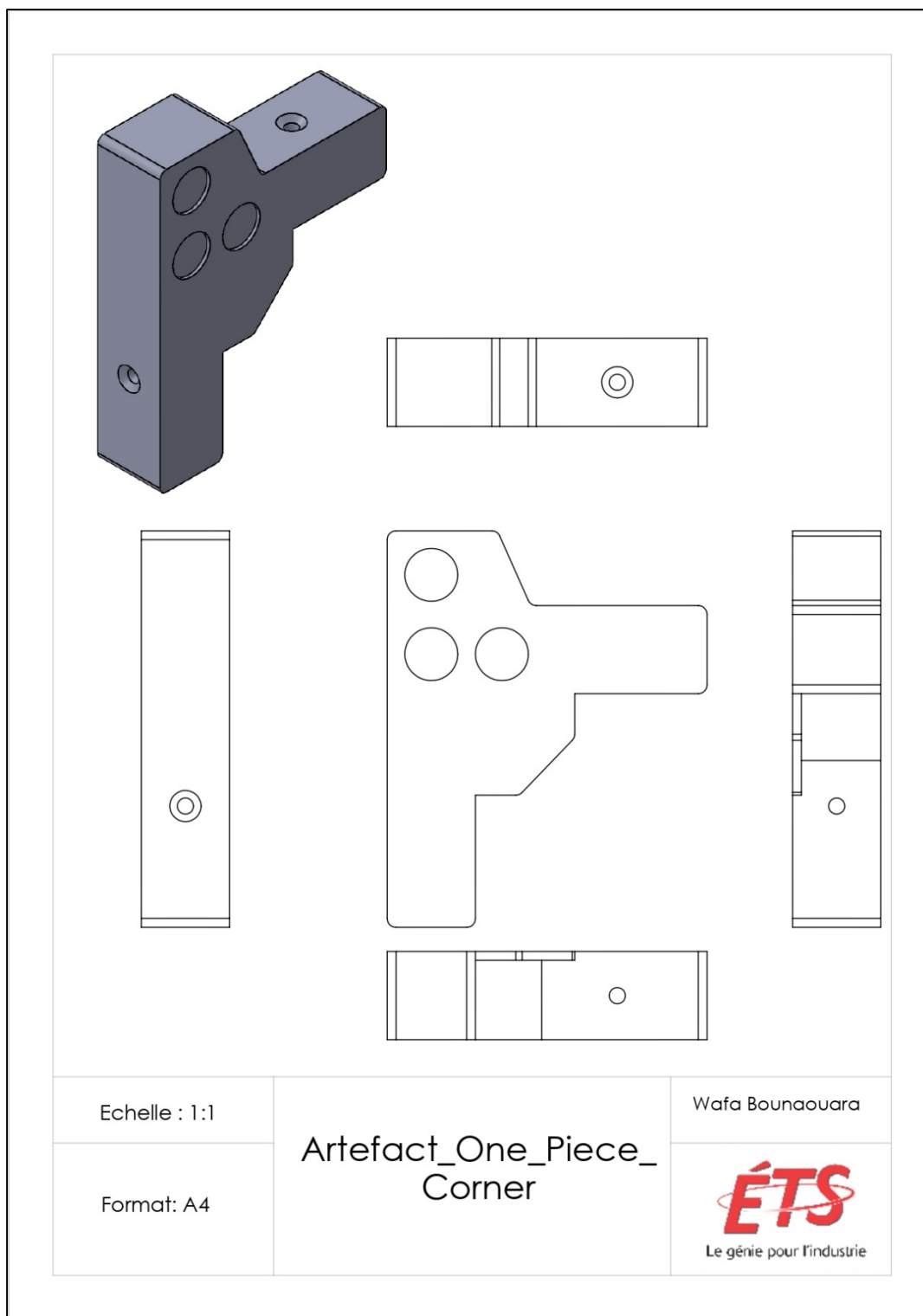


Figure-A I-7 Représentation artefact "One\_part\_corner"



## ANNEXE II

### LES SCRIPTS MACROS

Dans cet annexe les codes qui permettent l'acquisition et le traitement de données ainsi que la création de l'interface graphique affichée sur les *HoloLens2* sont donnés.

Les codes sont des macros scripts développés à l'aide de l'éditeur des macros sur le logiciel *Polyworks*. Le langage de programmation utilisé est le *Macro Script Control Language (MSCL)*. L'approche de la programmation modulaire a été adoptée lors de développement des codes donnés ci-dessous. Ce qui signifie que le code est divisé en plusieurs macros. Où chaque macro est responsable d'une fonction spécifique.

#### Main

```
ECLARE macroPath $0
```

```
SET macroPath "$macroPath:h"
```

#### #LocalVariables

```
DECLARE refrenceObjects
```

#### #Deleting existing shared variables

```
MACRO SHARED_VARIABLE DELETE ("sv_steps")
```

```
MACRO SHARED_VARIABLE DELETE ("sv_currentStep")
```

```
MACRO SHARED_VARIABLE DELETE ("sv_tracking")
```

```
MACRO SHARED_VARIABLE DELETE ("sv_showCad")
```

```
MACRO SHARED_VARIABLE DELETE ("sv_Cad")
```

```
MACRO SHARED_VARIABLE DELETE ("sv_annotationNames")
```

```
MACRO SHARED_VARIABLE DELETE ("sv_testNumber")
```

#### #Creating shared variables

```
MACRO SHARED_VARIABLE CREATE ("sv_steps", {1,2, 3, 4,5})
```

```
MACRO SHARED_VARIABLE CREATE ("sv_currentStep", "2")
```

```
MACRO SHARED_VARIABLE CREATE ("sv_tracking", "On")
```

```

MACRO SHARED_VARIABLE CREATE ("sv_showCad", "On")
MACRO SHARED_VARIABLE CREATE ("sv_annotationNames", {"Pt1", "Pt2"})
TREEVIEW REFERENCE NAME ALL GET ( referenceObjects )
MACRO SHARED_VARIABLE CREATE ("sv_Cad", $referenceObjects)
MACRO SHARED_VARIABLE CREATE ("sv_testNumber", 1)
MACRO EXEC ("$macroPath\windowScript")

```

### window Script

```

DECLARE macroPath $0
SET macroPath "$macroPath:h"

#Declare local variables
DECLARE hologramNames
DECLARE toolbarName
DECLARE buttonName1
DECLARE buttonName2
DECLARE buttonName3

#Delete the existing holograms to avoid duplicated holograms
AUGMENTED_REALITY OBJECT NAME ALL GET ("Hologram", hologramNames)
AUGMENTED_REALITY OBJECT HOLOGRAM DELETE ($hologramNames)

#Create the toolbar
AUGMENTED_REALITY OBJECT HOLOGRAM TOOLBAR CREATE AT_SPECIFIC_POSITION
( "", 1, 3, 0, 0, 0, toolbarName)
AUGMENTED_REALITY OBJECT HOLOGRAM TOOLBAR PROPERTIES PINNED ("Off",
$toolbarName)
AUGMENTED_REALITY OBJECT HOLOGRAM TOOLBAR PROPERTIES TITLE ("",
$toolbarName)
AUGMENTED_REALITY OBJECT HOLOGRAM PROPERTIES COLOR (0, 0, 0,
$toolbarName )

```

### #Create the buttons

```

AUGMENTED_REALITY OBJECT HOLOGRAM BUTTON CREATE ("Démarrer",
", "$macroPath\Demarrer", "", $toolbarName, 1, 1, buttonName1)
AUGMENTED_REALITY OBJECT HOLOGRAM BUTTON CREATE ("Mesurer",
", "$macroPath\Mesurer", "", $toolbarName, 1, 2, buttonName2)
AUGMENTED_REALITY OBJECT HOLOGRAM BUTTON CREATE ("CAD",
"$macroPath\icons\3507597.png", "$macroPath\ShowHideCAD", "",
$toolbarName, 1, 3, buttonName3)

```

### Démarrer

```

DECLARE macroPath $0
SET macroPath "$macroPath:h"

```

### #Declaring local variables to get the sharedVariables values

```

DECLARE sv_CadValue
DECLARE sv_trackingValue
DECLARE sv_currentStepValue
DECLARE sv_testNumberValue
DECLARE sv_annotationNamesValue

```

### #Inputs

```

DECLARE coordinateFile "$macroPath\CoordinatesExport\test.txt"
DECLARE nbArtefacts 2
DECLARE ArtefactGeom {10.000, -8.968, -1.000 }
DECLARE nomTab {0.000, 0.000, 488.315, 733.425, 0.000, 488.315}

```

### #LocalVariables

```

DECLARE COUNTER
DECLARE var1 0
DECLARE var2 0
DECLARE var3 0
DECLARE nominal
DECLARE xActual

```

```

DECLARE yActual
DECLARE zActual
DECLARE ciblesCoor
DECLARE ActualCoor
DECLARE ptfeature
DECLARE ExportFileName
#AugmentedReality Variables
DECLARE annotationNames

#Deleting existing annotations to avoid duplicated annotations
AUGMENTED_REALITY OBJECT NAME ALL GET ("Annotation", annotationNames)
AUGMENTED_REALITY OBJECT HOLOGRAM DELETE ($annotationNames)

MACRO SHARED_VARIABLE GET_VALUE ("sv_currentStep",
sv_currentStepValue)
MACRO SHARED_VARIABLE GET_VALUE ("sv_Cad", sv_CadValue)

#Hide showing CAD holograms
AUGMENTED_REALITY OBJECT PROPERTIES VISIBILITY ("Off", $sv_CadValue)
#Show the current step's CAD
AUGMENTED_REALITY OBJECT PROPERTIES VISIBILITY ("On",
$sv_CadValue[$sv_currentStepValue])

MACRO SHARED_VARIABLE GET_VALUE ("sv_tracking", sv_trackingValue)
MACRO SHARED_VARIABLE GET_VALUE ("sv_testNumber", sv_testNumberValue)

SET ExportFileName
"$macroPath\MeasuredValues\Test${sv_testNumberValue}.txt"

AUGMENTED_REALITY OBJECT HOLOGRAM ANNOTATION CREATE ANCHOR_TO_POINT
(" X: , Y: , Z: ",$nomTab[1], $nomTab[2], $nomTab[3],
sv_annotationNamesValue[1])

```

```

AUGMENTED_REALITY OBJECT HOLOGRAM ANNOTATION CREATE ANCHOR_TO_POINT
(" X:  , Y:  , Z:  ", $nomTab[4], $nomTab[5], $nomTab[6],
sv_annotationNamesValue[2])
MACRO SHARED_VARIABLE SET_VALUE ("sv_annotationNames",
$sv_annotationNamesValue)
MACRO SHARED_VARIABLE SET_VALUE ("sv_tracking", "On")

WHILE $sv_currentStepValue== 2
  MACRO SHARED_VARIABLE GET_VALUE ("sv_tracking", sv_trackingValue)
  IF($sv_trackingValue == "On")

    SET COUNTER 1
    WHILE $COUNTER <= $nbArtefacts
      DATA_FILE READ COLUMNS ($coordinateFile, " ", "On", 2,
13, xActual, yActual, zActual )
      SET var1 EXPR(EXPR($COUNTER-1)*3 +1)
      SET var2 EXPR(EXPR($COUNTER-1)*3 +2)
      SET var3 EXPR(EXPR($COUNTER-1)*3 +3)
      SET          nominal          {$nomTab[$var1],
$nomTab[$var2], $nomTab[$var3]}
      #Extract targets
      MACRO EXEC("$macroPath\IdentifyArtefact", $xActual,
$yActual, $zActual, $nominal, ciblesCoor )
      MACRO EXEC("$macroPath\Meas2Actual", $ciblesCoor,
$ArtefactGeom, ActualCoor )
      #set measure
      SET ptfeature EXPR ($COUNTER)
      MACRO
EXEC("$macroPath\DefineMeasure", "Pt${ptfeature}", $ActualCoor,
$ArtefactGeom)
      #Display
      MACRO
EXEC("$macroPath\DisplayXYZ", $ActualCoor, $sv_annotationNamesValue[$C
OUNTER], "Pt${ptfeature}", $nominal )

```

```

        ++COUNTER
    ENDWHILE
    # wait until file modified or 1 second has elapsed
    DATA_FILE WAIT_UNTIL_MODIFIED ($coordinateFile, 1)
ELSE
    TREEVIEW FEATURE SELECT NONE
    #Select Pt1 and Pt2
    TREEVIEW FEATURE MEASURED SELECT (1, "On")
    TREEVIEW FEATURE MEASURED SELECT (2, "On")
    DATA_FILE CREATE ($ExportFileName)
    FILE      EXPORT_OBJECT      PRIMITIVES_TO_TEXT_FILE      POINTS2
($ExportFileName, "Names + Points")
    ++sv_testNumberValue
    MACRO      SHARED_VARIABLE      SET_VALUE      ("sv_testnumber",
$sv_testNumberValue)
    MACRO END ("No Error" )
ENDIF

ENDWHILE

```

### Mesurer

```
MACRO SHARED_VARIABLE SET_VALUE ( "sv_tracking", "Off" )
```

### ShowHidaCAD

```
DECLARE sv_showCadValue
```

```
DECLARE sv_CadValue
```

```
DECLARE sv_currentStepValue
```

```
MACRO SHARED_VARIABLE GET_VALUE ("sv_showCad", sv_showCadValue)
```

```
MACRO SHARED_VARIABLE GET_VALUE ("sv_Cad", sv_CadValue)
```



```

MACRO      SHARED_VARIABLE      GET_VALUE      ("sv_currentStep",
sv_currentStepValue)

IF $sv_showCadValue == "Off"
    AUGMENTED_REALITY  OBJECT  PROPERTIES  VISIBILITY  (  "On",
$sv_CadValue[$sv_currentStepValue]  )
    MACRO SHARED_VARIABLE SET_VALUE ( "sv_showCad", "On")
ELSE
    AUGMENTED_REALITY  OBJECT  PROPERTIES  VISIBILITY  (  "Off",
$sv_CadValue[$sv_currentStepValue]  )
    MACRO SHARED_VARIABLE SET_VALUE ( "sv_showCad", "Off")
ENDIF

```

### Identify Artifact

#### #Inputs

```

DECLARE Xs $1
DECLARE Ys $2
DECLARE Zs $3
DECLARE nominal $4

```

#### #Locals

```

DECLARE index1 1
DECLARE index2 0
DECLARE dis
DECLARE var

```

#### #Outputs

```

DECLARE ArtTargets

```

```

WHILE ( $index1 <= SIZE(Xs) )

```

```

    SET dis  SQRT(EXPR(POW(EXPR ($Xs[$index1] -
$nominal[1]),2)+POW(EXPR ($Ys[$index1] - $nominal[2]),2)+POW(EXPR
($Zs[$index1] - $nominal[3]),2)))

```

```

IF($dis <= 100)
    SET var EXPR(EXPR($index2*3)+1)
    SET ArtTargets[$var] $Xs[$index1]
    SET var EXPR(EXPR($index2*3)+2)
    SET ArtTargets[$var] $Ys[$index1]
    SET var EXPR(EXPR($index2*3)+3)
    SET ArtTargets[$var] $Zs[$index1]
    ++index2
ENDIF
IF ($index2 == 3)
    BREAK
ENDIF
++index1
ENDWHILE

```

```
MACRO OUTPUT_ARGUMENT (5, $ArtTargets)
```

### Mes2Actual

```
#Locals
```

```
DECLARE c1
```

```
DECLARE c2
```

```
DECLARE c3
```

```
DECLARE counter1 1
```

```
DECLARE counter2 1
```

```
DECLARE t1
```

```
DECLARE t2
```

```
DECLARE xt1
```

```
DECLARE yt1
```

```
DECLARE zt1
```

```
DECLARE xt2
```

```
DECLARE yt2
```

```
DECLARE zt2
```

```
DECLARE index
```

```
DECLARE diff1
```

```
DECLARE diff2
```

```
DECLARE diff3
```

```
DECLARE diff4
```

```
#Input
```

```
DECLARE ptToTransf{$2[1], $2[2], $2[3]}
```

```
DECLARE x_trargets{$1[1], $1[4], $1[7]}
```

```
DECLARE y_trargets {$1[2], $1[5], $1[8]}
```

```
DECLARE z_trargets {$1[3], $1[6], $1[9]}
```

```
#Output
```

```
DECLARE TransPt
```

```
#Identifying the targets c1, c2 and c3 according to the know
```

```
#artefact geometry
```

```
WHILE $counter1 <= 3
```

```
    SET xt1 $x_trargets[$counter1]
```

```
    SET yt1 $y_trargets[$counter1]
```

```
    SET zt1 $z_trargets[$counter1]
```

```
    SET t1 {$xt1, $yt1, $zt1}
```

```
    DECLARE distances
```

```
    SET counter2 1
```

```
    SET index 1
```

```
    WHILE $counter2 <= 3
```

```
        SET xt2 $x_trargets[$counter2]
```

```
        SET yt2 $y_trargets[$counter2]
```

```
        SET zt2 $z_trargets[$counter2]
```

```
        SET t2 {$xt2, $yt2, $zt2}
```

```
        IF $t1!= $t2
```

```

        SET distances[$index] SQRT( EXPR ( POW(EXPR($xt1-$xt2),
2 ) + POW (EXPR($yt1-$yt2), 2 )+ POW (EXPR($zt1-$zt2), 2 )))
        ++index
    ENDIF

    ++COUNTER2

ENDWHILE

SET diff1 EXPR($distances[1]- 18 )
SET diff2 EXPR($distances[2]- 16 )
SET diff3 EXPR($distances[2]- 18 )
SET diff4 EXPR($distances[1]- 16 )
IF ($diff1 <=1 AND $diff2 <=1 )OR ( $diff3 <=1 AND $diff4 <=1 )
    SET c1 $t1
ELSE
    SET diff1 EXPR($distances[1]- 16 )
    SET diff2 EXPR($distances[2]- 24.08 )
    SET diff3 EXPR($distances[2]- 16 )
    SET diff4 EXPR($distances[1]- 24.08 )
    IF ($diff1 <=1 AND $diff2 <=1 )OR ( $diff3 <=1 AND $diff4
<=1 )
        SET c2 $t1
    ELSE
        SET c3 $t1
    ENDIF
ENDIF

++counter1

ENDWHILE

##For debugging purposes
#MACRO EXEC("$macroPath\DefineMeasure","c1", $c1 )
#MACRO EXEC("$macroPath\DefineMeasure","c2", $c2 )

```

```

#MACRO EXEC("$macroPath\DefineMeasure","c3", $c3 )

#Matrix transformation to calculate the 3D coordinates of a point of
#interest from the coordinates of the three targets of the
#corresponding artefact

DECLARE vect1
DECLARE vect2
DECLARE vect3

DECLARE norm_vect1
DECLARE norm_vect2
DECLARE norm_vect3

SET vect1[1]  EXPR ($c2[1]-$c1[1])
SET vect1[2]  EXPR ($c2[2]-$c1[2])
SET vect1[3]  EXPR ($c2[3]-$c1[3])

SET vect2[1]  EXPR ($c3[1]-$c1[1])
SET vect2[2]  EXPR ($c3[2]-$c1[2])
SET vect2[3]  EXPR ($c3[3]-$c1[3])

SET vect3[1]  EXPR ($vect1[2]*$vect2[3]- $vect1[3]*$vect2[2])
SET vect3[2]  EXPR ($vect1[3]*$vect2[1]- $vect1[1]*$vect2[3])
SET vect3[3]  EXPR ($vect1[1]*$vect2[2]- $vect1[2]*$vect2[1])

SET norm_vect1 sqrt ( EXPR ($vect1[1]*$vect1[1])
+($vect1[2]*$vect1[2])+($vect1[3]*$vect1[3]))
SET norm_vect2 sqrt ( EXPR ($vect2[1]*$vect2[1])
+($vect2[2]*$vect2[2])+($vect2[3]*$vect2[3]))
SET norm_vect3 sqrt ( EXPR ($vect3[1]*$vect3[1])
+($vect3[2]*$vect3[2])+($vect3[3]*$vect3[3]))

SET vect1[1]  EXPR ($vect1[1]/$norm_vect1)
SET vect1[2]  EXPR ($vect1[2]/$norm_vect1)

```

```

SET vect1[3]  EXPR  ($vect1[3]/$norm_vect1)

SET vect2[1]  EXPR  ($vect2[1]/$norm_vect2)
SET vect2[2]  EXPR  ($vect2[2]/$norm_vect2)
SET vect2[3]  EXPR  ($vect2[3]/$norm_vect2)

SET vect3[1]  EXPR  ($vect3[1]/$norm_vect3)
SET vect3[2]  EXPR  ($vect3[2]/$norm_vect3)
SET vect3[3]  EXPR  ($vect3[3]/$norm_vect3)

SET TransPt[1]  EXPR  ($vect1[1]*$ptToTransf[1] +
  $vect2[1]*$ptToTransf[2] + $vect3[1]*$ptToTransf[3] +$c1[1])
SET TransPt[2]  EXPR  ($vect1[2]*$ptToTransf[1] +
  $vect2[2]*$ptToTransf[2] + $vect3[2]*$ptToTransf[3] +$c1[2])
SET TransPt[3]  EXPR  ($vect1[3]*$ptToTransf[1] +
  $vect2[3]*$ptToTransf[2] + $vect3[3]*$ptToTransf[3] +$c1[3])

MACRO OUTPUT_ARGUMENT (3, $TransPt )

```

### Define Measure

```

#Local
DECLARE PointName $1
DECLARE Value $2

#Align to the measrments coordinate system Only necessary if different
coordinate system was defined in the project
#TREEVIEW COORDINATE_SYSTEM SELECT ( 2, "On" )
#ALIGN COORDINATE_SYSTEM ACTIVE ( )
#TREEVIEW OBJECT SELECT NONE

```

```
FEATURE PRIMITIVE POINT CREATE ($Value[1], $Value[2], $Value[3],  
"Measured", $PointName)
```

### DisplayXYZ

```
## Align to the hololens coordinate system Only necessary if the  
project includ multiplecoordinates systems
```

```
#TREEVIEW COORDINATE_SYSTEM SELECT ( 1, "On" )
```

```
#ALIGN COORDINATE_SYSTEM ACTIVE ( )
```

```
#TREEVIEW OBJECT SELECT NONE
```

```
AUGMENTED_REALITY OBJECT HOLOGRAM ANNOTATION PROPERTIES TEXT ( " X :  
${deltax}, Y : ${deltay}, Z : ${deltaz}", $annotationName )
```

```
MEASURE CONTROL COUNT FAIL GET (objFail, $3)
```

```
IF $objFail > 0
```

```
    AUGMENTED_REALITY OBJECT HOLOGRAM PROPERTIES COLOR ( 255, 0, 0,  
$annotationName )
```

```
Else
```

```
    AUGMENTED_REALITY OBJECT HOLOGRAM PROPERTIES COLOR ( 0, 255, 0,  
$annotationName )
```

```
ENDIF
```





## ANNEXE III

### RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Tableau-A III-1 Résultats de l'étude R&R

Ordre Essai	Points	Opérateurs	x	y	z
1	Point 1	1	-0,5950	-0,4480	488,5240
2	Point 2	1	733,4990	-0,6290	487,2560
3	Point 2	2	733,3070	-0,7020	487,2910
4	Point 1	2	-0,7740	-0,2320	488,5430
5	Point 1	1	-0,4220	-0,1030	488,5360
6	Point 2	1	733,6690	0,6850	487,2640
7	Point 1	1	0,1250	-0,7300	488,5600
8	Point 2	1	734,3070	0,6950	487,2550
9	Point 2	2	734,0850	0,2770	487,2950
10	Point 1	2	-0,0117	-0,5700	488,5380
11	Point 2	1	733,6370	0,8660	487,1020
12	Point 1	1	-0,2750	-0,8820	488,7920
13	Point 1	1	-0,4220	0,3160	488,8660
14	Point 2	1	733,5120	0,2340	487,0350
15	Point 1	1	0,1170	-0,4500	488,8590
16	Point 2	1	734,0540	-0,5250	486,9990
17	Point 1	1	0,1520	-0,8850	488,7860
18	Point 2	1	734,0850	0,5050	487,2470
19	Point 1	2	-0,0493	0,7260	488,5110
20	Point 2	2	734,0410	0,4690	487,2550
21	Point 1	2	-0,0630	-0,7570	488,6300
22	Point 2	2	733,9530	-0,4940	487,2170
23	Point 2	1	733,9450	-0,4880	487,0170
24	Point 1	1	-0,0070	-0,6170	488,7990
25	Point 1	2	-0,6260	0,0550	488,6830
26	Point 2	2	733,3470	-0,7970	487,3170
27	Point 1	2	0,0970	-0,0410	488,5580
28	Point 2	2	734,1760	-0,3380	487,2870
29	Point 2	2	733,7210	-0,8340	487,2940
30	Point 1	2	-0,2590	-0,0430	488,6260
31	Point 2	1	734,212	-0,102	487,073
32	Point 1	1	0,277	-0,867	488,811
33	Point 1	1	-0,581	-0,489	488,789
34	Point 2	1	733,353	-0,129	487,044

Tableau-A III-2 Résultats de l'étude R&amp;R (suite)

Ordre Essai	Points	Opérateurs	x	y	z
35	Point 2	1	734,366	-0,138	487,048
36	Point 1	1	0,429	-0,494	488,801
37	Point 2	2	734,281	-0,412	487,247
38	Point 1	2	0,114	0,15	488,214
39	Point 1	2	-0,601	-0,314	488,519
40	Point 2	2	733,523	0,254	487,269
41	Point 1	1	-0,019	-0,492	488,795
42	Point 2	1	733,922	-0,13	487,042
43	Point 1	2	-0,484	0,935	488,541
44	Point 2	2	733,612	-0,291	487,252
45	Point 2	2	734,178	-0,415	487,267
46	Point 1	2	0,099	-0,303	488,494
47	Point 1	2	-0,771	-0,899	488,517
48	Point 2	2	733,329	-0,578	487,292
49	Point 2	1	733,582	-0,099	487,121
50	Point 1	1	-0,378	-0,606	488,398
51	Point 2	1	734,23	-0,005	487,011
52	Point 1	1	0,291	-0,739	488,879
53	Point 1	1	-0,295	0,106	488,878
54	Point 2	1	733,641	-0,014	487,032
55	Point 2	2	733,492	-0,429	487,259
56	Point 1	2	-0,607	-0,258	488,531
57	Point 2	1	733,949	-0,063	487,024
58	Point 1	1	0,024	0,112	488,866
59	Point 1	1	0,156	0,381	488,861
60	Point 2	1	734,064	-0,044	487,019
61	Point 1	2	0,276	-0,078	488,831
62	Point 2	2	734,22	0,506	487,072
63	Point 2	1	734,194	0,306	487,017
64	Point 1	1	0,246	-0,103	488,846
65	Point 1	1	0,343	0,251	488,859
66	Point 2	1	734,272	0,418	487,03
67	Point 2	1	733,894	0,462	487,027
68	Point 1	1	-0,069	0,003	488,833
69	Point 1	2	0,12	0,547	488,831
70	Point 2	2	734,059	-0,188	487,11
71	Point 2	2	733,842	0,066	487,073
72	Point 1	2	-0,091	0,016	488,794

Tableau-A III-3 Résultats de l'étude R&amp;R (suite)

Ordre Essai	Points	Opérateurs	x	y	z
73	Point 1	1	-0,132	-0,093	488,821
74	Point 2	1	733,809	0,15	487,086
75	Point 2	2	733,868	0,405	487,069
76	Point 1	2	-0,034	-0,526	488,831
77	Point 2	2	733,961	0,163	487,082
78	Point 1	2	0,027	0,206	488,814
79	Point 2	2	733,589	-0,161	487,081
80	Point 1	2	-0,338	-0,068	488,824
81	Point 2	1	733,818	0,355	487,21
82	Point 1	1	-0,132	0,33	488,277
83	Point 1	2	0,398	0,166	488,836
84	Point 2	2	734,321	0,022	487,085
85	Point 2	1	733,608	-0,134	487,086
86	Point 1	1	-0,327	0,486	488,841
87	Point 1	2	0,19	0,124	488,851
88	Point 2	2	734,124	0,016	487,05
89	Point 1	2	-0,475	0,824	488,838
90	Point 2	2	733,466	-0,555	487,102
91	Point 2	1	734,097	-0,107	487,089
92	Point 1	1	0,153	0,496	488,84
93	Point 1	2	-0,347	-0,803	488,812
94	Point 2	2	733,629	0,038	487,037
95	Point 1	2	-0,867	0,182	488,84
96	Point 2	2	733,067	-0,881	487,064
97	Point 1	1	0,403	0,528	488,843
98	Point 2	1	734,326	-0,156	487,086
99	Point 1	2	-0,28	0,144	488,838
100	Point 2	2	733,655	-0,139	487,027
101	Point 2	1	733,93	0,462	487,106
102	Point 1	1	0,007	0,614	488,855
103	Point 2	2	733,714	-0,193	487,077
104	Point 1	2	-0,221	-0,571	488,831
105	Point 2	1	733,655	0,471	487,102
106	Point 1	1	-0,271	0,65	488,857
107	Point 2	2	733,429	0,586	487,104
108	Point 1	2	-0,506	0,973	488,867
109	Point 2	2	734,299	-0,691	487,035
110	Point 1	2	0,357	0,158	488,825

Tableau-A III-4 Résultats de l'étude R&amp;R (suite)

Ordre Essai	Points	Opérateurs	x	y	z
111	Point 1	2	0,324	0,299	488,834
112	Point 2	2	734,259	-0,467	487,046
113	Point 1	2	-0,003	0,578	488,828
114	Point 2	2	733,922	-0,982	487,012
115	Point 1	1	-0,535	0,606	488,851
116	Point 2	1	733,382	0,445	487,097
117	Point 2	1	734,366	0,473	487,103
118	Point 1	1	0,425	0,679	488,846
119	Point 1	1	-0,143	0,677	488,866
120	Point 2	1	734,366	0,055	487,096
121	Point 1	2	0,062	0,667	488,858
122	Point 2	2	733,983	-0,735	487,082
123	Point 2	2	733,976	0,192	487,077
124	Point 1	2	0,029	0,659	488,838
125	Point 1	1	0,344	0,239	488,821
126	Point 2	1	734,302	-0,496	487,114
127	Point 2	2	734,181	-0,447	487,033
128	Point 1	2	0,237	-0,429	488,828
129	Point 2	1	734,164	-0,475	487,108
130	Point 1	1	0,228	-0,043	488,851
131	Point 2	1	733,464	-0,453	487,106
132	Point 1	1	-0,655	-0,291	488,609
133	Point 2	1	733,989	0,136	487,1
134	Point 1	1	0,057	-0,1	488,858
135	Point 1	2	0,246	0,454	488,846
136	Point 2	2	734,179	-0,68	487,068
137	Point 1	2	0,157	0,048	488,837
138	Point 2	2	734,089	0,116	487,038
139	Point 1	1	-0,329	-0,063	488,819
140	Point 2	1	733,587	0,101	487,094
141	Point 2	2	734,143	-0,948	487,069
142	Point 1	2	0,208	-0,165	488,844
143	Point 1	1	0,327	-0,067	488,841
144	Point 2	1	734,292	0,086	487,103
145	Point 2	2	734,001	-0,285	487,099
146	Point 1	2	0,057	0,2	488,838
147	Point 1	1	-0,213	-0,159	488,862
148	Point 2	1	733,722	0,636	487,102

## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ahn, SangJun, SangUk Han et Mohamed Al-Hussein. 2019. « 2D Drawing Visualization Framework for Applying Projection-Based Augmented Reality in a Panelized Construction Manufacturing Facility: Proof of Concept ». *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 33, n° 5, p. 04019032. <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000843](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000843)>. Consulté le 17 avril 2023.
- Automotive Industry Action Group (AIAG). 2010. *Measurement Systems Analysis: reference manual*, 4. ed. S.l. : Chrysler Group, 230 p.
- Bae, JuHyeon et SangUk Han. 2021. « Vision-Based Inspection Approach Using a Projector-Camera System for Off-Site Quality Control in Modular Construction: Experimental Investigation on Operational Conditions ». *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 35, n° 5, p. 04021012. <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000978](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000978)>. Consulté le 17 mai 2023.
- Barfield, Woodrow et Thomas Caudell, éd. 2001. *Fundamentals of wearable computers and augmented reality*. Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, 797 p.
- Bimber, Oliver et Ramesh Raskar. 2006. « Modern approaches to augmented reality ». In *ACM SIGGRAPH 2006 Courses*. (New York, NY, USA, 30 juillet 2006), p. 1- es. Association for Computing Machinery. <<https://doi.org/10.1145/1185657.1185796>>. Consulté le 16 juin 2022.
- Boesemann, Werner. 2003. « Photogrammetry in the line: recent developments in industrial photogrammetry ». In *Optical Metrology*. (Munich, Germany, 28 mai 2003), p. 758. <<https://doi.org/10.1117/12.499418>>. Consulté le 4 juillet 2022.
- Bou Gebrayel, Jad. 2023. « Contribution à l'évaluation de l'incertitude dimensionnelle durant une opération d'assemblage assisté par métrologie 3D ». masters, École de technologie supérieure, 170 p. <<https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/3273/>>. Consulté le 15 septembre 2023.
- Bureau International des poids et mesures. 2008. *Évaluation des données de mesure — Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*.
- Chen, Zhehan et Fuzhou Du. 2017. « Measuring principle and uncertainty analysis of a large volume measurement network based on the combination of iGPS and portable scanner ». *Measurement*, vol. 104, p. 263-277. <<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.03.037>>. Consulté le 31 janvier 2022.
- Chiew, Jin Hong et Aun Naa Sung. 2022. « Augmented reality application for laptop assembly with assembly complexity study ». *The International Journal of Advanced*

*Manufacturing Technology*, vol. 120, n° 1-2, p. 1149-1167.  
<<https://doi.org/10.1007/s00170-022-08751-x>>. Consulté le 15 avril 2022.

Cognet, Bruno, Antoine Tahan et Louis Rivest. 2020. *Projet d'intervention en entreprise Identification des alternatives technologiques pour une station de contrôle dimensionnel pour bâtiment modulaire Portrait initial du projet*.

Creaform. 2022. *Vxelements User Manual vesion 10.0.1*.

Drouot, Adrien, Ran Zhao, Lucas Irving, David Sanderson et Svetan Ratchev. 2018. « Measurement assisted assembly for high accuracy aerospace manufacturing ». <<https://nottingham-repository.worktribe.com/output/937182/measurement-assisted-assembly-for-high-accuracy-aerospace-manufacturing>>. Consulté le 13 juin 2022.

Émond-Girard, Laurent. 2022. « Analyse de l'erreur du positionnement assisté par la métrologie 3D sans contact ». masters, École de technologie supérieure, 200 p. <<https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/3011/>>. Consulté le 11 avril 2023.

FARO. 2022. « FARO® Visual Inspect™ Software | FARO ». <<https://www.faro.com/en/Products/Software/Visual-Inspect-Augmented-Reality>>. Consulté le 17 juin 2022.

Franceschini, Fiorenzo, Maurizio Galetto, Domenico Maisano et Luca Mastrogiacomo. 2009. « Mobile Spatial coordinate Measuring System (MScMS) - Introduction to the system ». *International Journal of Production Research*, vol. 47, p. 3867-3889. <<https://doi.org/10.1080/00207540701881852>>.

Franceschini, Fiorenzo, Maurizio Galetto, Domenico Maisano et Luca Mastrogiacomo. 2014. « Large-scale dimensional metrology (LSDM): from tapes and theodolites to multi-sensor systems ». *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 15, n° 8, p. 1739-1758. <<https://doi.org/10.1007/s12541-014-0527-2>>. Consulté le 14 août 2023.

Franceschini, Fiorenzo, Maurizio Galetto, Domenico Maisano et Luca Mastrogiacomo. 2015. « Combining multiple Large Volume Metrology systems: Competitive versus cooperative data fusion ». *Precision Engineering*, vol. 43, p. 514-524. <<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.09.014>>. Consulté le 10 octobre 2021.

Franceschini, Fiorenzo, Maurizio Galetto, Domenico Maisano, Luca Mastrogiacomo et Barbara Pralio. 2011. « Large-Scale Dimensional Metrology: The New Paradigm of Distributed Systems ». In *Distributed Large-Scale Dimensional Metrology: New Insights*, sous la dir. de Franceschini, Fiorenzo, Maurizio Galetto, Domenico Maisano, Luca Mastrogiacomo et Barbara Pralio, p. 1-22. London : Springer. <[https://doi.org/10.1007/978-0-85729-543-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-0-85729-543-9_1)>. Consulté le 24 mars 2023.

- Horswell, J. 2013. « Recording ». In *Encyclopedia of Forensic Sciences (Second Edition)*, sous la dir. de Siegel, Jay A., Pekka J. Saukko et Max M. Houck, p. 368-371. Waltham : Academic Press. <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382165-2.00207-5>>. Consulté le 13 août 2023.
- InnovMetric. 2022. « PolyWorks|AR™ ». In *InnovMetric Software*. <<https://www.innovmetric.com/products/polyworks-ar>>. Consulté le 20 juin 2022.
- Kim, Min-Koo, Qian Wang, Seongheum Yoon et Hoon Sohn. 2019. « A mirror-aided laser scanning system for geometric quality inspection of side surfaces of precast concrete elements ». *Measurement*, vol. 141, p. 420-428. <<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.060>>. Consulté le 17 mai 2023.
- Klaas, Erik, Arun Chhabra et Pia Böttcher. 2013. « Usability engineering: The surface becomes the (touch) screen ». *Usability Engineering*, p. 12.
- Maisano, D A, J Jamshidi, F Franceschini, P G Maropoulos, L Mastrogiacomo, A R Mileham et G W Owen. 2009. « A comparison of two distributed large-volume measurement systems: The mobile spatial co-ordinate measuring system and the indoor global positioning system ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 223, n° 5, p. 511-521. <<https://doi.org/10.1243/09544054JEM1271>>. Consulté le 25 mars 2023.
- Maisano, Domenico A., Luca Mastrogiacomo, Fiorenzo Franceschini, Salvatore Capizzi, Gianandrea Pischetta, Daniele Laurenza, Giorgio Gomiero et Giuseppe Manca. 2023. « Dimensional measurements in the shipbuilding industry: on-site comparison of a state-of-the-art laser tracker, total station and laser scanner ». *Production Engineering*, vol. 17, n° 3, p. 625-642. <<https://doi.org/10.1007/s11740-022-01170-7>>. Consulté le 12 août 2023.
- Maropoulos, P. G., J. E. Muelaner, M. D. Summers et O. C. Martin. 2014. « A new paradigm in large-scale assembly—research priorities in measurement assisted assembly ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 70, n° 1-4, p. 621-633. <<https://doi.org/10.1007/s00170-013-5283-4>>. Consulté le 18 avril 2022.
- Muelaner, Jody E et Paul G Maropoulos. 2010. « Design for measurement assisted determinate assembly (MADA) of large composite structures ». *Journal of the Coordinate Metrology Systems Conference*. <<http://www.cmssc.org/>>. Consulté le 21 août 2023.
- Muelaner, Jody, Amir Kayani, Oliver Martin et Paul Maropoulos. 2011. « MEASUREMENT ASSISTED ASSEMBLY AND THE ROADMAP TO PART- TO-PART ASSEMBLY ».
- Muralikrishnan, Bala, Steve Phillips et Daniel Sawyer. 2016. « Laser trackers for large-scale dimensional metrology: A review ». *Precision Engineering*, vol. 44, p. 13-28. <<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.12.001>>. Consulté le 10 octobre 2021.

- Park, Sebeom, Shokhrukh Bokijonov et Yosoon Choi. 2021. « Review of Microsoft HoloLens Applications over the Past Five Years ». *Applied Sciences*, vol. 11, n° 16, p. 7259. <<https://doi.org/10.3390/app11167259>>. Consulté le 31 janvier 2022.
- Peddie, Jon. 2017. « Technology Issues ». In *Augmented Reality: Where We Will All Live*, sous la dir. de Peddie, Jon, p. 183-289. Cham : Springer International Publishing. <[https://doi.org/10.1007/978-3-319-54502-8\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-54502-8_8)>. Consulté le 29 mai 2023.
- Peggs, G N, P G Maropoulos, E B Hughes, A B Forbes, S Robson, M Ziebart et B Muralikrishnan. 2009. « Recent developments in large-scale dimensional metrology ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 223, n° 6, p. 571-595. <<https://doi.org/10.1243/09544054JEM1284>>. Consulté le 2 juillet 2022.
- Qi, Bing, Mohamad Razkenari, Aaron Costin, Charles Kibert et Meiqing Fu. 2021. « A systematic review of emerging technologies in industrialized construction ». *Journal of Building Engineering*, vol. 39, p. 102265. <<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102265>>. Consulté le 20 août 2023.
- Qin, Y., E. Bloomquist, T. Bulbul, J. Gabbard et K. Tanous. 2021. « Impact of information display on worker performance for wood frame wall assembly using AR HMD under different task conditions ». *Advanced Engineering Informatics*, vol. 50, p. 101423. <<https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101423>>. Consulté le 30 mars 2022.
- Rausch, Christopher, Ruodan Lu, Saeed Talebi et Carl Haas. 2023. « Deploying 3D scanning based geometric digital twins during fabrication and assembly in offsite manufacturing ». *International Journal of Construction Management*, vol. 23, n° 3, p. 565-578. <<https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1896942>>. Consulté le 19 mai 2023.
- Schmitt, R. H., M. Peterek, E. Morse, W. Knapp, M. Galetto, F. Härtig, G. Goch, B. Hughes, A. Forbes et W. T. Estler. 2016. « Advances in Large-Scale Metrology – Review and future trends ». *CIRP Annals*, vol. 65, n° 2, p. 643-665. <<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.002>>. Consulté le 23 juillet 2023.
- Syed, Toqeer Ali, Muhammad Shoaib Siddiqui, Hurria Binte Abdullah, Salman Jan, Abdallah Namoun, Ali Alzahrani, Adnan Nadeem et Ahmad B. Alkhodre. 2023. « In-Depth Review of Augmented Reality: Tracking Technologies, Development Tools, AR Displays, Collaborative AR, and Security Concerns ». *Sensors*, vol. 23, n° 1, p. 146. <<https://doi.org/10.3390/s23010146>>. Consulté le 1 juin 2023.
- Tang, Arthur, Charles Owen, Frank Biocca et Weimin Mou. 2003. « Comparative effectiveness of augmented reality in object assembly ». In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. (New York, NY, USA, 5 avril 2003), p. 73-80. Association for Computing Machinery. <<https://doi.org/10.1145/642611.642626>>. Consulté le 9 juin 2022.



- Van Krevelen, Rick et Ronald Poelman. 2010. « A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations ». *International Journal of Virtual Reality (ISSN 1081-1451)*, vol. 9, p. 1. <<https://doi.org/10.20870/IJVR.2010.9.2.2767>>.
- Wang, X., S. K. Ong et A. Y. C. Nee. 2016. « A comprehensive survey of augmented reality assembly research ». *Advances in Manufacturing*, vol. 4, n° 1, p. 1-22. <<https://doi.org/10.1007/s40436-015-0131-4>>. Consulté le 8 avril 2022.
- Wang, Yan, Yuanpeng Liu, Honghua Chen, Qian Xie, Kaijun Zhang et Jun Wang. 2022. « Combined Measurement Based Wing-Fuselage Assembly Coordination via Multiconstraint Optimization ». *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 71, p. 1-16. <<https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3186675>>.
- Xu, Zhao, Rui Kang et Ruodan Lu. 2020. « 3D Reconstruction and Measurement of Surface Defects in Prefabricated Elements Using Point Clouds ». *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 34, n° 5, p. 04020033. <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000920](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000920)>. Consulté le 19 mai 2023.