

Assemblage assisté par métrologie 3D et réalité augmentée

par

Mohamed Hosame KANALI

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

MONTRÉAL, LE 15 AOUT 2025

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés, Mohamed Hosame Kanali, 2025

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

M. Lucas Hof, codirecteur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Éric David, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

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

LE 15 AOUT 2025

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je souhaite exprimer ma plus sincère reconnaissance à toutes les personnes qui ont, à divers titres, contribué à la réalisation de ce travail. Leur soutien, leurs conseils éclairés et leurs encouragements m'ont accompagné tout au long de ce projet et ont été des éléments essentiels à sa réussite.

Je tiens à remercier tout particulièrement le Professeur Souheil-Antoine Tahan et le Professeur Lucas Hof, pour la confiance qu'ils m'ont accordée en acceptant d'encadrer ce projet. Leur expertise scientifique, leur rigueur intellectuelle et leur grande disponibilité ont grandement contribué à enrichir ma réflexion. Leurs conseils méthodologiques et techniques, ainsi que leur regard critique et constructif, ont été déterminants à chaque étape du projet. Leur encadrement bienveillant et exigeant m'a permis de progresser tant sur le plan académique que professionnel.

Je remercie également M. Joël Grignon pour sa précieuse assistance technique, sa réactivité et son implication constante. Son expertise pratique, son sens de l'analyse et sa capacité à proposer des solutions concrètes ont représenté un soutien de grande valeur au fil du développement de ce projet.

Je souhaite également adresser mes remerciements à Monsieur Hubert Krempa de l'entreprise 7DK. Son aide précieuse avec le système iGPS, sa disponibilité et ses conseils techniques ont été fondamentaux pour surmonter plusieurs défis complexes rencontrés au cours de ce projet.

Je tiens aussi à remercier l'entreprise InnovMetric (PolyWorks) pour son aide précieuse et son soutien tout au long de ma recherche. L'accès à leurs technologies et à leur expertise a été un atout majeur pour la réussite de ce mémoire.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude envers ma famille. À mes parents, Kanali Abdelilah et Zerhouni Khal Ghizlane, je dois un soutien indéfectible, une présence rassurante et un amour constant qui m'ont donné la force et la sérénité nécessaires pour mener à bien ce travail. À ma

sœur, Kanali Oumaima, je suis profondément reconnaissant pour ses encouragements, sa patience et sa bienveillance de tous les instants.

Je souhaite également remercier chaleureusement mes collègues du Laboratoire de Métrologie, notamment William Babin et Moloud Jafari, pour leur collaboration quotidienne, leur esprit d'équipe et les nombreux échanges professionnels que nous avons partagés. Leur présence a grandement contribué à rendre cette expérience plus riche et plus stimulante.

Je n'oublie pas non plus Wafa Bounouara, dont l'aide ponctuelle et les conseils avisés m'ont été utiles dans certaines phases du projet. Même si nos échanges ont été plus occasionnels, je tiens à souligner leur impact positif et à lui témoigner ma reconnaissance.

Je remercie également Arjun Chandra Shekar et Marco Todescato, pour leurs contributions ponctuelles. Leurs partages d'idées, bien que limités, ont apporté un éclairage complémentaire et ont nourri certaines de mes réflexions techniques.

Enfin, je souhaite adresser mes remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont soutenu mes efforts ou contribué au bon déroulement de cette recherche, que ce soit par leurs encouragements, leur bienveillance ou leur disponibilité.

À chacun et chacune d'entre vous, je vous adresse mes plus sincères remerciements.

Assemblage assisté par métrologie 3D et réalité augmentée

Mohamed Hosame KANALI

RÉSUMÉ

L'industrie manufacturière est en constante évolution pour atteindre des standards de précision, de qualité et d'adaptabilité toujours plus contraignants. L'assemblage assisté par métrologie (AAM) constitue une solution prometteuse qui utilise des mesures 3D précises pour guider l'assemblage, mais les systèmes actuels présentent des limitations importantes. Les travaux antérieurs ont révélé des défis significatifs : limitations fonctionnelles des applications existantes comme PolyWorks™ AR, absence d'intégration directe entre les systèmes de métrologie et les logiciels spécialisés, contraintes de volume de mesure, et processus de préparation complexes.

Ce mémoire présente le développement d'un système innovant d'assemblage assisté combinant la métrologie 3D par iGPS (indoor Global Positioning System) et la Réalité augmentée via Microsoft HoloLens 2. L'objectif global est de créer une solution intégrée comprenant une application pour MS HoloLens 2 et un plugiciel pour PolyWorks™ Inspector, permettant une détection précise de la position de l'utilisateur, une superposition exacte des modèles CAO virtuels avec les objets physiques, un alignement automatique précis.

Les innovations principales incluent le développement d'un plugiciel pour PolyWorks™ Inspector permettant l'intégration directe avec l'iGPS, l'établissement d'une chaîne de transformation matricielle complexe entre différents systèmes de coordonnées, l'implémentation d'une architecture client-serveur optimisant les ressources des MS HoloLens 2 pour l'alignement.

Ce travail contribue à rendre les systèmes d'assemblage assisté par métrologie 3D plus accessibles et efficaces pour les environnements industriels complexes, en surmontant les contraintes fonctionnelles des solutions existantes et en établissant une méthode plus intuitive pour assister les opérateurs dans la réalisation de tâches d'inspection et d'assemblage complexes.

Mots-clés: Assemblage assisté par métrologie, Réalité augmentée, iGPS, Microsoft HoloLens 2, PolyWorks™, Transformation matricielle, Inspection industrielle

Assembly assisted by 3D metrology and augmented reality

Mohamed Hosame KANALI

ABSTRACT

The manufacturing industry is constantly evolving to achieve increasingly demanding standards of precision, quality, and adaptability. Metrology-assisted assembly (MAA) represents a promising solution that uses precise 3D measurements to guide assembly processes, but current systems present significant limitations. Previous work has revealed substantial challenges: functional limitations of existing applications such as PolyWorks™ AR, lack of direct integration between metrology systems and specialized software, measurement volume constraints, and complex preparation processes.

This thesis presents the development of an innovative assisted assembly system combining 3D metrology through iGPS (indoor Global Positioning System) and augmented reality via Microsoft HoloLens 2. The global objective is to create an integrated solution comprising an application for MS HoloLens 2 and a plugin for PolyWorks™ Inspector, enabling precise detection of user position, exact superposition of virtual CAD models with physical objects, and precise automatic alignment.

The main innovations include the development of a plugin for PolyWorks™ Inspector enabling direct integration with iGPS, establishment of a complex matrix transformation chain between different coordinate systems, implementation of a client-server architecture optimizing MS HoloLens 2 resources for alignment.

This work contributes to making 3D metrology-assisted assembly systems more accessible and efficient for complex industrial environments, by overcoming the functional constraints of existing solutions and establishing a more intuitive method for assisting operators in performing complex inspection and assembly tasks.

Keywords: Metrology-assisted assembly, Augmented reality, iGPS, Microsoft HoloLens 2, PolyWorks™, Matrix transformation, Industrial inspection

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE	3
1.1 Mise en contexte	3
1.2 Problématique	4
1.3 Objectif global du projet	5
1.4 Synthèse du Chapitre 1	6
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE	7
2.1 Systèmes de mesure pour un assemblage assisté par métrologie 3D	7
2.1.1 Laser tracker	7
2.1.2 Photogrammétrie	8
2.1.3 iGPS (indoor Global Positioning System)	9
2.1.4 Numériseur 3D – Balayage laser et lumière structurée	11
2.1.5 Comparatif entre les technologies de métrologie 3D	12
2.2 Réalité augmentée (RA)	14
2.2.1 Définitions	14
2.2.2 Composantes d'un système RA	15
2.2.2.1 Systèmes d'affichages	16
2.2.2.2 Systèmes de suivi	17
2.2.3 Microsoft HoloLens 2 (MS HoloLens 2)	18
2.2.3.1 Composants principaux et architecture	19
2.2.3.2 Le spatial mapping	21
2.2.3.3 World Locking Tools	23
2.2.4 Impact de la RA sur les performances d'assemblage et d'inspection	25
2.3 Marqueurs fiduciaires et calibration pour la RA	26
2.3.1 Marqueurs fiduciaires : fondements et optimisation	26
2.3.1.1 Caractéristiques des marqueurs efficaces	27
2.3.1.2 Comparaison des systèmes de suivi de marqueurs	27
2.3.2 Calibration des systèmes de RA	28
2.3.2.1 Défis de la calibration des OST-HMD :	28
2.3.2.2 Approches innovantes de calibration	29
2.4 Concepts mathématiques pour la RA	30
2.4.1 Règle d'un système droitier et gaucher	31
2.4.2 Système de coordonnées	33
2.4.3 Transformations de base	34
2.4.4 Les angles d'Euler	38
2.4.5 Quaternions	39
2.5 Synthèse du Chapitre 2	40
CHAPITRE 3 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE	43

3.1	Objectifs spécifiques	43
3.2	Méthodologie proposée	45
3.2.1	Environnement de développement et outils utilisés	46
3.2.2	Calibration de Caméra par Détection d'Échiquier	48
3.2.2.1	Phase de préparation	48
3.2.2.2	Phase de capture d'images	49
3.2.2.3	Phase de récupération des images	50
3.2.2.4	Phase de calibration	50
3.2.3	Équipement de mesure	52
3.2.3.1	Calibration iPGS	52
3.2.3.2	Système de coordonnées	53
3.2.3.3	Création d'un frame of frames	54
3.2.3.4	Extraction et stockage des données des cadres	56
3.2.3.5	PolyWorks™	57
3.2.3.6	Plugiciel PolyWorks™ iPGS	58
3.2.4	Estimation de la matrice de transformation entre la caméra du MS HoloLens 2 et le custom frame	60
3.2.4.1	Développement de l'application MS HoloLens 2	61
3.2.4.2	Préparation du matériel de tracking	62
3.2.4.3	Installation du capteur	63
3.2.4.4	Collecte des données	63
3.2.4.5	Normalisation des données et construction des matrices	64
3.2.4.6	Calcul de la transformation finale	66
3.2.5	Application pour alignement sur les MS HoloLens 2	67
3.2.5.1	Partie mathématique : Fondements théoriques	68
3.2.5.2	Partie pratique : implémentation et mise en œuvre	72
3.2.5.2.1	Autres fonctionnalités	79
CHAPITRE 4	PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION	83
4.1	Résultats	83
4.1.1	Précision de l'alignement spatial	83
4.1.2	Stabilité du système de tracking	85
4.1.3	Résultats de la comparaison avec Vuforia	85
4.1.4	Intégration système avec PolyWorks™ et iGPS	87
4.2	Discussion	89
4.2.1	Analyse critique des performances techniques et validation de l'approche	89
4.2.2	Innovation technologique majeure : Intégration iGPS-PolyWorks™	92
4.2.3	Architecture système et innovation d'alignement automatique	93
4.2.4	Avantages concurrentiels démontrés par l'évaluation comparative	94
4.2.5	Validation expérimentale et nécessité d'extension vers des environnements industriels	95
4.2.6	Du prototype vers l'industrialisation : défis de simplicité d'usage et d'intégration	96
4.2.7	Contribution méthodologique et avancées scientifiques	97

4.2.8	Impact sur l'évolution de l'industrie 4.0 et positionnement stratégique	98
4.2.9	Conclusion de la discussion	99
CONCLUSION	101	
RECOMMANDATIONS	103	
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	105	

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 2.1	Image représentant le Laser Tracker,.....	8
Figure 2.2	Image représentant le fonctionnement de la photogrammétrie, tiré du site https://www.geodetic.com/basics-of-photogrammetry/	9
Figure 2.3	Image représentant le fonctionnement de l'iGPS, tirée de l'article de Chen et Du (2017)	11
Figure 2.4	Image représentant le fonctionnement d'un numériseur 3D, tirée du site https://www.3d-scantech.com/all-you-need-to-know-about-3d-scanners/	12
Figure 2.5	Image représentant les 3 technologies, tirée du site https://www.jexplore.co/blog/realite-virtuelle-realite-augmentee-realite-mixte-3d-quelles-differences-pour-quels-usages	15
Figure 2.6	Vue globale du fonctionnement d'un système de RA, tirée de Van Krevelen et Poelman (2010)	16
Figure 2.7	Architecture matérielle du MS HoloLens 2 extraite du site learn.microsoft.com	19
Figure 2.8	Système de capteurs du MS HoloLens 2 extraite du site learn.microsoft.com	20
Figure 2.9	Marqueurs fiduciaires	28
Figure 2.10	Règle de la main droite	32
Figure 2.11	Règle de la main gauche	32
Figure 2.12	Différentes conventions pour l'axe vertical	33
Figure 2.13	Conventions de coordonnées utilisées dans les logiciels 3D	34
Figure 2.14	Image représentant la mise à l'échelle, tiré du site https://lyonsnewmedia.wordpress.com/2014/10/30/resizing-and-scaling-3d-objects-in-cura-a-visual-how-to-is-now-available	37
Figure 2.15	Image représentant la mise à l'échelle non uniforme, tiré livre <i>Mathematics for 3D game programming and computer graphics</i>	38
Figure 2.16	Image représentant les angles d'Euler tiré du site https://easyspin.org/documentation/eulerangles.html	39

Figure 2.17	Image représentant les Quaternions, tiré du site https://www.3dgep.com/understanding-quaternions/	40
Figure 3.1	Vue d'ensemble de la méthodologie d'assemblage assisté par métrologie 3D et Réalité augmentée	46
Figure 3.2	Processus de calibration de la caméra par détection d'échiquier	48
Figure 3.3	Échiquier utilisé pour la calibration de la caméra du MS HoloLens 2	49
Figure 3.4	Détection des coins de l'échiquier lors de la phase de calibration	51
Figure 3.5	Sonde i6 Long Reach de l'iGPS	52
Figure 3.6	Disposition spatiale des émetteurs iGPS, des points de calibration et du système de coordonnées.....	54
Figure 3.7	Modèle CAO du support conçu pour les 4 détecteurs iGPS du MS HoloLens 2.....	55
Figure 3.8	MS HoloLens 2 équipé de 4 Détecteurs iGPS	56
Figure 3.9	Capteur i5 utilisé sur le MS HoloLens 2.....	56
Figure 3.10	Méthodes d'alignement disponibles dans PolyWorks™ AR	58
Figure 3.11	Étapes d'utilisation du logiciel iGPS dans PolyWorks™ Inspector.....	59
Figure 3.12	Processus d'estimation de la matrice de transformation entre le MS HoloLens 2 et le Custom Frame	60
Figure 3.13	Matrice de transformation du repère Custom Frame Hololens2 vers le repère de la caméra des MS HoloLens 2	61
Figure 3.14	Planche acrylique avec marqueur ArUco et deux capteurs i5	63
Figure 3.15	Matrice de transformation M_1 du repère Custom Frame Hololens2 vers le repère global iGPS	64
Figure 3.16	Matrice de transformation M_2^{-1} du repère global iGPS au repère local Capteur i5	65
Figure 3.17	Matrice de transformation M_3 du repère local du Capteur i5 vers le repère ARUco	65
Figure 3.18	Matrice de transformation M_4 du repère ARUco vers le repère de la caméra du MS HoloLens 2	66

Figure 3.19	Matrice de transformation du repère Custom Frame Hololens2 vers le repère vers le repère de la caméra du MS HoloLens 2	67
Figure 3.20	Matrice de transformation M_1 du repère local CAD vers le repère global de l'iGPS	69
Figure 3.21	Matrice de transformation M_2^{-1} du repère global de l'iGPS vers le repère Custom Frame Hololens2	69
Figure 3.22	Matrice de transformation M_3 du repère Custom Frame Hololens2 vers le repère de la caméra du MS HoloLens 2	70
Figure 3.23	Conversion du système de coordonnées iGPS vers Unity®	71
Figure 3.24	Matrice de transformation M_4 du repère de la caméra du MS HoloLens 2 vers le repère de Unity®	71
Figure 3.25	Matrice de transformation du repère local du CAD vers le repaire de Unity®	72
Figure 3.26	Spatial mapping de la partie arrière du laboratoire d'expérimentation - MS HoloLens 2	74
Figure 3.27	Spatial mapping de la partie avant du laboratoire d'expérimentation - MS HoloLens 2	74
Figure 3.28	Interface utilisateur de l'application d'alignement en cours d'exécution sur MS HoloLens 2	79
Figure 3.29	Architecture de communication du système d'alignement iGPS-MS HoloLens 2	79
Figure 4.1	Résultats de l'alignement hologramme-objet physique sous différents angles de vue	84
Figure 4.2	Comparaison des résultats d'alignement : méthode développée vs Vuforia	86
Figure 4.3	Comparaison des résultats d'alignement : méthode développée vs Vuforia (AI)	87
Figure 4.4	Validation de l'intégration : concordance des coordonnées entre Surveyor® et PolyWorks™ Inspector	88
Figure 4.5	Validation de l'intégration : concordance des coordonnées entre Surveyor® et PolyWorks™ AR	89

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

3D	Trois Dimensions
AAM	Assemblage Assisté par Métrologie
ADM	Absolute Distance Meter (Télémètre absolu)
API	Application Programming Interface (Interface de programmation d'application)
AR	Augmented Reality (Réalité augmentée)
ARCore	Plateforme de Réalité augmentée de Google
ArUco	Augmented Reality University of Cordoba (Marqueurs fiduciaires)
ARToolKit	Augmented Reality Toolkit (Boîte à outils de Réalité augmentée)
C#	Langage de programmation
CAO	Conception assistée par ordinateur
CNC	Computer Numerical Control (Commande numérique par calculateur)
CSV	Comma-Separated Values (Valeurs séparées par des virgules)
DLL	Dynamic Link Library (Bibliothèque de liens dynamiques)
EKF	Extended Kalman Filter (Filtre de Kalman étendu)
Flask	Framework de développement web Python
GPS	Global Positioning System
HMD	Head-Mounted Display (Affichage monté sur la tête)
HTTP	HyperText Transfer Protocol (Protocole de transfert hypertexte)
IA	Intelligence Artificielle
IFM	Interférométrie
iGPS	indoor Global Positioning System
InnovMetric	Entreprise développant PolyWorks™
IP	Internet Protocol (Protocole Internet)
IPD	Interpupillary Distance (Distance interpupillaire)
JSON	JavaScript Object Notation (Notation d'objet JavaScript)
MS HoloLens 2	Microsoft HoloLens 2
MTL	Material Template Library (Format de fichier de matériaux)

OBJ	Object file format (Format de fichier objet 3D)
OpenCV	Open Source Computer Vision Library (Bibliothèque de vision par ordinateur)
OST-HMD	Optical See-Through Head-Mounted Display (Affichage tête haute transparent)
PNG	Portable Network Graphics (format d'image)
PDF	Portable Document Format (format de document portable)
PnP	Perspective-n-Point (Algorithme de positionnement)
POST	HTTP POST method (Méthode HTTP POST)
Python	Langage de programmation
QR Code	quick response code (code à réponse rapide)
PSD	Position Sensitive Detector (Détecteur de position)
RA	Réalité augmentée
RFID	Radio-Frequency Identification
RM	Réalité Mixte
RTK	Real-Time Kinematic
RV	Réalité virtuelle
SAR	Spatial Augmented Reality (Réalité augmentée Spatiale)
SCAAT-EKF	Single Camera Active Alignment Tool - Extended Kalman Filter
SDK	Software Development Kit (Kit de développement logiciel)
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SMR	Spherically Mounted Retroreflector (Rétoréflecteur sphérique)
SPAAM	Single Point Active Alignment Method (Méthode d'alignement actif à point unique)
Spatial Mapping	Cartographie spatiale (terme technique composé souvent abrégé)
SVG	Scalable Vector Graphics
UDP	User Datagram Protocol (Protocole de datagramme utilisateur)
Unity®	Moteur de jeu et plateforme de développement
URL	Uniform Resource Locator (Localisateur de ressource uniforme)
USB-C	Universal Serial Bus Type-C

Vuforia	Plateforme de Réalité augmentée
WAAS	Wide Area Augmentation System
Wi-Fi	Wireless Fidelity (Fidélité sans fil)
WinRT	Windows Runtime (Environnement d'exécution Windows)
VR	Virtual Reality (Réalité virtuelle)
YAML	YAML Ain't Markup Language (Format de sérialisation de données)

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

θ	Angle de rotation autour de l'axe X (roulis/roll)
φ	Angle de rotation autour de l'axe Y (tangage/pitch)
ψ	Angle de rotation autour de l'axe Z (lacet/yaw)
μm	Micromètre
mm	Millimètre
m	Mètre
MP	Mégapixel
°	Degré
Hz	Hertz

INTRODUCTION

L'industrie manufacturière est en constante évolution, en ayant comme objectif de fluidifier et d'améliorer les processus d'assemblage pour atteindre des standards de précision, de qualité et d'adaptabilité toujours plus contraignants. De surcroit, assembler des pièces complexes peut s'avérer être un vrai défi, et les méthodes traditionnelles peinent à répondre aux exigences des pièces complexes, caractérisées par des tolérances rigoureuses, et à la nécessité de réduire les délais de fabrication.

Dans cette optique, l'assemblage assisté par métrologie (AAM) est une solution prometteuse qui utilise des mesures 3D précises pour assister les opérateurs dans les tâches d'assemblage et d'inspection. Cette méthode guide l'opérateur avec exactitude et compense les variations, augmentant la qualité tout en diminuant les erreurs et les coûts. Cependant, cette approche nécessite que les opérateurs effectuent constamment des allers-retours entre leur poste de travail et la station informatique où sont affichées les données de mesure et les instructions d'assemblage. Ces déplacements répétés entre l'objet physique à assembler et l'écran de contrôle représentent une perte de temps considérable et peuvent être source d'erreurs, particulièrement dans des environnements industriels complexes. Dès lors, l'intégration de la Réalité augmentée (RA) devient cruciale. En effet la réalité augmentée résout ce problème en affichant les instructions visuelles, les visualisations 3D et les indications de positionnement directement dans le champ de vision de l'opérateur. Cette approche élimine les déplacements et améliore l'efficacité des procédures d'assemblage et d'inspection.

Ce mémoire s'organise en quatre chapitres complémentaires, suivis d'une conclusion et de recommandations pour orienter les recherches futures.

Le premier chapitre établit le contexte de cette recherche en présentant la problématique qui motive notre travail. Il analyse les limitations des systèmes actuels d'assemblage assisté par métrologie 3D et de réalité augmentée, particulièrement les défis d'alignement précis des hologrammes avec les objets physiques. L'objectif global du projet y est défini : créer une solution intégrée combinant iGPS, Microsoft HoloLens 2 et PolyWorks™ Inspector pour résoudre la problématique critique d'alignement précis des hologrammes avec les objets physiques dans l'assemblage assisté par métrologie 3D.

Le deuxième chapitre propose une revue exhaustive de la littérature articulée autour de quatre axes principaux. Il explore d'abord les systèmes de mesure pour l'assemblage assisté par métrologie 3D (laser tracker, photogrammétrie, iGPS, numériseur 3D), puis examine en détail la réalité augmentée, incluant ses définitions, composantes, le Microsoft HoloLens 2 et son impact sur les performances d'assemblage. Il aborde ensuite les marqueurs fiduciaires et les méthodes de calibration pour la réalité augmentée, avant de conclure sur les concepts mathématiques fondamentaux (systèmes de coordonnées, transformations, angles d'Euler, quaternions).

Le troisième chapitre détaille notre méthodologie en six volets : la calibration de la caméra par détection d'échiquier, la configuration de l'équipement de mesure iGPS, l'estimation de la matrice de transformation entre la caméra du MS HoloLens 2 et le Custom Frame, et le développement de l'application de réalité augmentée pour l'alignement. Chaque procédure est expliquée de manière à assurer la reproductibilité de notre approche.

Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus et leur analyse critique. Il évalue la précision de l'alignement spatial, la stabilité du système de tracking, et l'intégration réussie entre PolyWorks™ et l'iGPS. Une comparaison systématique avec la solution Vuforia valide les avantages de notre approche en termes d'efficacité computationnelle, de robustesse environnementale et de précision métrologique.

La conclusion synthétise les contributions de cette recherche et analyse les implications pour l'industrie manufacturière, tandis que les recommandations proposent des perspectives d'évolution, notamment l'exploration d'outils multi-plateformes, l'optimisation de l'architecture logicielle, et l'extension vers d'autres systèmes métrologiques.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE

1.1 Mise en contexte

L'assemblage assisté par métrologie 3D représente une avancée significative dans le domaine de la fabrication industrielle, promettant une amélioration substantielle de la précision, de l'efficacité et de la qualité des processus d'assemblage. Dans cette optique, les travaux récents de Bounaouara (2023) et Bou Gebrayel (2023) ont apporté des contributions importantes à ce domaine, tout en mettant en lumière des défis persistants et des opportunités d'amélioration.

L'étude de Bounaouara (2023) a exploré une preuve de concept novatrice combinant la photogrammétrie en utilisant le C-Track et la RA, à travers l'application PolyWorks AR, est utilisée pour le guidage et le contrôle qualité des assemblages, en particulier dans le contexte de la construction modulaire. Cette approche a démontré le potentiel d'intégrer des technologies de métrologie 3D avec des interfaces utilisateur en afin d'améliorer l'efficacité des opérations d'assemblage et d'en assurer la qualité. Le système proposé permettait aux opérateurs de visualiser en temps réel le modèle de Conception assistée par ordinateur (CAO) de la pièce à contrôler, superposé à leur environnement de travail, offrant ainsi une assistance visuelle pour l'identification des défauts potentiels et la vérification de la conformité aux tolérances, contribuant ainsi à la réduction des erreurs et du temps nécessaire à la réalisation des tâches. Cependant, l'étude a révélé certaines limitations qui pourraient restreindre son application dans des contextes industriels plus larges.

Parallèlement, Bou Gebrayel (2023) s'est concentré sur l'aspect crucial de l'estimation de l'incertitude dans les systèmes d'assemblage assisté par métrologie 3D. Sa recherche a proposé une méthodologie robuste pour quantifier et propager l'incertitude de mesure dans le contexte spécifique du système C-Track. Cette contribution est essentielle pour assurer la fiabilité et la traçabilité des processus d'assemblage assistés. Néanmoins, la méthodologie développée présentait certaines limitations en termes de portée et d'applicabilité à d'autres contextes métrologiques.

1.2 Problématique

Les recherches de Bounaouara (2023) et Bou Gebrayel (2023) ont révélé des défis majeurs dans l'assemblage assisté par métrologie 3D, dont le plus critique concerne l'alignement précis des hologrammes avec les objets physiques. Cette problématique d'alignement s'avère fondamentale, car elle conditionne directement l'efficacité de tout système de RA industrielle : en effet, si l'alignement des hologrammes n'est pas correct, l'ensemble des instructions visuelles, des indications de positionnement et des éléments de guidage se retrouvent décalés par rapport à la réalité physique, rendant ainsi le système non seulement inefficace, mais potentiellement dangereux pour les opérations d'assemblage et d'inspection.

Cette problématique d'alignement a été confirmée par les retours terrain des opérateurs industriels concernant l'application développée par Bounaouara (2023). En effet, les utilisateurs en environnement de production ont rapporté que les hologrammes n'étaient pas correctement positionnés, et qu'en plus de ce mauvais alignement, la procédure d'alignement elle-même s'avérait fastidieuse et chronophage. Lorsque l'alignement initial des hologrammes n'était pas optimal, l'ensemble des instructions et des éléments virtuels apparaissaient « de travers » par rapport aux composants physiques, compromettant ainsi la fiabilité des opérations d'inspection et créant une perte de confiance dans le système de la part des opérateurs.

Au-delà de cette problématique d'alignement central, l'application de Bounaouara (2023) présente des limitations structurelles importantes. L'affichage des valeurs de mesure souffrait de latences importantes dues au stockage des données dans des fichiers externes qui devaient être ouverts et traités après un délai considérable. Ces problèmes de performance étaient amplifiés par l'utilisation du langage de programmation natif de PolyWorks™, qui non seulement introduisait des latences supplémentaires mais s'avérait également limité dans ses capacités de développement. En particulier, le placement initial des hologrammes représentant les modèles CAO s'effectue exclusivement de manière manuelle dans l'application, ce qui s'avère non seulement fastidieux, mais également source d'imprécisions récurrentes. Plus problématique encore, le code développé en utilisant PolyWorks répond à une problématique spécifique, ce qui le rend fondamentalement obsolète et inutile dans d'autres contextes industriels où l'utilisation d'autres fonctionnalités de PolyWorks™ s'avère essentielle. Cette

dépendance limite drastiquement son potentiel de déploiement et d'adoption au sein de l'industrie.

Parallèlement, le système C-Track utilisé dans ces travaux souffre d'une absence d'intégration directe avec PolyWorks™, créant ainsi une discontinuité majeure dans le flux de travail métrologique. Sur le plan matériel, le système de photogrammétrie présente des contraintes importantes en termes de volume de mesure, nécessitant la multiplication coûteuse des appareils pour couvrir une station d'assemblage complète. De plus, la précision du C-Track peut s'avérer inadéquate pour des assemblages nécessitant une haute précision, car certaines incertitudes mesurées dépassent les contraintes angulaires spécifiées dans les cahiers des charges industriels.

Concernant les travaux de Bou Gebrayel (2023), bien que sa méthodologie d'estimation de l'incertitude soit robuste, elle était spécifiquement adaptée au système C-Track et ne prenait pas en compte d'autres technologies de métrologie 3D largement utilisées dans l'industrie, telles que l'iGPS (indoor Global Positioning System) ou le laser tracker, limitant ainsi sa portée d'application dans des environnements métrologiques diversifiés.

1.3 Objectif global du projet

L'objectif global de ce projet est de développer un système innovant d'assemblage assisté par métrologie 3D et RA qui répond directement aux limitations critiques identifiées dans les solutions existantes. Plus spécifiquement, nous proposons de créer une solution qui résout en priorité la problématique fondamentale d'alignement précis des hologrammes avec les objets physiques, tout en surmontant les contraintes de performance et de flexibilité qui limitent l'adoption industrielle des solutions actuelles.

Cette solution repose sur l'exploitation du système iGPS comme technologie de mesure principale, couplée à une application pour MS HoloLens 2 et un plugiciel pour PolyWorks™ Inspector. Cette architecture établit pour la première fois une liaison fonctionnelle directe entre l'iGPS et PolyWorks™, permettant d'éliminer les processus manuels fastidieux d'alignement tout en résolvant les problèmes de latence liés au stockage de données dans des fichiers externes et aux limitations du langage de programmation natif de PolyWorks™.

L'objectif central est de garantir que les instructions visuelles, les éléments de guidage et les indications de positionnement soient parfaitement alignés avec la réalité physique, tout en offrant des performances optimisées et une architecture flexible qui peut être déployée dans différents environnements métrologiques industriels. Cette approche vise à créer une solution qui dépasse les limitations spécifiques des applications précédentes pour offrir une polyvalence d'utilisation étendue, adaptée aux exigences variées de l'industrie manufacturière moderne.

1.4 Synthèse du Chapitre 1

Les travaux précédents ont démontré le potentiel des systèmes combinant métrologie 3D et RA pour l'assistance industrielle, tout en révélant des limitations importantes qui nécessitent des solutions innovantes. Notre projet répond à ces défis en proposant l'utilisation du système iGPS, plus adapté aux grands volumes de mesure, couplé à une application MS HoloLens 2 spécifiquement conçue et un logiciel d'intégration PolyWorks™. Cette approche permettra de surmonter les contraintes fonctionnelles des solutions existantes, notamment en offrant un alignement automatique des hologrammes, des capacités de guidage visuel avancées et une intégration inédite entre iGPS, PolyWorks™ et la Réalité augmentée. Le développement de cette solution constitue une évolution nécessaire pour rendre les systèmes d'inspection et d'assemblage assistés par métrologie 3D plus accessibles et efficaces dans les environnements industriels complexes.

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Dans le but d'atteindre l'objectif précédemment établi, il est essentiel d'entreprendre une exploration approfondie des recherches existantes et de formuler une synthèse utile pour l'État de l'Art dans le domaine. Cette analyse s'étend également à une étude plus minutieuse des domaines spécifiques de l'assemblage assisté par des techniques métrologiques avancées, ainsi que de la métrologie appliquée à grande échelle.

En complément de ces aspects, notre investigation se penche sur les fondements et les mécanismes opérationnels de la RA. Cette technologie innovante est examinée sous l'angle de ses applications concrètes dans les processus d'assemblage et d'inspection, offrant ainsi une perspective élargie sur les possibilités d'intégration des technologies numériques dans les pratiques industrielles.

2.1 Systèmes de mesure pour un assemblage assisté par métrologie 3D

Dans le domaine de l'assemblage industriel, la précision et la fiabilité sont primordiales. L'avènement de la métrologie 3D a révolutionné ces processus en offrant des outils de mesure avancés qui permettent un contrôle qualité rigoureux et une optimisation des opérations d'assemblage. Cette section se penche sur les différents systèmes de mesure utilisés dans le cadre d'un assemblage assisté par métrologie 3D, explorant leurs principes de fonctionnement, leurs avantages.

2.1.1 Laser tracker

Le laser tracker est un instrument de métrologie portable qui mesure les coordonnées 3D d'une cible coopérative, généralement un rétroréflecteur sphérique (SMR). Son principe repose sur la mesure simultanée d'une distance et de deux angles (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

L'unité principale émet un faisceau laser qui sera dirigé vers la cible par un système de miroirs ou directement depuis la tête du tracker. Le SMR réfléchit le faisceau précisément dans sa direction d'origine. La distance est alors mesurée soit par interférométrie (IFM), soit par un télémètre absolu (ADM). L'IFM compte les franges d'interférence pour mesurer les déplacements relatifs avec une très haute précision, mais nécessite un retour à une position de référence en cas d'interruption du faisceau. L'ADM, quant à lui, mesure la distance absolue en modulant le faisceau laser, permettant des mesures sans besoin de référence constante.

Deux codeurs angulaires de haute précision mesurent les angles horizontal et vertical du faisceau (voir Figure 2.1). Un détecteur de position (PSD) capte une partie du faisceau réfléchi pour assurer le suivi automatique de la cible. Si celle-ci se déplace, le système ajuste la direction du tracker pour maintenir le faisceau centré sur la cible (Peggs *et al.*, 2009).

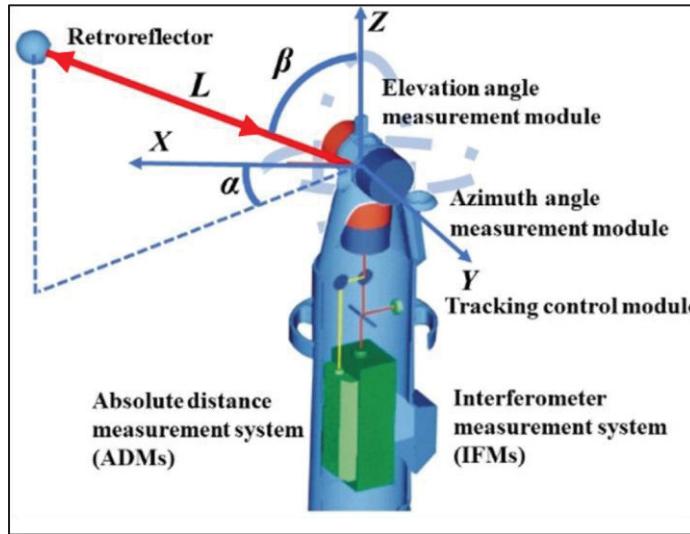


Figure 2.1: Image représentant le Laser Tracker,

2.1.2 Photogrammétrie

La photogrammétrie est une méthode de mesure qui exploite les principes de la vision stéréoscopique pour reconstruire des informations tridimensionnelles à partir d'images bidimensionnelles. Cette technique repose sur la capture d'images d'un objet depuis différents angles, puis sur l'analyse de ces images pour en extraire des données géométriques précises.

Pour réaliser ces mesures, on utilise généralement un système composé d'au moins deux caméras qui photographient l'objet d'étude sous différents angles. Des cibles réfléchissantes sont placées sur l'objet pour servir de points de référence. Ces cibles, conçues pour renvoyer efficacement la lumière, apparaissent comme des points brillants sur les images capturées. Un logiciel spécialisé analyse ensuite ces images pour déterminer avec précision le centre de chaque cible (voir Figure 2.2).

La présence d'au moins deux caméras est cruciale, car elle permet de trianguler la position exacte de chaque cible dans l'espace tridimensionnel. En combinant les informations de position de multiples cibles, il devient possible de reconstituer la forme et les dimensions globales de l'objet étudié. Cette approche permet ainsi d'obtenir des mesures précises et détaillées de structures complexes, sans contact direct avec l'objet mesuré. (Bou Gebrayel, 2023)

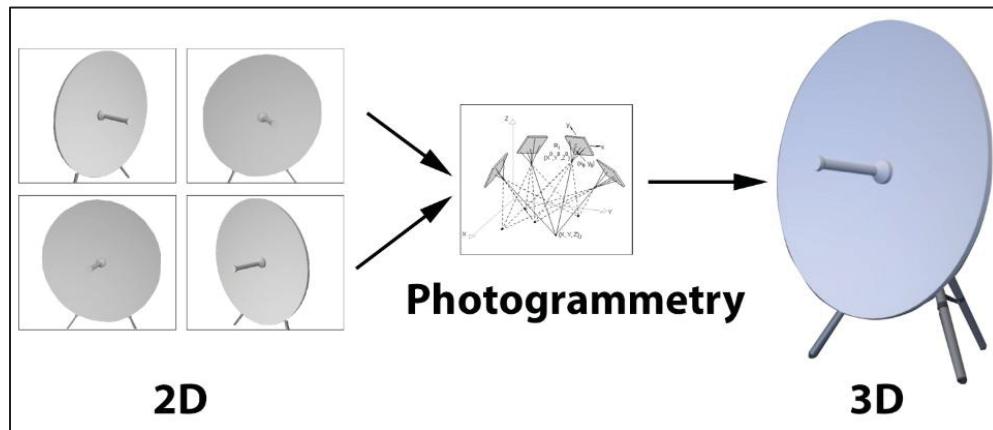


Figure 2.2 : Image représentant le fonctionnement de la photogrammétrie, tiré du site <https://www.geodetic.com/basics-of-photogrammetry/>

2.1.3 iGPS (indoor Global Positioning System)

Il s'agit d'un équipement qui exploite des stations émettrices et des récepteurs pour déterminer les coordonnées spatiales en mesurant les intervalles de temps des signaux laser atteignant les capteurs. La disposition inclut typiquement au minimum quatre émetteurs formant un champ, pouvant être étendu en ajoutant plus d'émetteurs pour couvrir des zones plus vastes.

Le fonctionnement de l'iGPS (indoor Global Positioning System) est un processus complexe basé sur la triangulation et la multilatération. Chaque émetteur dans le système génère trois signaux optiques distincts : un signal pulsé et deux plans laser en forme d'éventail (Figure 2.3). Ces deux plans laser sont perpendiculaires entre eux, formant un angle de $\frac{\pi}{2}$, et chacun fait un angle de 30° (noté θ) avec le plan vertical.

Les capteurs, placés aux points cibles à mesurer, reçoivent ces signaux optiques. Pour chaque émetteur, le capteur enregistre trois temps : t_0 (arrivée du signal pulsé), t_1 et t_2 (passage des deux plans laser). Ces temps sont utilisés pour calculer les angles de rotation des plans laser (h_1 et h_2) par rapport à une position de référence, en utilisant la période de rotation T de l'émetteur.

Le système utilise ensuite ces angles pour déterminer les vecteurs normaux des plans laser au moment où ils atteignent le capteur. Ces vecteurs, combinés avec la position connue de l'émetteur, permettent de calculer la direction du capteur par rapport à l'émetteur. En utilisant les données de plusieurs émetteurs (généralement au moins quatre), le système peut déterminer la position précise du capteur dans l'espace 3D. Cette méthode permet une localisation simultanée de plusieurs points avec une grande précision dans un vaste espace de travail.

Le système de contrôle joue un rôle crucial en convertissant les signaux électriques des capteurs en données temporelles, puis en coordonnées spatiales. Il utilise des équations matricielles complexes qui prennent en compte la disposition des émetteurs dans le champ de mesure global (voir Figure 2.3).

Les simulations et les expérimentations révèlent que la distribution de l'incertitude est relativement stable dans le volume, avec une incertitude de mesure d'un champ unitaire d'environ 0,3 mm (intervalle de 95%). L'extension du champ avec des émetteurs supplémentaires maintient la précision des mesures. (Chen et Du, 2017)

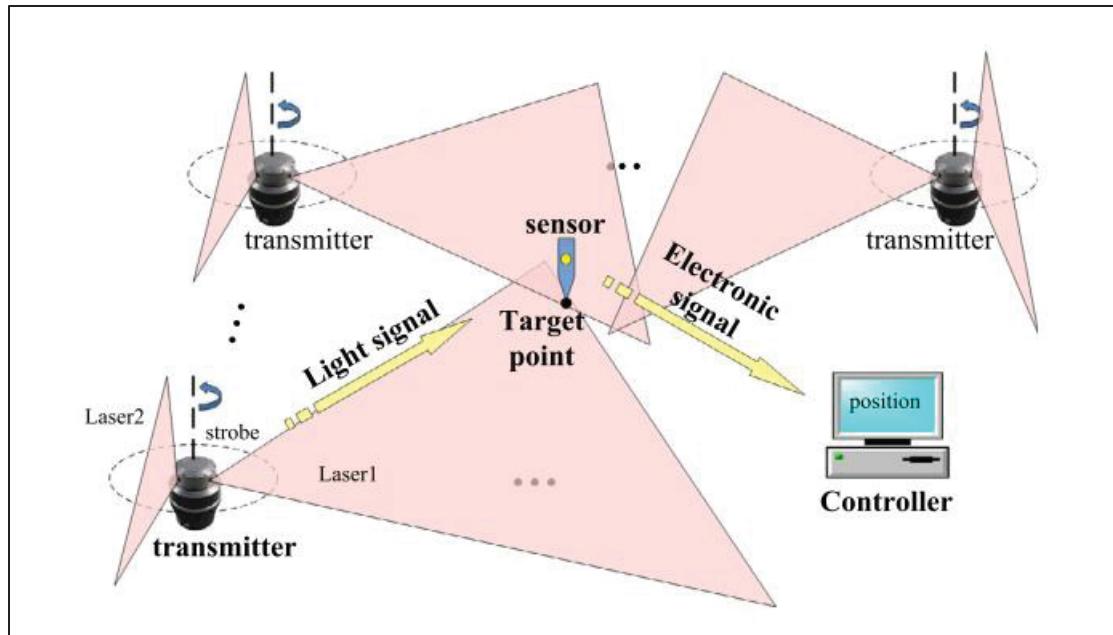


Figure 2.3 : Image représentant le fonctionnement de l'iGPS, tirée de l'article de Chen et Du (2017)

2.1.4 Numériseur 3D – Balayage laser et lumière structurée

Les numériseurs 3D sont des dispositifs sophistiqués utilisés pour capturer la forme tridimensionnelle d'objets ou d'environnements. Leur fonctionnement repose sur différentes technologies, principalement le balayage laser et la projection de lumière structurée.

Les numériseurs laser fonctionnent en projetant un faisceau laser sur l'objet à mesurer. Ils utilisent soit la triangulation, soit la méthode du temps de vol. Dans la triangulation, une caméra observe la position du point laser sur l'objet, et le système calcule la position 3D en utilisant la géométrie connue entre le laser et la caméra. La méthode du temps de vol mesure le temps que met le laser pour faire l'aller-retour entre le numériseur et l'objet, calculant ainsi la distance.

Les numériseurs à lumière structurée projettent un motif lumineux (souvent des franges) sur l'objet (Figure 2.4). Une ou plusieurs caméras capturent la déformation de ce motif sur la surface de l'objet. L'analyse de cette déformation permet de reconstruire la forme 3D de l'objet avec précision.

Le processus de numérisation comprend généralement plusieurs étapes. D'abord, le numériseur balaye l'objet, capturant des milliers ou des millions de points. Ces données sont ensuite traitées

pour créer un nuage de points 3D. Ce nuage peut être converti en un maillage polygonal, qui peut être lissé et texturé si nécessaire. Si plusieurs numérisations sont nécessaires pour capturer l'objet entier, ils sont alignés et fusionnés.

Les numérisateurs 3D modernes sont capables de capturer des données très rapidement, certains modèles atteignant des vitesses de 1 00 000 points par seconde (Figure 2.4). La précision varie selon les modèles et les technologies utilisées, mais peut atteindre des niveaux submillimétriques pour certaines applications (Peggs *et al.*, 2009).

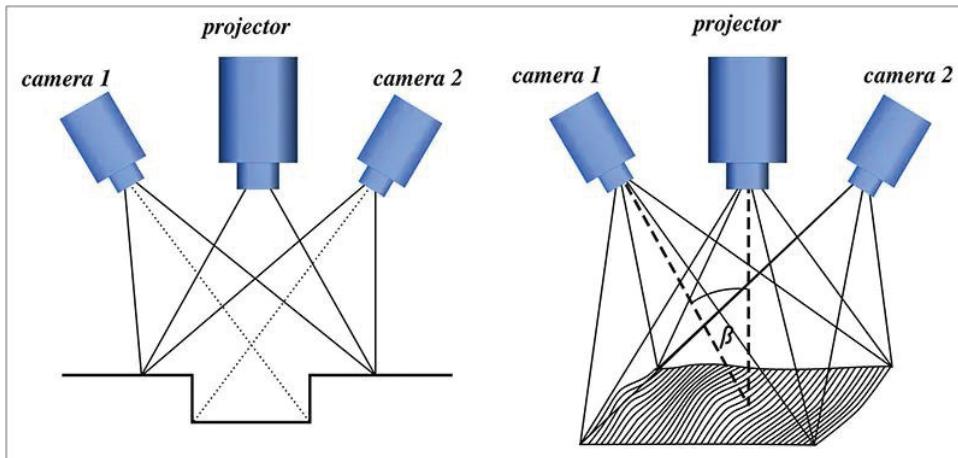


Figure 2.4 : Image représentant le fonctionnement d'un numériseur 3D, tirée du site <https://www.3d-scantech.com/all-you-need-to-know-about-3d-scanners/>

2.1.5 Comparatif entre les technologies de métrologie 3D

L'assemblage assisté par la métrologie bénéficie d'une variété de technologies 3D, chacune présentant ses propres avantages et limitations. Il est donc crucial d'évaluer attentivement les exigences spécifiques d'un projet avant de sélectionner l'équipement de mesure appropriée. Le Tableau 1 offre une synthèse des principales technologies de métrologie 3D applicables à l'assemblage assisté, présentant leurs performances typiques. Ces données sont issues des deux articles (Peggs *et al.*, 2009) et (Chen et Du, 2017)

Tableau 1 : Comparatif entre les Technologies de Métrologie 3D

Technologies de Métrologie 3D	Précision	Portée	Avantages	Faiblesses
Laser tracker	$10 \mu\text{m} \pm 0.4 \mu\text{m}/\text{m}$ (ADM), $2 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}/\text{m}$ (IFM)	Jusqu'à 60 m	Haute précision, mesure de grandes distances, versatilité	Nécessite une ligne de vue directe, sensible aux conditions environnementales
Photogrammétrie	0.05 mm sur 5 m	1-100 m	Flexible, non-contact, capture simultanée de nombreux points	Nécessite des cibles, sensibles à l'éclairage
Numériseur 3D	0.1 mm sur 5 m (triangulation laser), 0.5-3 mm (numériseur à phase)	1.5-40 m	Capture rapide de grandes quantités de données, mesure de surfaces complexes	Précision variable selon la distance, sensible aux surfaces réfléchissantes
iGPS	<0.6 mm	Dépend du nombre de transmetteurs	Mesure de grands volumes, extensibilité facile, maintien de la précision lors de l'expansion du champ de mesure	Nécessite au moins 4 transmetteurs, performance dynamique limitée, coût élevé, la précision inférieure aux autres technologies, nécessite une configuration complexe

Il est important de noter que la fusion de ces technologies peut offrir des solutions encore plus puissantes et polyvalentes. En combinant différentes approches, il est possible de tirer parti des forces de chaque technologie tout en compensant leurs faiblesses respectives. Par exemple, l'intégration d'un laser tracker avec un numériseur 3D portable peut permettre des mesures à grande échelle avec une haute précision globale, tout en capturant des détails fins sur des surfaces complexes. Cette approche de fusion technologique peut conduire à des systèmes de mesure plus robustes et adaptables, capables de répondre à un éventail plus large de défis d'assemblage et de contrôle qualité.

2.2 Réalité augmentée (RA)

Dans cette section, nous allons d'abord définir les concepts de RA, réalité virtuelle (RV), et réalité mixte (RM). Ensuite, nous parlerons des lunettes Microsoft HoloLens 2 puis nous aborderons les composants d'un système de RA. Enfin, nous conclurons en discutant des diverses applications de la RA dans les domaines de l'assemblage et de l'inspection.

2.2.1 Définitions

La Réalité augmentée (RA) est une technologie qui superpose des éléments numériques sur la vue du monde réel de l'utilisateur, en d'autres termes la RA fusionne tout ce qui est tangible avec le virtuel en temps réel, créant une expérience hybride où les données générées par ordinateur coexistent de manière fluide avec la réalité. Cette technologie s'appuie sur divers dispositifs, allant des smartphones aux lunettes spécialisées, pour superposer textes, images, ou modèles 3D sur notre vue du monde, améliorant ainsi notre compréhension et notre interaction avec notre environnement (Peddie, 2023).

La réalité virtuelle (RV) est une technologie qui immerge complètement l'utilisateur dans un environnement artificiel généré par ordinateur, en isolant totalement sa perception du monde réel. Elle utilise généralement un casque de visualisation qui bloque la vue de l'environnement physique. La RV crée un monde entièrement simulé, remplaçant la réalité actuelle de l'utilisateur par une expérience virtuelle (Peddie, 2023).

La réalité mixte (RM) parfois appelée « réalité hybride », est une technologie qui fusionne les environnements réels et virtuels. Dans un système de RM, les utilisateurs peuvent naviguer simultanément et de manière fluide entre le monde réel et l'environnement virtuel, avec des objets virtuels positionnés et ancrés avec précision dans l'espace réel (Peddie, 2023).

La Figure 2.5 présente une comparaison entre la RA, la réalité mixte (RM) et la réalité virtuelle (RV). On observe que la RA superpose des éléments virtuels au monde réel, la RM combine des éléments réels et virtuels dans un espace partagé et permet d'interagir avec ces éléments virtuels, tandis que la VR plonge l'utilisateur dans un environnement entièrement virtuel. Cette représentation aide à comprendre les distinctions fondamentales entre ces technologies.

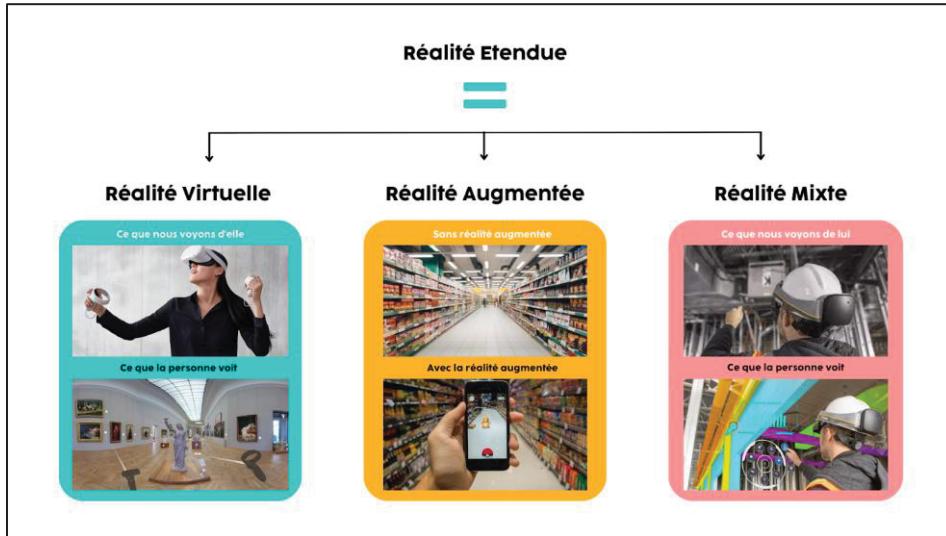


Figure 2.5 : Image représentant les 3 technologies, tirée du site <https://www.jexplore.co/blog/realite-virtuelle-realite-augmentee-realite-mixte-3d-quelles-differences-pour-quels-usages>

2.2.2 Composantes d'un système RA

Un système de RA est composé de plusieurs éléments essentiels, travaillant en synergie pour créer une expérience immersive. Au cœur du système se trouve l'unité de traitement, comprenant des ordinateurs graphiques puissants et des logiciels spécialisés. Cette unité est responsable de la création et de la gestion du contenu virtuel affiché en RA, assurant un rendu en temps réel et une intégration fluide avec l'environnement réel (Van Krevelen et Poelman, 2010).

Les interfaces utilisateur jouent un rôle crucial dans l'interaction entre l'utilisateur et le contenu augmenté. Elles peuvent inclure des dispositifs tangibles, des interfaces haptiques pour le retour tactile, la reconnaissance gestuelle, le suivi du regard, et même des commandes vocales, offrant ainsi une variété de moyens pour manipuler et interagir avec les éléments virtuels (Van Krevelen et Poelman, 2010).

Les outils de développement sont essentiels pour la création d'applications RA. Ils comprennent des bibliothèques logicielles spécifiques, des plateformes de développement RA comme ARCore ou ARKit, des plugiciels pour les moteurs de jeu, et des outils de création de

contenu 3D. Ces outils permettent aux développeurs de concevoir et d'implémenter efficacement des expériences RA riches et interactifs (Van Krevelen et Poelman, 2010).

Enfin, nous avons le système de suivi et le système d'affichage que nous allons détailler dans les parties suivantes. Pour visualiser et mieux comprendre ce qui précède, la Figure 2.6 illustre le fonctionnement d'un système de RA.

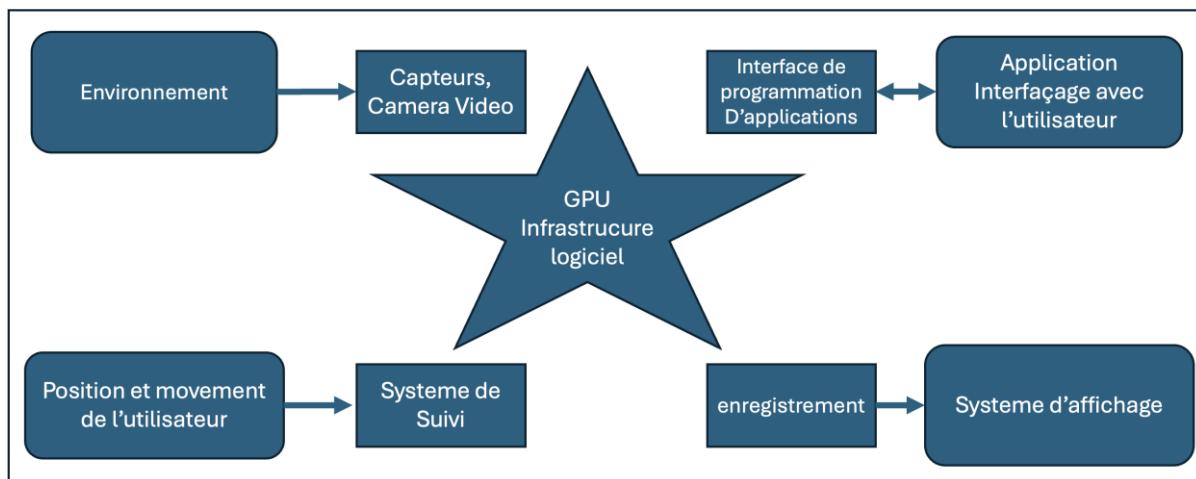


Figure 2.6 : Vue globale du fonctionnement d'un système de RA,
tirée de Van Krevelen et Poelman (2010)

2.2.2.1 Systèmes d'affichages

Les systèmes d'affichage en RA utilisent divers composants optiques, électroniques et mécaniques pour générer des images superposées aux objets physiques réels. On distingue principalement trois types de systèmes d'affichage en RA.

Premièrement, les affichages attachés à la tête incluent les affichages rétiniens qui projettent des images directement sur la rétine, les affichages montés sur la tête (HMD) qui utilisent des mini-écrans pour superposer des graphiques sur la vue réelle, et les projecteurs montés sur la tête qui redirigent les images vers des surfaces rétroréfléchissantes.

Deuxièmement les affichages tenus à la main, comme les tablettes et les téléphones mobiles, combinent un processeur, une mémoire, un écran et une technologie d'interaction pour superposer des graphiques augmentés sur des flux vidéo en direct capturés par des caméras intégrées.

En fin, la RA Spatiale (SAR) utilise des éléments optiques alignés spatialement, tels que des miroirs semi-transparents et des vidéoprojecteurs, pour projeter des images augmentées directement sur des surfaces complexes et texturées, surmontant ainsi les limitations ergonomiques et technologiques des systèmes AR conventionnels (Bimber et Raskar, 2005).

2.2.2.2 Systèmes de suivi

Les systèmes de suivi jouent un rôle crucial dans la RA. Ils permettent de déterminer la position et l'orientation d'un utilisateur ou d'un objet dans un espace physique. En combinant les informations contenues dans l'article de D.W.F. van Krevelen et R. Poelman (2010) intitulé « Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations » et l'article de Toqueer Ali Syed, Muhammad Shoaib Siddiqui, Hurria Binte Abdullah, Salman Jan, Abdallah Namoun, Ali Alzahrani, Adnan Nadeem et Ahmad B. Alkhodre (2022) intitulé « In-Depth Review of Augmented Reality: Tracking Technologies, Development Tools, AR Displays, Collaborative AR, and Security Concerns» , on peut alors distinguer six catégories.

1) Systèmes de suivi à base de capteurs

- **Mécaniques** : utilisés initialement par Sutherland avec le premier casque HMD, ces systèmes nécessitent du matériel monté au plafond pour suivre les mouvements de l'utilisateur.
- **Ultrasoniques** : utilisés depuis les débuts de l'AR, ces systèmes envoient et reçoivent des signaux ultrasoniques pour déterminer la position.
- **Magnétiques** : Les trackers magnétiques mesurent les distances dans des champs électromagnétiques, offrant une solution robuste pour la recherche en VR et AR

2) Systèmes de positionnement global (GPS)

Utilisent les GPS, ces derniers peuvent être améliorés avec des technologies telles que le WAAS et le RTK, qui permettent des précisions allant jusqu'à quelques centimètres (Van Krevelen et Poelman, 2010).

3) Systèmes radio

Basés sur des ondes radio ultra-larges bandes, ces systèmes nécessitent la préparation de l'environnement avec des puces RFID actives et des points d'accès sans fil pour suivre les mouvements (Van Krevelen et Poelman, 2010).

4) Systèmes inertiels

Utilisent des accéléromètres et des gyroscopes pour estimer les positions sans nécessiter d'environnement préparé. Ils sont souvent combinés avec d'autres systèmes pour minimiser les erreurs dues à la dérive (Van Krevelen et Poelman, 2010).

5) Systèmes optiques

Utilisent des caméras pour estimer la pose en 6 degrés de liberté des utilisateurs et des objets. Les approches basées sur la vision peuvent reconnaître des repères et détecter les mouvements relatifs entre les images (Van Krevelen et Poelman, 2010).

6) Systèmes hybrides

Combinent plusieurs technologies pour améliorer la précision et compenser les faiblesses des méthodes respectives. Par exemple, les techniques de SLAM et de suivi inertiel sont souvent utilisées ensemble pour créer des systèmes de suivi plus robustes (Syed *et al.*, 2022).

2.2.3 Microsoft HoloLens 2 (MS HoloLens 2)

Le Microsoft HoloLens 2 est un ordinateur holographique qui fonctionne sans fil. Il remplace la première version de l'HoloLens en apportant plus de confort et de nouvelles fonctions pour le travail en équipe en réalité mixte. L'appareil utilise le système Windows Holographic, basé sur Windows 10, ce qui permet aux utilisateurs et développeurs de travailler sur une plateforme stable et sécurisée (Microsoft, 2023).

2.2.3.1 Composants principaux et architecture

Le Microsoft HoloLens 2 comprend plusieurs composants (voir Figure 2.7) qui fonctionnent ensemble. La visière contient les capteurs et les écrans. Elle peut être relevée quand on porte le casque. Le bandeau permet d'ajuster l'appareil. Il possède une molette de réglage à l'arrière. L'utilisateur tourne cette molette vers la droite pour serrer le bandeau. Cette méthode garantit un bon ajustement sur la tête.

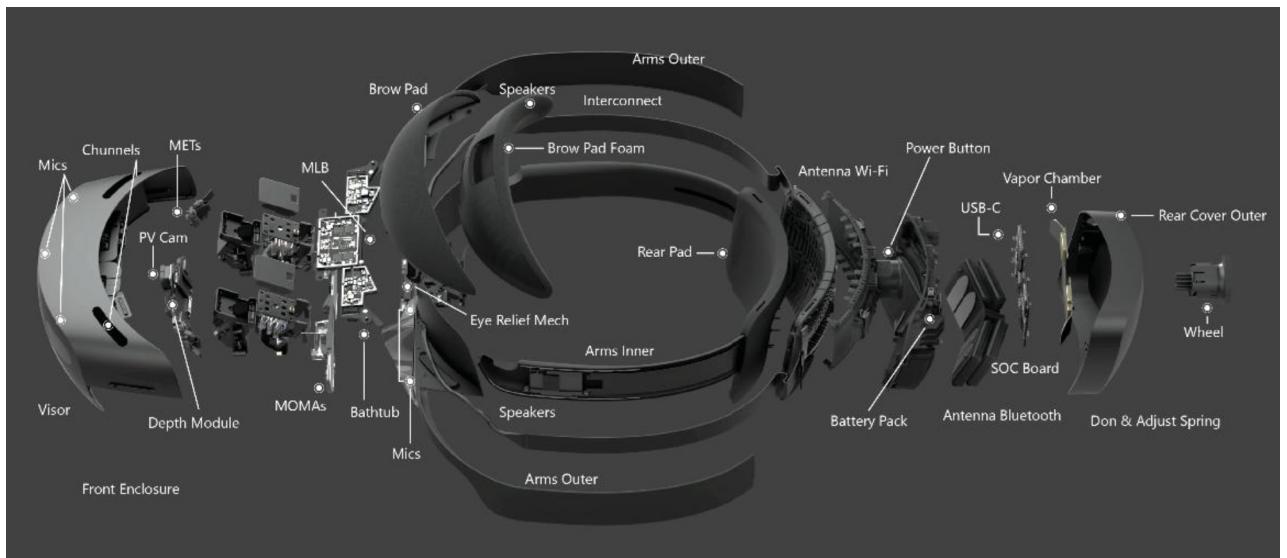


Figure 2.7: Architecture matérielle du MS HoloLens 2 extraite du site learn.microsoft.com

1) Interface de contrôle et connectivité

Les boutons de contrôle sont placés sur la visière. Les boutons de luminosité se trouvent du côté gauche près de la tempe. Les boutons de volume sont du côté droit. Le bouton d'alimentation est situé sur le côté droit du boîtier arrière. Le port USB-C se trouve juste en dessous du bouton d'alimentation. Ce port sert à charger l'appareil et à le connecter à un ordinateur (Microsoft, 2023).

2) Système d'affichage et optiques

Le système d'affichage utilise des lentilles transparentes appelées guides d'ondes. Ces lentilles superposent les hologrammes sur l'environnement réel. L'appareil possède des moteurs de

lumière 2K. La densité dépasse 2,5k radiants par unité. Le système adapte l'affichage selon la position des yeux de l'utilisateur. Cette fonction améliore le confort visuel (Microsoft, 2023).

3) Architecture des capteurs

Les MS HoloLens 2 contiennent plusieurs types de capteurs (voir Figure 2.8). Quatre caméras de lumière visible suivent les mouvements de la tête. Deux caméras infrarouges suivent les mouvements des yeux. Un capteur de profondeur Time-of-Flight de 1 MP mesure les distances. Une unité de mesure inertielle comprend un accéléromètre, un gyroscope et un magnétomètre. La caméra principale de 8 MP prend des photos et films en 1080p30. Cette caméra permet de capturer la réalité mixte (Microsoft, 2023).

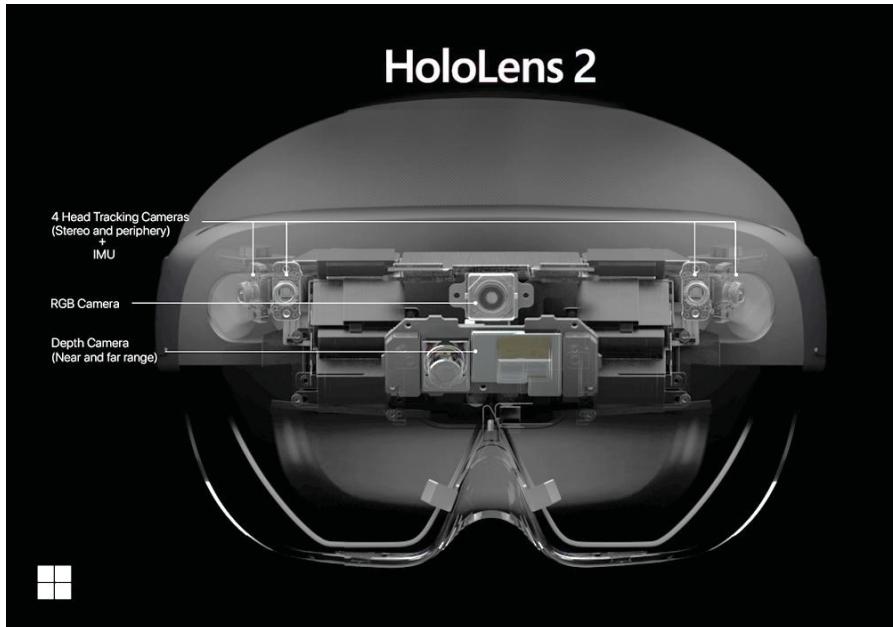


Figure 2.8 : Système de capteurs du MS HoloLens 2 extraite du site learn.microsoft.com

4) Performance audio et traitement vocal

Le système audio comprend un réseau de cinq microphones. Ces microphones capturent la voix et reconnaissent les commandes. Les haut-parleurs intégrés produisent un son spatial. Cette configuration permet à l'utilisateur d'entendre son environnement tout en recevant le son des applications (Microsoft, 2023).

5) Puissance de calcul et connectivité

Le processeur principal est un Qualcomm Snapdragon 850. Une unité de traitement holographique accompagne ce processeur. Cette unité est conçue pour les calculs de réalité mixte. L'appareil contient 4 Go de mémoire et 64 Go de stockage. Il supporte le Wi-Fi 802.11ac et le Bluetooth 5.0. Le port USB Type-C permet de connecter différents appareils (Microsoft, 2023).

6) Gestion énergétique et ergonomie

La batterie lithium fonctionne pendant 2 à 3 heures d'utilisation. Elle peut rester en veille jusqu'à deux semaines. L'appareil fonctionne pendant qu'il se charge. Le système ne possède pas de ventilateurs. Il fonctionne donc en silence. Le chargeur fourni délivre 18W. Il faut au minimum 15W pour maintenir la charge pendant l'utilisation. L'appareil pèse 566 grammes. Le bandeau s'adapte à toutes les tailles de tête. Il peut se porter par-dessus des lunettes. La boîte contient un coussin frontal, une sangle, un chargeur avec câble USB-C et un tissu de nettoyage (Microsoft, 2023).

2.2.3.2 Le spatial mapping

Le spatial mapping fournit une représentation des surfaces du monde réel autour de l'utilisateur HoloLens. Cette technologie permet aux développeurs de créer des expériences de réalité mixte en fusionnant le monde physique avec le monde virtuel.

Cette fonctionnalité est disponible sur MS HoloLens première génération et MS HoloLens 2, mais pas sur les casques immersifs traditionnels. Cette limitation vient de la nécessité d'avoir des capteurs spécialisés pour cartographier l'environnement en temps réel.

1) Pourquoi utiliser le spatial mapping

Le spatial mapping permet de placer des objets holographiques sur des surfaces réelles. Cette fonction ancre les objets dans le monde de l'utilisateur et exploite les indices de profondeur du monde réel. Quand les hologrammes sont occultés par d'autres hologrammes ou par des objets réels, cela convainc l'utilisateur que ces éléments virtuels sont présents dans son espace physique. Les hologrammes qui flottent dans l'espace ou qui suivent l'utilisateur perdent cette crédibilité.

Pour améliorer l'expérience utilisateur, il faut visualiser les surfaces lors du placement d'hologrammes. Une grille projetée aide les utilisateurs à comprendre où placer leurs hologrammes et révèle les zones non cartographiées (Zeller, 2023).

2) Architecture et fonctionnement technique

Le système utilise deux types d'objets interconnectés. Le « Spatial Surface Observer » permet à l'application de définir les régions d'intérêt. Les « Spatial Surfaces » représentent les surfaces détectées dans l'environnement.

Le processus fonctionne ainsi : l'application fournit au Spatial Surface Observer des volumes englobants qui définissent les régions où elle veut recevoir des données de cartographie spatiale. En réponse, le système génère des Spatial Surfaces qui correspondent à chaque volume défini.

Ces volumes peuvent adopter deux comportements selon les besoins de l'application. Ils peuvent être stationnaires, fixés dans une position basée sur le monde réel. Ils peuvent aussi être attachés au HoloLens, se déplaçant avec l'appareil sans rotation quand l'utilisateur bouge dans l'environnement.

Chaque Spatial Surface décrit des surfaces du monde réel dans un petit volume d'espace, représentées sous forme de maillage triangulaire attaché à un système de coordonnées spatiales verrouillé au monde. Quand le HoloLens collecte de nouvelles données sur l'environnement et

que des changements se produisent, les Spatial Surfaces apparaissent, disparaissent et évoluent (Zeller, 2023).

3) Différence avec scene understanding

Le Scene Understanding fournit une représentation structurée de l'environnement en combinant le spatial mapping avec l'IA. Cette technologie utilise un Scene Observer pour calculer une nouvelle scène et génère trois types d'objets : des maillages simplifiés de la structure des pièces, des régions planaires (Quads) pour le placement, et un instantané du maillage spatial mapping.

Le Spatial Mapping fonctionne dans une « bulle » de taille limitée autour de l'utilisateur. Scene Understanding SDK offre une portée illimitée avec toutes les données scannées dans le rayon de requête.

Cette différence se manifeste également dans la gestion des mises à jour. Le Spatial Mapping propose des mises à jour à faible latence des régions de maillage modifiées grâce aux événements SurfacesChanged, alors que Scene Understanding fournit un instantané statique nécessitant une nouvelle requête complète pour obtenir des données mises à jour.

Pour résumé, le Spatial Mapping te donne les données brutes de géométrie, tandis que Scene Understanding analyse ces données pour comprendre et structurer l'environnement de manière intelligente (Microsoft, 2022).

2.2.3.3 World Locking Tools

Les systèmes de suivi de tête « inside-out », tels que ceux utilisés dans le HoloLens, représentent une technologie remarquable qui excelle dans la détection de la position de la tête par rapport aux caractéristiques physiques environnantes. Cependant, ces systèmes présentent certaines limitations importantes qui affectent directement les applications de réalité mixte. En effet, bien qu'ils soient efficaces pour localiser la tête relativement aux éléments du monde réel, ils éprouvent des difficultés à déterminer précisément la position de la tête par rapport à ses positions antérieures. Ainsi, lorsque la tête se déplace du point A vers le point B, le système de suivi commet généralement de légères erreurs dans l'estimation de la distance parcourue,

phénomène communément appelé « problème d'échelle ». De plus, quand la tête retourne du point B vers le point A, le système présente à nouveau des imprécisions dans le calcul de la distance, créant ce qu'on appelle la « dérive ».

Ces défaillances techniques se traduisent concrètement par des problèmes majeurs de cohérence spatiale dans les applications de réalité mixte. Par conséquent, chaque ancre spatiale Unity® bouge indépendamment dans l'espace virtuel pour tenter de rester stationnaire dans le monde physique, mais cette approche individuelle provoque des mouvements relatifs entre les objets ancrés séparément, compromettant ainsi la précision des configurations (layouts) virtuels. En plus, la portée limitée des ancrées spatiales à environ 3 mètres génère des erreurs croissantes pour les objets de grande taille, où les points éloignés de l'ancré subissent l'effet de levier et perdent leur verrouillage mondial. À titre d'exemple, parcourir 10 mètres physiques entre deux codes QR peut correspondre à 11 mètres dans l'espace virtuel, désalignant les hologrammes de leurs positions réelles attendues.

C'est précisément dans ce contexte que les World Locking Tools interviennent pour résoudre ces problèmes de manière globale et efficace. D'une part, concernant la dérive, ces outils peuvent reconnaître que la tête est revenue près du point A en analysant les caractéristiques physiques environnantes et corriger ainsi les coordonnées de la tête. D'autre part, pour le problème d'échelle, les World Locking Tools peuvent utiliser les informations fournies par l'application pour connaître la véritable position du point B par rapport au point A et rectifier la distance parcourue en conséquence. En outre, cette solution fournit un système de coordonnées stable qui verrouille l'ensemble de la scène avec un pool partagé d'ancres plutôt que des ancrages individuels. L'outil minimise également les incohérences visibles grâce à des ajustements de caméra appropriés et peut calibrer les distances entre l'espace virtuel et physique, absorbant discrètement les écarts de dérive pour maintenir l'alignement des hologrammes. Conséquemment, les ajustements sont appliqués de manière fluide à toutes les ancrées le long du parcours, garantissant que les objets virtuels restent parfaitement positionnés par rapport à leurs références physiques (Mollis, 2024).

2.2.4 Impact de la RA sur les performances d'assemblage et d'inspection

La RA a fait l'objet de nombreuses études visant à évaluer son efficacité dans les processus d'assemblage industriel. En effet, plusieurs recherches ont démontré les avantages potentiels de cette technologie, tout en mettant en lumière certaines limitations persistantes.

Tout d'abord, Qin et al. (2021) et Tang et al. (2003) ont respectivement examiné l'impact de différents modes d'affichage RA sur l'assemblage de cadres en bois et d'objets divers. Leurs résultats convergent pour montrer une réduction significative du temps d'assemblage, des erreurs et de la charge cognitive des opérateurs. Cependant, ces études ont également mis en évidence des limitations telles que le champ de vision restreint des casques RA et les risques de tunnelling de l'attention.

Par ailleurs, des recherches plus récentes ont permis de développer des applications RA plus sophistiquées. Ainsi, Chiew et Sung (2022) ont conçu une application spécifique pour guider l'assemblage d'ordinateurs portables, démontrant l'efficacité de la RA pour des tâches complexes. De même, Jingfei Wang et al. (2024) ont élaboré une méthode d'évaluation de l'assemblage manuel intégrant une simulation haute-fidélité avec l'humain dans la boucle, utilisant MS HoloLens 2.

Dans une approche différente, Jiarui Wang et al. (2024) ont développé un système d'assistance à l'assemblage basé sur la RA spatiale (SAR) pour l'industrie aéronautique. Bien que ce système offre une flexibilité accrue, il présente encore des limitations en termes de temps réel et de dépendance à un modèle numérique précis.

Enfin, l'étude d'Ahn, Han et Al-Hussein (2019) sur un système RA pour le contrôle qualité dans la construction modulaire a démontré une précision d'alignement remarquable, mais reste sensible aux conditions environnementales.

Il convient également de mentionner l'étude de Bae et Han (2021), qui a développé une approche d'inspection de la qualité hors site basée sur la vision pour la construction modulaire. Cette étude a utilisé un système projecteur-caméra pour reconstruire des nuages de points 3D et les comparer à un modèle virtuel. Les résultats ont montré une précision d'inspection de 7 mm pour les erreurs dimensionnelles et une détection efficace des pièces manquantes. Cependant, cette approche présente des limitations, notamment une sensibilité aux conditions

d'éclairage élevé et la nécessité d'une distance de projection spécifique, ce qui peut être contraignant dans certains environnements industriels.

En conclusion, ces diverses études illustrent les progrès significatifs réalisés dans l'application de la RA à l'assemblage industriel. Néanmoins, elles soulignent également la nécessité de poursuivre les recherches pour surmonter les limitations actuelles et valider l'efficacité de la RA dans des contextes professionnels réels. Malgré ces défis, la RA promet d'améliorer considérablement l'efficacité et la précision des processus d'assemblage dans divers secteurs industriels.

2.3 Marqueurs fiduciaires et calibration pour la RA

La section 2.3 examine les fondements techniques essentiels à l'implémentation efficace de la Réalité augmentée, en se concentrant sur deux aspects cruciaux : les marqueurs fiduciaires et les méthodes de calibration. Ces éléments constituent l'infrastructure permettant l'alignement précis entre le monde réel et les objets virtuels, un défi fondamental pour toute application de RA fonctionnelle. L'analyse porte tant sur l'optimisation des marqueurs que sur les approches innovantes de calibration développées pour répondre aux contraintes spécifiques des dispositifs d'affichage transparent.

2.3.1 Marqueurs fiduciaires : fondements et optimisation

Les marqueurs fiduciaires jouent un rôle essentiel dans les applications de Réalité augmentée, permettant la détection précise de la position et de l'orientation des objets dans l'espace. Malgré la popularité d'ARToolKit (Augmented Reality Toolkit) comme bibliothèque open source pour le suivi des marqueurs, plusieurs problèmes persistent, notamment la qualité des marqueurs et la confusion entre marqueurs similaires (Khan *et al.*, 2018).

Ces marqueurs fiduciaires se présentent généralement sous forme de motifs visuels distincts qui servent de points de référence pour l'alignement des contenus virtuels sur le monde réel. L'optimisation de ces marqueurs s'avère cruciale pour garantir une détection robuste dans différentes conditions environnementales. (Costa *et al.*, 2024) ont réalisé une évaluation approfondie de plusieurs algorithmes de suivi basés sur des marqueurs fiduciaires pour le

casque MS HoloLens 2, comparant quatre solutions majeures : Vuforia, Mixed Reality Toolkit QR Code, ARToolKit et ArUco (Augmented Reality University of Cordoba).

2.3.1.1 Caractéristiques des marqueurs efficaces

L'optimisation des marqueurs fiduciaires repose sur plusieurs attributs clés identifiés (Khan et al., 2018):

1. **Rapport noir/blanc optimal** : Un ratio entre 17% et 34% serait idéal pour la détection efficace des marqueurs ARToolKit, la bordure noire autour du marqueur jouant un rôle crucial dans sa reconnaissance.
2. **Complexité de l'information interne** : Un marqueur trop simple risque de ne pas être suffisamment distinct dans une bibliothèque importante, tandis qu'un marqueur trop complexe peut ralentir la détection. Un seuil de complexité de 0,76 a été recommandé par les auteurs.
3. **Netteté des bords et suppression du bruit** : La précision de la détection dépend fortement de la clarté des contours du marqueur, nécessitant l'élimination des artefacts et les bruits qui pourraient perturber la reconnaissance.
4. **Distinction entre marqueurs** : Pour éviter la confusion entre marqueurs similaires, une mesure de similarité basée sur la corrélation d'images est utilisée, avec un seuil de 0,46 au-delà duquel le risque de confusion devient significatif.

2.3.1.2 Comparaison des systèmes de suivi de marqueurs

Dans le contexte industriel spécifique des chantiers navals, une étude pratique a comparé différentes solutions de marqueurs dans des conditions d'éclairage variables (Blanco-Novoa et al., 2018). Cette évaluation a révélé que ARToolkit (voir Figure 7), notamment avec des marqueurs binaires optimisés, offrait des distances de reconnaissance et de suivi nettement supérieures (jusqu'à 26 m dans des conditions optimales) par rapport à Vuforia, qui atteignait généralement moins de 2 m pour certains types de marqueurs.

(Costa et al., 2024) ont apporté des résultats complémentaires en utilisant le système OptiTrack comme référence de haute précision. Leur analyse a démontré que :

- **ArUco** (voir Figure 2.9) se distingue par une grande précision pour l'estimation de la translation, particulièrement à des distances proches, même si cette précision diminue à plus grande distance.
- **Vuforia et les marqueurs QR Code** (voir Figure 2.9) présentent de meilleures performances en termes de stabilité en rotation.
- **ARToolKit** montre une meilleure précision de rotation à distance.

Ces résultats soulignent l'importance de sélectionner l'algorithme de suivi en fonction des exigences spécifiques de l'application envisagée. Pour une application nécessitant une excellente estimation de la translation, ArUco apparaît comme le meilleur choix, tandis que pour une meilleure stabilité en rotation, Vuforia et le suivi par QR Code sont plus performants.

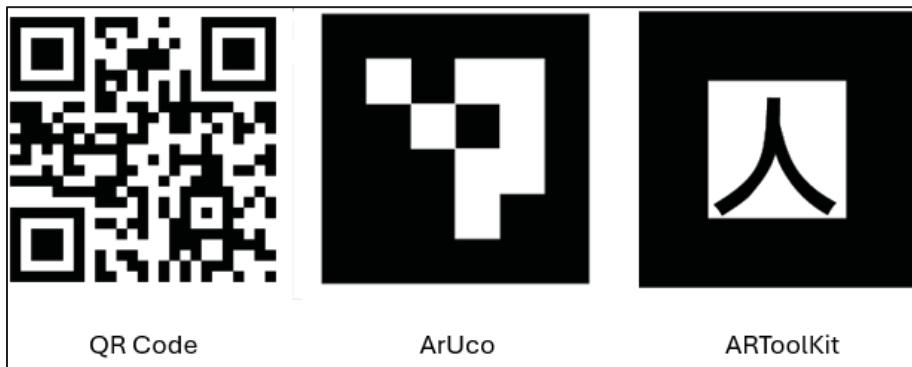


Figure 2.9: Marqueurs fiduciaires

2.3.2 Calibration des systèmes de RA

La calibration constitue une étape cruciale pour garantir l'alignement précis entre le monde réel et les éléments virtuels superposés. Cette problématique est particulièrement sensible dans les dispositifs à affichage transparent (optical see-through ou OST) comme le MS HoloLens.

2.3.2.1 Défis de la calibration des OST-HMD :

Comme le souligne (Hu, Baena et Cutolo, 2020) sur la calibration sans alignement, l'alignement précis des contenus virtuels avec le monde réel est fondamental pour éviter des

erreurs de parallaxe qui peuvent entraîner inconfort, confusion, voire erreurs critiques dans des applications médicales ou industrielles. Les méthodes traditionnelles comme la SPAAM (Single Point Active Alignment Method) reposent sur de multiples alignements manuels, ce qui les rend longues, subjectives et peu adaptées aux environnements hors laboratoire.

2.3.2.2 Approches innovantes de calibration

Face à ces limitations, plusieurs approches novatrices ont développé pour la calibration :

1. **Calibration sans alignement** (Hu, Baena et Cutolo, 2020): deux méthodes entièrement «Alignment-Free» ont été proposées pour simplifier la phase de calibration offline:
 - **Méthode basée sur la caméra** : utilise un appareil photographique comme substitut de l'œil de l'utilisateur. Cette approche exploite des techniques de photogrammétrie et de transformation par homographie pour estimer avec précision la matrice de projection du système d'affichage, suivant un modèle pinhole off-axis. La procédure consiste à afficher un motif visuel (généralement un échiquier virtuel) sur l'écran du dispositif OST, puis à le capturer via une caméra positionnée à l'emplacement approximatif de l'œil. Un algorithme PnP (Perspective-n-Point) est ensuite appliqué pour déterminer la transformation entre l'affichage et le système de caméra. Cette méthode présente l'avantage considérable de corriger la matrice de projection de façon globale, ce qui est particulièrement efficace lorsque plusieurs objets virtuels doivent être calibrés simultanément.
 - **Méthode basée sur l'objet** : cette approche différente en agissant directement sur la position 3D des objets virtuels affichés. Plutôt que de modifier la matrice de projection, cette méthode redéfinit la position du contenu virtuel en fonction de la trajectoire du regard (définie par le vecteur reliant le centre optique de l'œil ou de la caméra à la cible suivie). Fonctionnant comme une « boîte noire », cette approche traite directement la correction de localisation du contenu virtuel sans nécessiter une compréhension détaillée du modèle de projection

sous-jacent. Sa simplicité de mise en œuvre constitue un atout majeur, bien qu'elle puisse être plus sensible aux imprécisions du système de suivi.

Les résultats expérimentaux sur le MS HoloLens 1 ont démontré que ces deux méthodes permettaient d'obtenir un décalage moyen inférieur à 4 pixels (environ 1,5 mm) lorsque l'objet se trouvait à portée de bras, surpassant ainsi la calibration par défaut basée sur la correction de la distance interpupillaire (IPD).

2. **Suivi «inside-out» pour la navigation chirurgicale** (Gsaxner *et al.*, 2021) Les auteurs ont développé une méthode de suivi qui exploite exclusivement le matériel embarqué du MS HoloLens 2, utilisant les deux caméras frontales stéréoscopiques pour repérer des marqueurs sphériques rétro-réfléchissants. Cette approche s'appuie sur :

- **Triangulation stéréo** : Lorsque deux images synchronisées sont disponibles, les positions 3D des marqueurs sont reconstruites par triangulation, nécessitant une calibration précise des caméras en amont.
- **Filtre de Kalman étendu (SCAAT-EKF)** : Pour améliorer la robustesse du suivi, un filtre de Kalman qui intègre une mise à jour partielle dès qu'une mesure est disponible est utilisé, se révélant à la fois plus précis et efficace pour le suivi dynamique.

Les expérimentations ont démontré une erreur moyenne de 1.70 mm en translation et 1.11° en rotation en mode statique, des résultats comparables aux systèmes commerciaux de navigation chirurgicale, sans nécessiter d'infrastructure externe.

2.4 Concepts mathématiques pour la RA

Dans l'univers de la RA, la compréhension approfondie des mathématiques 3D est essentielle pour concevoir des expériences captivantes et crédibles. Cette section se focalisera sur cinq concepts fondamentaux. Tout d'abord, les systèmes de coordonnées et leurs conventions d'orientation, qui établissent le référentiel spatial dans lequel évoluent tous les objets virtuels.

Ensuite, les règles des systèmes droitier et gaucher, qui déterminent les conventions géométriques fondamentales pour les calculs vectoriels et les rotations. Puis, les opérations géométriques élémentaires : rotation, translation et homothétie (ou mise à l'échelle). Ces transformations sont cruciales pour le placement et la manipulation précise des éléments virtuels dans notre environnement réel. Ensuite, le système des angles d'Euler, qui joue un rôle clé dans la définition de l'orientation spatiale des objets virtuels. Enfin, les quaternions, une approche mathématique sophistiquée qui résout élégamment les problématiques liées aux rotations tridimensionnelles. Ces trois piliers mathématiques forment la base technique indispensable à toute application de RA performante. Leur maîtrise permet aux développeurs de créer une symbiose fluide entre les mondes numérique et physique, ouvrant la voie à des interactions naturelles et immersives (Izdebski, 2023).

2.4.1 Règle d'un système droitier et gaucher

Un système droitier est défini par l'application de la règle de la main droite pour déterminer la direction du produit vectoriel. Cette règle consiste à orienter les doigts de la main droite du premier vecteur vers le second vecteur, le pouce indiquant alors la direction résultante du produit vectoriel. Cette méthode établit une convention fondamentale qui détermine l'orientation de tous les calculs géométriques dans l'espace 3D. Dans un système droitier, la rotation positive s'effectue dans le sens antihoraire et le vecteur normal pointe vers le haut par rapport au plan de référence (voir Figure 2.10) (Izdebski, 2023).

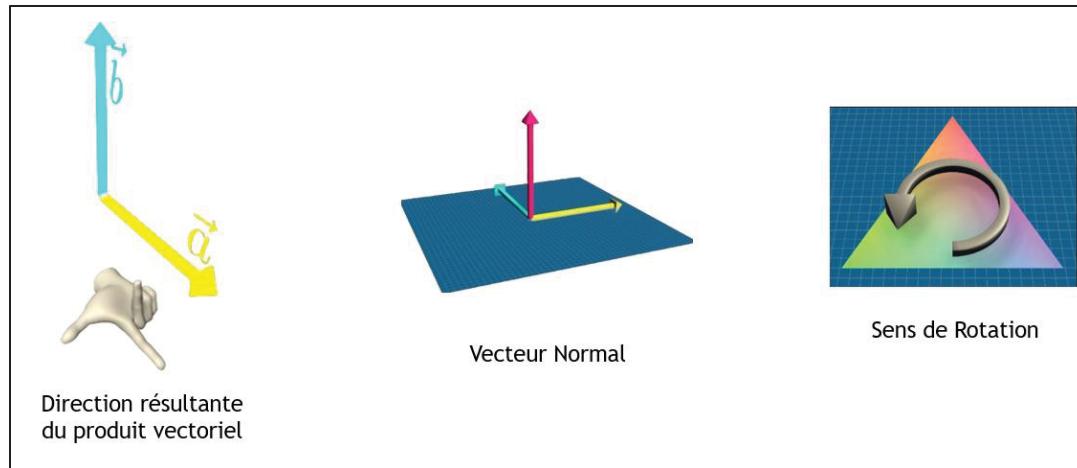


Figure 2.10: Règle de la main droite

Un système gaucher applique la règle de la main gauche pour les mêmes déterminations géométriques. Cette règle utilise la main gauche avec les doigts orientés du premier vers le second vecteur, mais le pouce gauche indique une direction résultante opposée à celle obtenue avec la main droite. Cette différence fondamentale crée un système géométrique inversé par rapport au système droitier. Dans un système gaucher, la rotation positive s'effectue dans le sens horaire et le vecteur normal pointe vers le bas par rapport au plan de référence (voir Figure 2.11) (Izdebski, 2023).

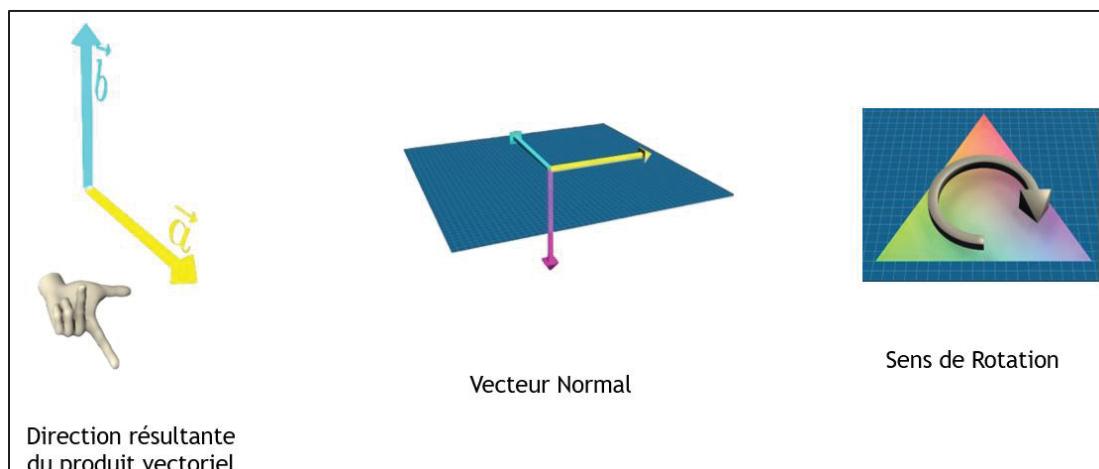


Figure 2.11: Règle de la main gauche

2.4.2 Système de coordonnées

La Direction du Haut ou bien « Up Direction » représente l'un des choix les plus critiques dans la définition d'un système de coordonnées 3D. Tandis que l'orientation de l'axe X fait l'objet d'un consensus universel (pointant vers la droite), le choix de l'axe vertical divise l'industrie en deux écoles de pensée distinctes. Le système où Y pointe vers le Haut, utilise l'axe Y comme direction verticale, créant une correspondance intuitive avec notre perception naturelle, tandis que le système où Z pointe vers le Haut, emploie l'axe Z comme direction verticale, une convention héritée des applications d'ingénierie et de CAO (Izdebski, 2023). Pour une représentation visuelle des différences entre ces deux approches, la Figure 2.12 illustre cela.

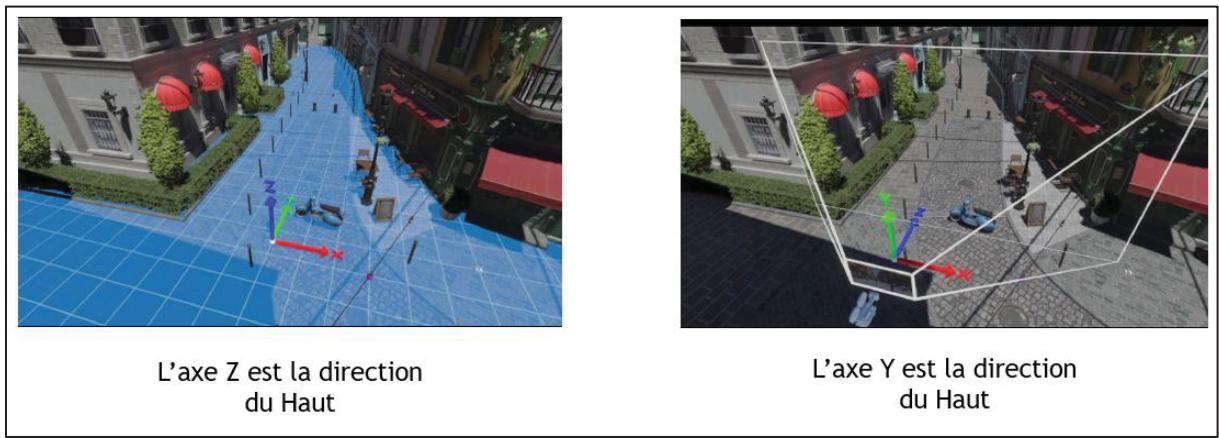


Figure 2.12: Différentes conventions pour l'axe vertical

Unity®, l'outil de développement des applications pour les MS HoloLens 2, utilise un système de coordonnées gaucher où Y pointe vers le haut, combinant la règle de la main gauche avec l'axe Y comme direction verticale (voir Figure 2.13). Cette configuration influence directement tous les aspects du développement dans Unity®, depuis la manipulation des GameObjects jusqu'aux calculs de physique et de rendu. Contrairement au logiciel Surveyor® utilisé pour manipuler l'iGPS qui utilise un système de coordonnées droitier où Z pointe vers le haut.

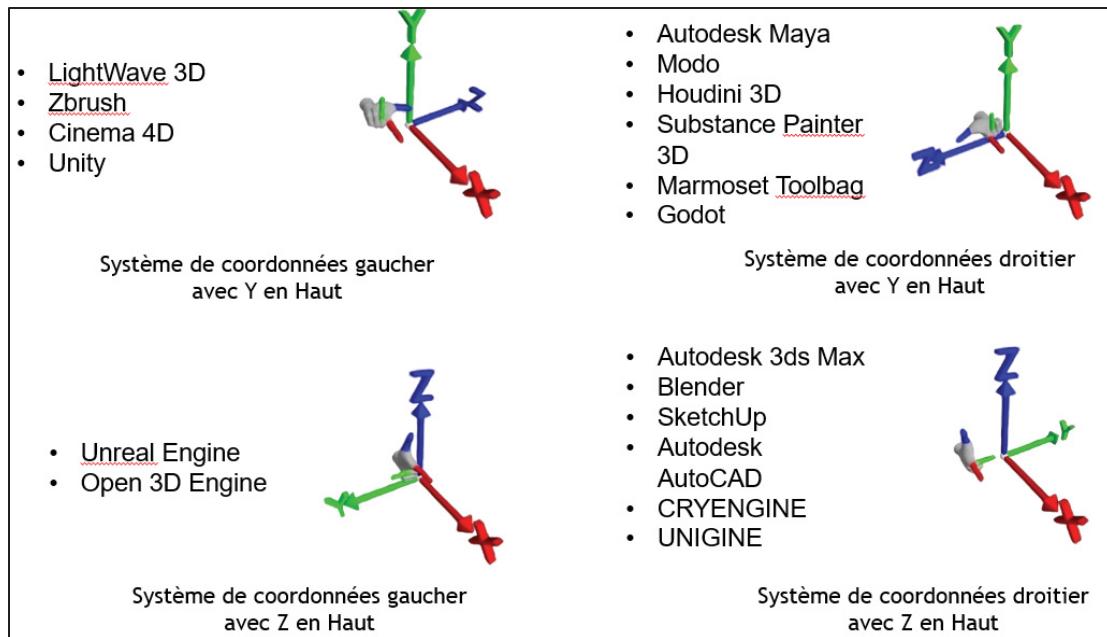


Figure 2.13: Conventions de coordonnées utilisées dans les logiciels 3D

2.4.3 Transformations de base

Les matrices de transformation 4×4 en coordonnées homogènes jouent un rôle central dans la représentation et la manipulation des transformations 3D. Elles offrent une solution élégante et puissante pour combiner diverses opérations géométriques telles que la translation, la rotation, la mise à l'échelle et le cisaillement au sein d'une structure mathématique unifiée. Cette représentation permet de traiter de manière cohérente les points et les vecteurs, en les distinguant grâce à leur quatrième coordonnée (1 pour les points, 0 pour les vecteurs). L'utilisation de coordonnées homogènes permet d'appliquer la translation de manière linéaire, ce qui n'est pas possible avec des matrices 3×3 conventionnelles. De plus, cette approche facilite la composition de multiples transformations par simple multiplication matricielle, résultant en une seule matrice qui englobe l'ensemble des opérations. Cette flexibilité et cette unicité de représentation sont particulièrement précieuses dans des domaines tels que l'infographie, la RA et le traitement d'images médicales, où la manipulation précise et efficace des objets dans l'espace 3D est essentielle.

La **translation** consiste à déplacer un point ou un objet dans l'espace 3D sans le faire pivoter ou changer sa taille. Mathématiquement, cela se traduit par l'ajout d'un vecteur de translation à chaque point de l'objet. Dans le contexte des transformations linéaires décrites dans le passage, la translation est représentée par la matrice de transformation ($T_{4 \times 4}$) suivante :

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & 0 & T_y \\ 0 & 0 & 1 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

La matrice $T_{x,y,z}$ représente des translations suivant les axes x, y et z respectivement dans un espace tridimensionnel (Lengyel, 2012).

Les **matrices de rotation** permettent de faire pivoter un objet autour de l'un des trois axes de coordonnées, ou autour de n'importe quel vecteur arbitraire. La structure de la matrice de rotation est plus complexe que celle des matrices de mise à l'échelle ou de translation, car elle nécessite l'utilisation de l'ensemble de la sous-matrice 3×3 supérieure gauche pour exprimer des rotations complexes.

Il est courant de décomposer des rotations arbitraires en une séquence de rotations plus simples, chacune s'effectuant autour d'un des trois axes principaux. Dans chaque cas, la rotation s'effectue selon un angle donné, autour de l'axe spécifié.

Les trois matrices R_x , R_y et R_z représentent des transformations qui font pivoter les points d'un angle θ (exprimé en radians) autour de l'origine des coordonnées, respectivement autour des axes X, Y et Z.

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\mathbf{R}_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{R}_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Les trois matrices représentent des rotations autour des axes x, y et z respectivement dans un espace tridimensionnel (Lengyel, 2012) (Goebel, 2023). Et la matrice de rotation sera obtenue par :

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_z \times \mathbf{R}_y \times \mathbf{R}_x \quad (2.5)$$

La **mise à l'échelle** (ou *Scaling*) est une transformation géométrique fondamentale en 3D, particulièrement importante dans le contexte de la Réalité augmentée. Le scaling consiste à modifier la taille d'un objet ou d'un vecteur dans l'espace tridimensionnel. Il existe deux types principaux de scaling :

Scaling uniforme : Dans ce cas, un vecteur \mathbf{P} est multiplié par un facteur a pour obtenir $\mathbf{P}' = a \cdot \mathbf{P}$. En trois dimensions, cette opération peut être représentée par une multiplication matricielle :

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Cette matrice \mathbf{S} représente une mise à l'échelle uniforme (Figure 2.14) un espace tridimensionnel où a est le facteur d'échelle pour les axes x, y et z respectivement (Lengyel, 2012).

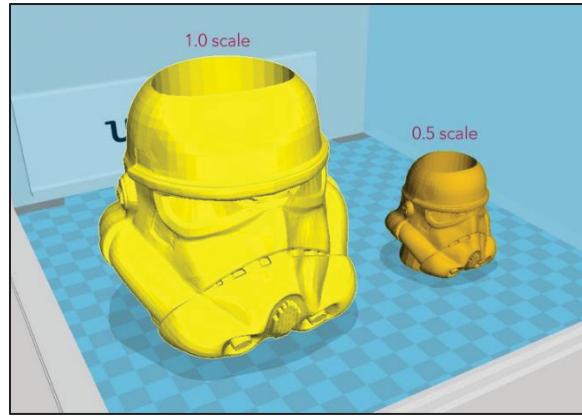


Figure 2.14 : Image représentant la mise à l'échelle, tiré du site <https://lyonsnewmedia.wordpress.com/2014/10/30/resizing-and-scaling-3d-objects-in-cura-a-visual-how-to-is-now-available>

Ici, le même facteur α est appliqué à toutes les dimensions, préservant ainsi les proportions de l'objet.

Scaling non uniforme : Cette méthode permet de modifier différemment l'échelle selon les axes x, y et z. La matrice de transformation devient :

$$S = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Cette matrice S représente une mise à l'échelle non uniforme, un espace tridimensionnel, où a , b et c sont les facteurs d'échelle pour les axes x, y et z respectivement (Lengyel, 2012) (Goebel, 2023).

Le scaling non uniforme (Figure 2.15) peut être encore plus complexe lorsqu'il est appliqué le long d'axes arbitraires (U, V, W) plutôt que les axes standards (x, y, z). Dans ce cas, la transformation implique des étapes supplémentaires de changement de base.

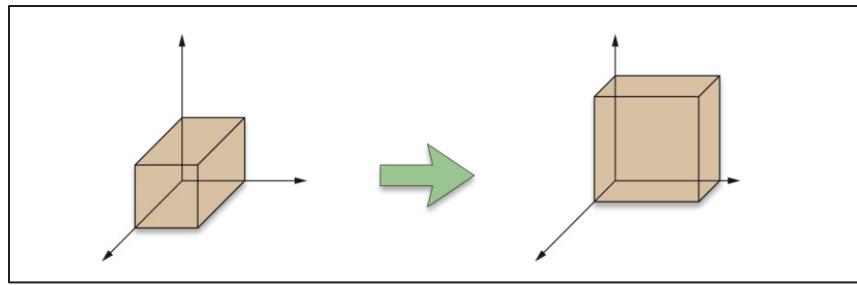


Figure 2.15 : Image représentant la mise à l'échelle non uniforme, tiré livre Mathematics for 3D game programming and computer graphics

L'importance de la mise à l'échelle (scaling) en RA est considérable. Il permet d'ajuster la taille des objets virtuels pour qu'ils s'intègrent de manière réaliste dans l'environnement physique, d'effectuer des zooms, ou de créer des effets visuels spécifiques. La maîtrise de ces concepts mathématiques est donc cruciale pour les développeurs cherchant à créer des expériences AR convaincantes et naturelles.(Lengyel, 2012).

2.4.4 Les angles d'Euler

Les angles d'Euler sont un ensemble de trois angles (θ, ϕ, ψ) qui représentent l'orientation dans l'espace. Chaque angle représente une rotation autour d'un des trois axes orthogonaux (par exemple, les axes x, y et z). L'ordre des rotations est important, car la multiplication matricielle n'est pas commutative. La représentation des orientations par un ensemble de trois angles est intuitive (voir Figure 2.16).

Cependant, les angles d'Euler présentent un inconvénient majeur appelé « Gimbal Lock » ou bien blocage de cardan. Ce phénomène se produit lorsqu'une rotation selon un angle qui réoriente l'un des axes pour qu'il s'aligne avec un autre axe. Toute rotation ultérieure autour de l'un ou l'autre de ces deux axes désormais colinéaires entraînera la même transformation du modèle, supprimant ainsi un degré de liberté du système.

Ainsi, les angles d'Euler ne sont pas idéalement adaptés pour accumuler des rotations. Une meilleure approche consiste à construire une matrice de transformation unique à partir d'un angle et d'un axe de rotation arbitraire. Une alternative élégante est l'utilisation des quaternions. (Goebel, 2023).

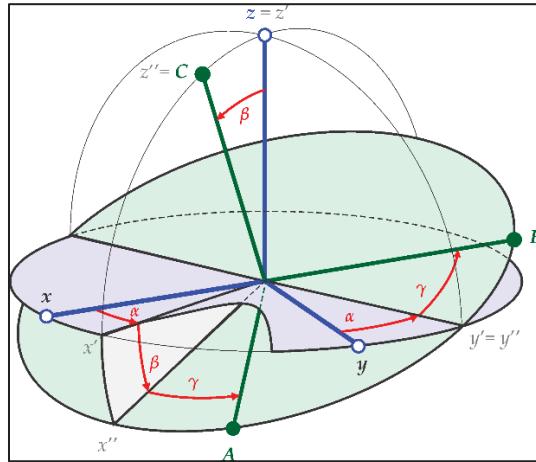


Figure 2.16 : Image représentant les angles d'Euler tiré du site
<https://easyspin.org/documentation/eulerangles.html>

2.4.5 Quaternions

Les quaternions offrent une méthode alternative pour décrire les rotations. Un quaternion est une quantité à quatre dimensions qui s'apparente quelque peu à un nombre complexe. Alors qu'un nombre complexe possède une partie imaginaire \vec{i} à côté de sa partie réelle, un quaternion comporte une composante vectorielle avec trois parties imaginaires, \vec{i} , \vec{j} et \vec{k} .

De la même manière qu'une matrice de rotation utilise un angle et un axe autour duquel effectuer la rotation, un quaternion utilise l'angle comme partie réelle et l'axe dans la partie vectorielle (imaginaire), produisant ainsi un quaternion qui représente une rotation autour de n'importe quel axe (voir Figure 2.17).

Une séquence de rotations peut être représentée par une série de quaternions multipliés entre eux, produisant un seul quaternion résultant qui encode les rotations combinées. Bien que cela puisse également être réalisé avec une séquence de matrices représentant des rotations autour des axes cartésiens multipliées entre elles, la méthode matricielle peut se heurter au problème de blocage de cardan.

Les quaternions constituent donc une méthode alternative attrayante pour représenter les rotations, car ils ne souffrent pas du blocage de cardan. Il est à noter qu'il est également possible

de convertir un quaternion en une matrice de rotation 3x3 et vice versa (Dusseault-Bélanger, 2010).

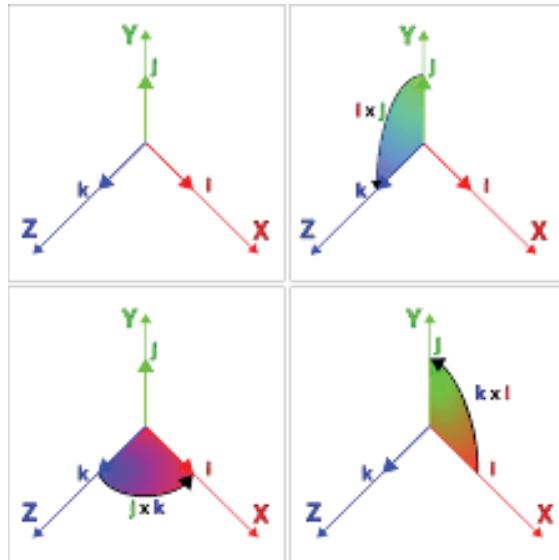


Figure 2.17 : Image représentant les Quaternions, tiré du site
<https://www.3dgep.com/understanding-quaternions/>

2.5 Synthèse du Chapitre 2

Dans ce chapitre, cette revue de littérature a permis d'explorer les développements récents dans les domaines de la métrologie 3D et de la RA (RA) appliquées aux processus d'assemblage et d'inspection industriels. Les systèmes de mesure tels que les lasers trackers, la photogrammétrie et l'iGPS offrent des solutions précises pour la mesure de coordonnées 3D, chacun avec ses avantages spécifiques.

La RA s'avère une technologie prometteuse pour l'assistance à l'assemblage et l'inspection. Les études examinées montrent son potentiel pour réduire les temps d'assemblage, minimiser les erreurs et alléger la charge cognitive des opérateurs. Cependant, des défis persistent, notamment en termes de limitations technologiques et d'intégration dans des environnements industriels complexes.

Cette revue met en évidence le besoin de recherches supplémentaires pour valider l'efficacité de ces technologies dans des contextes industriels réels et à long terme. Des études comparatives plus approfondies entre les méthodes traditionnelles et les approches basées sur

la RA sont nécessaires pour quantifier précisément les avantages et identifier les domaines d'application les plus prometteurs.

En conclusion, bien que des progrès significatifs aient été réalisés, le champ reste ouvert pour des innovations futures qui pourraient transformer fondamentalement les processus d'assemblage et d'inspection industriels.

CHAPITRE 3

OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

Le chapitre précédent a permis d'explorer l'état de l'art des technologies de métrologie 3D et de Réalité augmentée, ainsi que les concepts mathématiques sous-jacents essentiels à notre projet. Fort de cette base théorique, le présent chapitre détaille notre approche méthodologique pour développer un système d'assemblage assisté combinant la métrologie 3D et la Réalité augmentée.

Dans un premier temps, nous préciserons les objectifs spécifiques qui guideront notre démarche, chacun répondant à une limitation identifiée dans les solutions existantes. Nous aborderons ensuite la méthodologie proposée, en décrivant de manière détaillée les procédures et techniques employées pour atteindre ces objectifs.

3.1 Objectifs spécifiques

Notre projet vise à développer un système d'assemblage assisté intégrant la métrologie 3D (iGPS) et la réalité augmentée (MS HoloLens 2). Pour y parvenir, nous nous sommes fixé les objectifs spécifiques suivants :

1) Calibration du MS HoloLens 2

Le premier objectif est d'établir une procédure précise de calibration de la caméra frontale du MS HoloLens 2, en utilisant la méthode de détection d'échiquier. Cette calibration est fondamentale pour pouvoir ensuite détecter correctement les marqueurs fiduciaires et positionner les éléments virtuels avec précision dans l'environnement réel. La connaissance des paramètres intrinsèques et extrinsèques de la caméra permet de corriger les distorsions optiques et d'assurer la fiabilité des mesures effectuées.

2) Extraire les données du système iGPS via Surveyor®

Ce deuxième objectif consiste à développer une méthode d'extraction des informations du système iGPS en communiquant directement avec le logiciel Surveyor® via son API. Cette communication est essentielle pour accéder aux données de position et d'orientation en temps réel et les exploiter dans notre solution intégrée d'assemblage assisté.

3) Développer un logiciel pour PolyWorks™ Inspector

Le troisième objectif est de créer un logiciel permettant d'intégrer les données extraites du système iGPS dans le logiciel PolyWorks™ Inspector. Cette intégration permettra d'exploiter les fonctionnalités avancées de ce logiciel de métrologie industrielle tout en bénéficiant des capacités de suivi spatial du système iGPS.

4) Suivre la position de l'utilisateur du MS HoloLens 2 avec le système iGPS

Ce quatrième objectif vise à trouver un moyen permettant de suivre la position et l'orientation de l'utilisateur portant le MS HoloLens 2 dans l'espace de travail, en utilisant des capteurs iGPS montés sur le casque. Ce suivi permettra de maintenir l'alignement des hologrammes, quelle que soit la position de l'opérateur dans l'espace de travail.

5) Déterminer la matrice de transformation entre les repères iGPS et MS HoloLens 2

Le cinquième objectif consiste à calculer la matrice de transformation permettant de passer du repère de coordonnées du système iGPS à celui de la caméra du MS HoloLens 2. Cette transformation est l'élément clé permettant d'aligner correctement les modèles CAO virtuels avec les objets physiques dans l'espace de travail, mais aussi d'améliorer significativement les instructions de guidage en les contextualisant précisément par rapport à la position de l'utilisateur et des composants à assembler.

6) Développer une interface de RA guidant l'utilisateur

Le sixième objectif est de créer une application MS HoloLens 2 qui exploite la chaîne de transformation matricielle établie pour résoudre le défi fondamental de l'alignement précis entre les modèles CAO virtuels et les objets physiques. Cette application doit implémenter l'alignement automatique en temps réel en appliquant les matrices de transformation calculées, éliminant ainsi les processus manuels fastidieux identifiés dans les solutions existantes. Le système intègre des fonctionnalités complémentaires de guidage et d'inspection pour démontrer la viabilité de l'alignement précis dans un contexte industriel.

Ces objectifs spécifiques visent collectivement à surmonter les limitations des systèmes existants en termes de volume de mesure, de précision, de fonctionnalités de guidage et d'intégration entre les différentes technologies impliquées. Leur réalisation permettra d'établir un système d'assemblage assisté par métrologie plus efficace, plus flexible et mieux adapté aux environnements industriels modernes.

3.2 Méthodologie proposée

Notre méthodologie s'articule en quatre volets complémentaires pour répondre aux objectifs fixés. Premièrement, nous détaillerons le processus de calibration de la caméra du MS HoloLens 2 pour assurer la fiabilité de la détection et de l'affichage. Deuxièmement, nous aborderons la configuration du système iGPS, incluant sa calibration et l'extraction des données. Troisièmement, nous présenterons la méthode d'estimation de la matrice de transformation entre les repères du MS HoloLens 2 et du système iGPS. Enfin, nous décrirons le développement de l'interface de RA guidant l'utilisateur pendant les tâches d'assemblage, élément crucial pour concrétiser notre solution d'assistance visuelle (voir Figure 3.1).

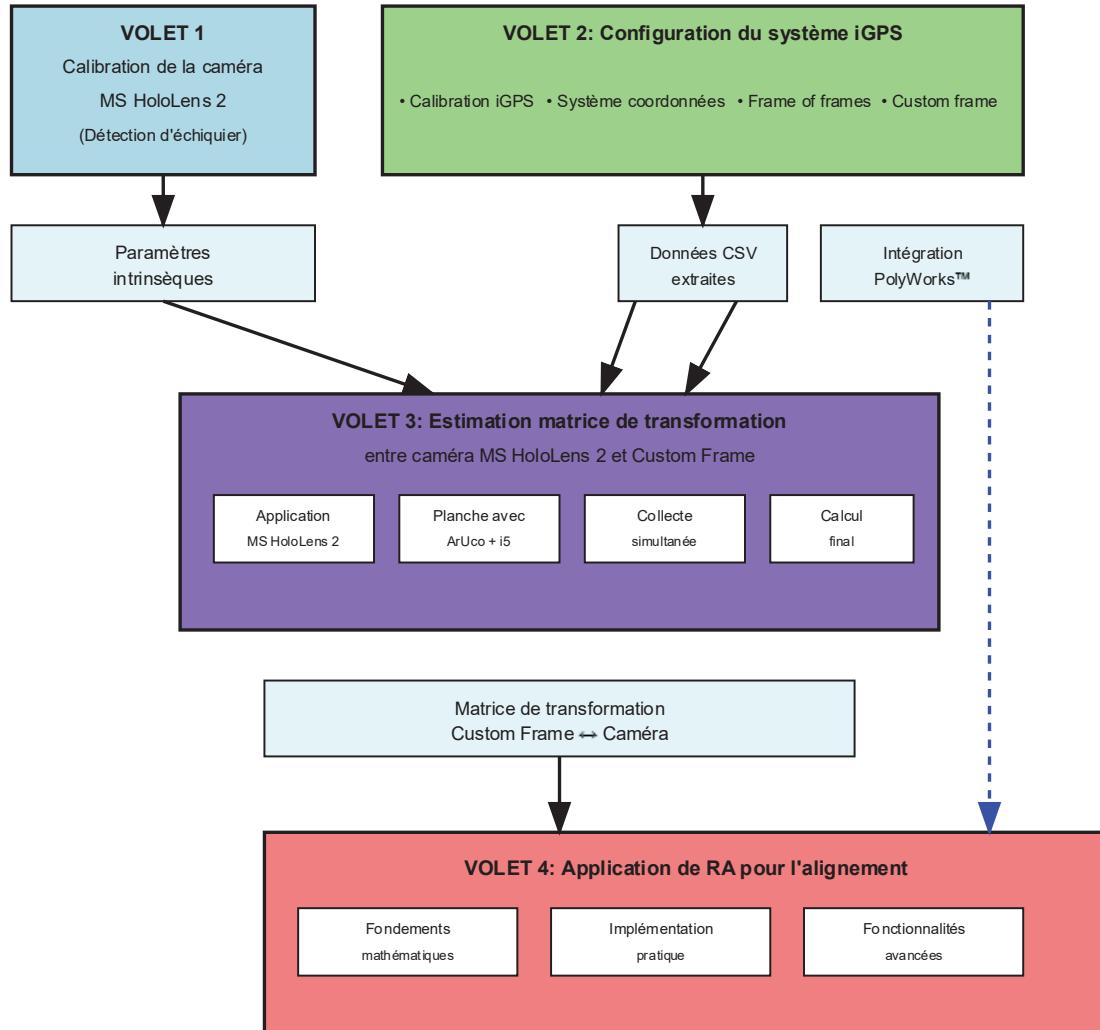


Figure 3.1 : Vue d'ensemble de la méthodologie d'assemblage assisté par métrologie 3D et Réalité augmentée

3.2.1 Environnement de développement et outils utilisés

La mise en œuvre de notre solution d'assemblage assisté par métrologie 3D et RA s'appuie sur un environnement technologique diversifié, intégrant des outils de développement, des

plateformes logicielles spécialisées et des frameworks dédiés à la Réalité augmentée. Cette section présente l'ensemble des versions logicielles utilisées dans ce projet.

Développement et moteur de jeu :

- **Unity® 2022.3.42f1**: Moteur de développement principal pour les applications MS HoloLens 2
- **Microsoft Mixed Reality Toolkit 3 (MRTK3)** : Framework pour le développement d'applications de réalité mixte
- **Visual Studio 2022 (version 17.11.4)** : Environnement de développement intégré pour C# et déploiement UWP

Métrologie et inspection :

- **PolyWorks™ Inspector 2024 IR11.1** : Logiciel de métrologie 3D pour l'analyse dimensionnelle et le contrôle qualité
- **Surveyor® 3.7.3** : Logiciel de contrôle et de calibration du système iGPS

Développement serveur et traitement de données :

- **Python 3.7.9** : Langage de programmation pour le serveur Flask et le traitement des données
- **Flask 2.0.1** : Framework web Python pour l'API serveur
- **OpenCV 4.5.3** : Bibliothèque de vision par ordinateur pour la calibration de caméra et la détection de marqueurs

RA comparative :

- **Vuforia 10.9.3** : Plateforme de RA utilisée pour les tests comparatifs

Système d'exploitation et plateforme cible :

- **Windows 10/11** : Système d'exploitation de développement
- **Windows Holographic** : Système d'exploitation des MS HoloLens 2

3.2.2 Calibration de Caméra par Détection d'Échiquier

La calibration de caméra est une étape essentielle en vision par ordinateur pour obtenir des mesures géométriques précises. Cette méthode, implémentée avec OpenCV, utilise un motif d'échiquier pour établir la correspondance entre le monde 3D et l'image 2D, permettant l'extraction des paramètres intrinsèques et extrinsèques de la caméra. Le processus se décompose en plusieurs phases distinctes (voir Figure 3.2).

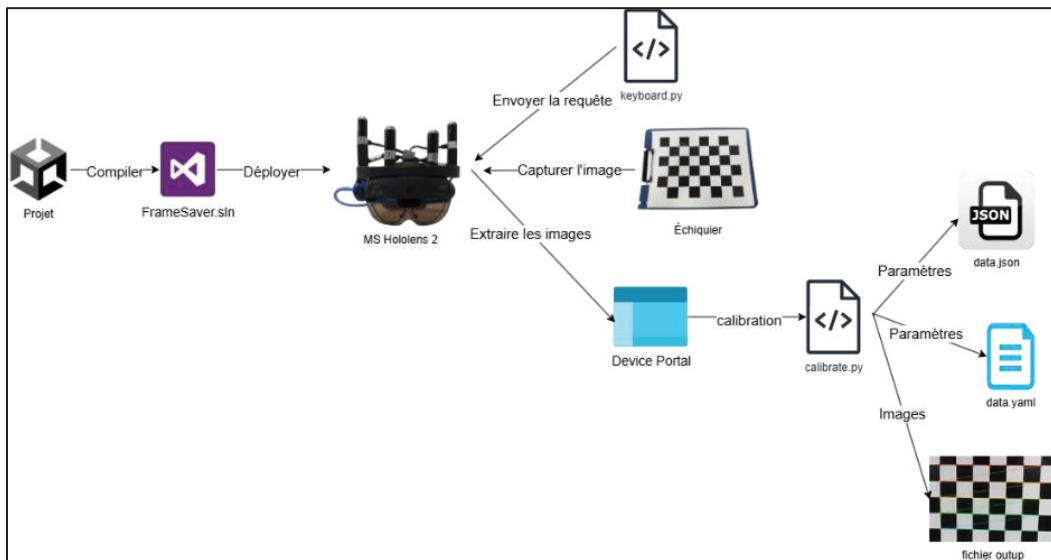


Figure 3.2 : Processus de calibration de la caméra par détection d'échiquier

3.2.2.1 Phase de préparation

Avant de commencer la capture d'images, il est impératif de préparer le matériel et le logiciel. Premièrement, l'application FrameSaver doit être compilée dans Unity®, en ciblant spécifiquement la plateforme MS HoloLens 2. Deuxièmement, il faut sélectionner, dans les paramètres du projet Unity®, une résolution de capture appropriée pour la caméra frontale, en se référant à la documentation Microsoft pour les options disponibles. Par conséquent, la résolution choisie influencera directement les paramètres de calibration. Troisièmement, l'application doit être déployée sur l'appareil MS HoloLens 2. En parallèle, un motif d'échec

(voir Figure 3.3) doit être imprimé; le fichier chessboard.pdf est fourni à titre d'exemple, mais un motif personnalisé peut être utilisé, à condition de connaître les dimensions exactes des carrés. Enfin, Le fichier keyboard.py doit être accessible sur l'ordinateur.

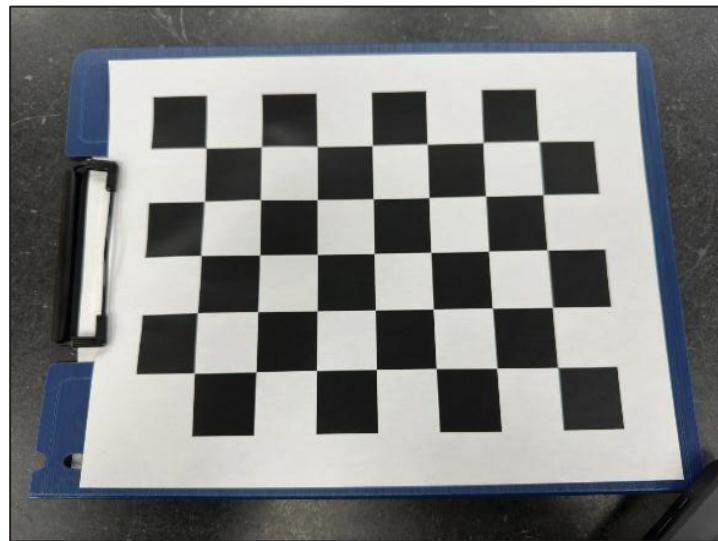


Figure 3.3 : Échiquier utilisé pour la calibration de la caméra du MS HoloLens 2

3.2.2.2 Phase de capture d'images

Une fois la préparation terminée, la capture d'images peut commencer. D'abord, l'application FrameSaver est lancée sur le MS HoloLens 2. Après un court délai, l'image de la caméra s'affiche, signalant que le système est prêt. Simultanément, sur l'ordinateur, le script Python keyboard.py est exécuté avec, comme argument, l'adresse IP (Internet Protocol) le MS HoloLens 2. Ce script établira alors une connexion UDP, permettant l'envoi de commandes clavier simulées. L'étape cruciale suivante est l'acquisition des images : l'échiquier doit être placé devant le MS HoloLens 2, de sorte qu'il soit visible dans le flux vidéo. Il est essentiel de varier l'angle, la distance et l'orientation de l'échiquier pour obtenir une couverture complète de l'espace image. À chaque nouvelle position de l'échiquier, la touche « Espace » du clavier est pressée. Par conséquent, le script Python envoie un message UDP aux lunettes MS HoloLens 2, déclenchant la capture et l'enregistrement de l'image courante. Ce processus est

répété pour un minimum de 15 à 20 positions différentes, car un plus grand nombre d'images avec des poses variées améliore la précision de la calibration.

3.2.2.3 Phase de récupération des images

Après la capture, les images doivent être récupérées. Pour ce faire, on accède au portail de l'appareil MS HoloLens 2 (Device Portal) via un navigateur web en se connectant à l'adresse IP du MS HoloLens 2. Ensuite, on navigue vers le répertoire File « Explorer > LocalAppData > FrameSaver > RoamingState ». Les images capturées, nommées séquentiellement (0.png, 1.png, etc.), y sont stockées. Ces images sont alors téléchargées sur l'ordinateur pour l'étape suivante.

3.2.2.4 Phase de calibration

La calibration proprement dite est effectuée à l'aide d'OpenCV. Le script Python **calibrate.py**, situé dans le dossier **OpenCVCALIB**, est utilisé. L'exécution de ce script requiert plusieurs arguments. Pour notre étude, le script a été configuré en définissant la taille du motif en nombre de coins internes (dans notre cas c'est 7x5) ainsi que la taille des carrés (une unité par défaut). Un tableau de points 3D, *pattern_points*, est généré, représentant les coins de l'échiquier dans un système de coordonnées mondial, positionné sur le plan Z=0.

a. Détection des points d'intérêt

Pour chaque image prise précédemment en utilisant le MS HoloLens 2, le script recherche le motif d'échiquier en utilisant `cv2.findChessboardCorners()`. Si le motif est détecté, les positions des coins sont affinées avec `cv2.cornerSubPix()`. Deux listes sont alors constituées :

- *obj_points*: contenant les coordonnées 3D du modèle d'échiquier (identiques pour toutes les images).
- *img_points*: contenant les coordonnées 2D des coins détectés dans l'image.

b. Calibration et extraction des paramètres

La fonction clé `cv2.calibrateCamera()` est utilisée pour effectuer la calibration. Elle prend en entrée les listes *obj_points* et *img_points*, ainsi que la taille des images. Cette fonction résout

un problème d'optimisation pour minimiser l'erreur de reprojection entre les points 2D observés et la projection des points 3D. Elle retourne plusieurs paramètres :

- **Matrice de caméra** (camera_matrix): Matrice 3x3 contenant les paramètres intrinsèques, notamment les distances focales (fx , fy) et le point principal (cx , cy). Ces paramètres définissent la projection 3D vers 2D.
- **Coefficients de distorsion** (dist_coefs): Vecteur décrivant la distorsion de l'objectif, incluant les distorsions radiale et tangentielle. Le flag CALIB_FIX_K3 peut être utilisé pour fixer le troisième coefficient de distorsion radiale à zéro.
- **Vecteurs de rotation** (rvecs) et de **translation** (tvecs): Pour chaque image, ces paramètres extrinsèques définissent la pose de la caméra par rapport à l'échiquier (système de coordonnées du monde).

En conséquence, le script analyse les images, détecte les coins de l'échiquier (voir Figure 3.4), et calcule les paramètres intrinsèques de la caméra. Les résultats sont sauvegardés dans le dossier output sous forme de fichiers data.yaml et data.json, contenant les matrices de caméra et les coefficients de distorsion au format OpenCV.

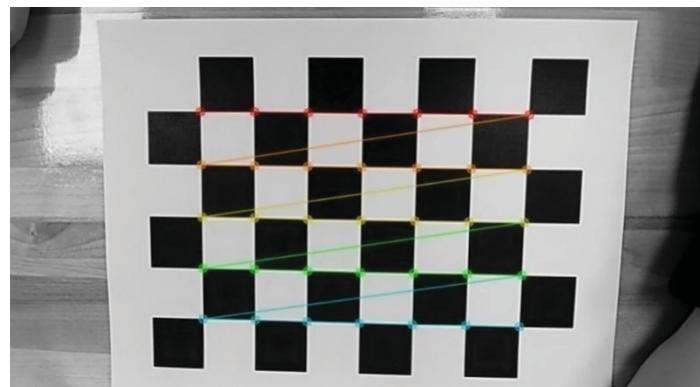


Figure 3.4 : Détection des coins de l'échiquier lors de la phase de calibration

3.2.3 Équipement de mesure

3.2.3.1 Calibration iPGS

Pour calibrer notre iGPS, la méthode d'étalonnage par faisceaux (« bundle calibration ») a été employée pour déterminer les positions relatives des émetteurs du système iGPS. Cette technique, implémentée via le logiciel Surveyor®, repose sur l'utilisation d'un cadre de référence dont la géométrie est rigoureusement définie. Dans le cas présent, la sonde i6 Long Reach a servi de cadre de référence. Cette sonde est caractérisée par la présence de deux récepteurs à son extrémité inférieure et de deux récepteurs supplémentaires à son extrémité supérieure, assurant ainsi une distribution spatiale des points de mesure.

Le processus d'étalonnage a consisté à déplacer la sonde i6 (voir Figure 3.5) et à collecter les mesures des rayons émis par chacun des émetteurs, en utilisant les récepteurs de la sonde. Ces mesures ont ensuite été traitées par le logiciel Surveyor®. Le logiciel ajuste les positions des émetteurs afin de minimiser les différences (« résidus ») entre les rayons mesurés et les points de référence (« bundle points ») sur la i6. Les positions des émetteurs sont ensuite mises à l'échelle en fonction des dimensions de la i6.

Il est important de noter que, bien que la méthode d'étalonnage par faisceaux soit relativement rapide à mettre en œuvre, elle présente une sensibilité aux variations des conditions environnementales. Par conséquent, des recalibrations périodiques peuvent s'avérer nécessaires pour maintenir la précision du système.



Figure 3.5 : Sonde i6 Long Reach de l'iGPS

3.2.3.2 Système de coordonnées

Après l'étalonnage des émetteurs, l'étape suivante consiste à définir un système de coordonnées local (appelé « World Coordinate System » dans Surveyor®). Par défaut, l'origine de ce système de repère est attribuée à l'un des émetteurs. Cependant, pour assurer une meilleure cohérence des mesures, il est recommandé de définir un système de coordonnées personnalisé. Pour ce faire, la sonde i6 Long Reach a été utilisée. Plus précisément, la pointe de probing située à l'extrémité inférieure de la sonde a servi à effectuer les mesures nécessaires.

La méthode d'alignement « Plane Line Line » a été sélectionnée dans le logiciel Surveyor®. Cette méthode nécessite la mesure successive de trois éléments géométriques :

1. **Plan** : Un plan doit d'abord être défini en mesurant au minimum trois points non colinéaires avec la pointe de probing de la i6. Si plus de trois points sont mesurés, Surveyor® effectue un ajustement optimal (« best fit ») du plan par la méthode des moindres carrés.
2. **Première ligne** : Une première ligne a ensuite été définie en mesurant au moins deux points avec la pointe de probing. Cette ligne sert à établir une première direction (un axe) du système de coordonnées. Un ajustement optimal est également réalisé si plus de deux points sont mesurés.
3. **Seconde ligne** : Enfin, une seconde ligne, intersectant la première, a été mesurée de la même manière. L'intersection de ces deux lignes, projetée sur le plan précédemment défini, détermine l'origine du système de coordonnées.

Le logiciel Surveyor® utilise la règle de la main droite pour déterminer l'orientation des axes X, Y et Z. Ce processus de définition du système de coordonnées permet d'établir un référentiel local stable et pertinent pour les mesures ultérieures effectuées dans l'environnement iGPS (voir Figure 3.6).

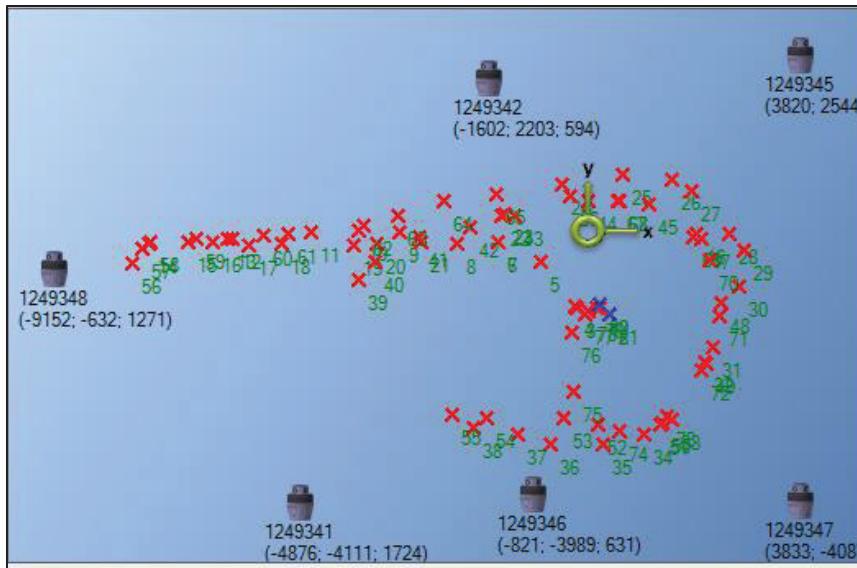


Figure 3.6 : Disposition spatiale des émetteurs iGPS, des points de calibration et du système de coordonnées

3.2.3.3 Création d'un frame of frames

Pour pouvoir suivre la position de l'opérateur ainsi que pour pouvoir le guider lors de tâches de l'assemblage, un support incurvé a été conçu pour être placé sur le devant le MS HoloLens 2 (voir Figure 3.7). Ce support est équipé de quatre emplacements distincts, destinés à accueillir des détecteurs tel que chaque deux détecteurs représentent un seul capteur i5 (voir Figure 3.9). Leurs emplacements sont numérotés de 1 à 4. Des coordonnées XYZ sont associées à chaque emplacement, indiquant leur position spatiale précise.

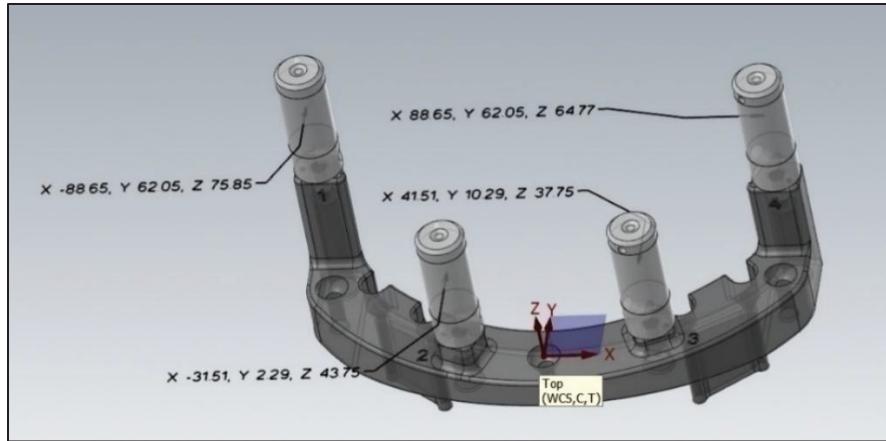


Figure 3.7 : Modèle CAO du support conçu pour les 4 détecteurs iGPS du MS HoloLens 2

Maintenant pour suivre la position des détecteurs intégrés au MS HoloLens 2 (voir Figure 3.8), un Custom Frame est créé nommé **Hololens2** au sein du logiciel Surveyor®. Dans notre Custom Frame, on fournit les valeurs nominales (théoriques) des points de référence des détecteurs. Le système iGPS, grâce à la calibration, détermine les positions réelles (calibrées) de ces détecteurs. Une fois la calibration effectuée, Surveyor® ne renvoie pas directement les positions de tous les détecteurs, mais plutôt les coordonnées du point représentant l'origine de la position nominale, exprimées dans le repère de l'iGPS. Cette origine sert de référence principale. Ensuite, Surveyor® utilise la relation entre cette origine et les positions calibrées des points de référence, combinée aux mesures en temps réel des détecteurs iGPS, pour suivre avec précision la position et l'orientation du casque MS HoloLens 2 (et donc de l'opérateur) dans l'espace de travail iGPS.

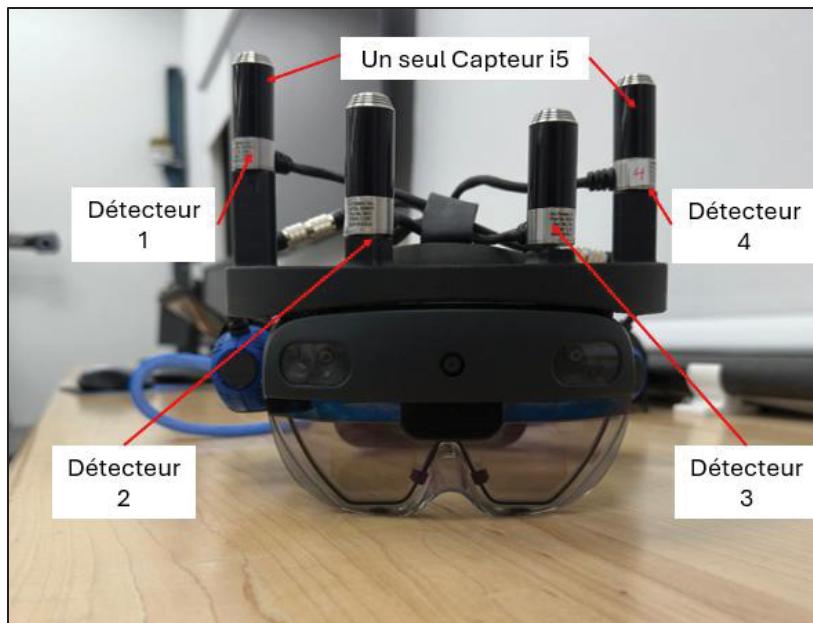


Figure 3.8 : MS HoloLens 2 équipé de 4 DéTECTEURS iGPS



Figure 3.9 : Capteur i5 utilisé sur le MS HoloLens 2

3.2.3.4 Extraction et stockage des données des cadres

Le logiciel Surveyor® offre des fonctionnalités de visualisation en temps réel des données de position et d'orientation des cadres (frames), ainsi que la possibilité de capturer certaines données manuellement. Cependant, il ne permet pas nativement l'enregistrement automatique et continu de ces données. Pour pallier cette limitation, un code spécifique a été développé en c#. Ce code communique directement avec le logiciel Surveyor® grâce aux bibliothèques

logicielles (DLL) fournies par le fabricant : Mertis.Common.dll, Mertis.Surveyor®.Common.dll, et Mertis.Gps.Common.dll. Ces bibliothèques donnent accès à l'API (Application Programming Interface) de Surveyor®, permettant ainsi l'échange d'informations.

Après s'être connecté à l'interface Surveyor®PublicInterface, le code identifie les cadres actifs (par exemple, la sonde i6). Il est programmé pour réagir à tout changement de position de chaque cadre, en utilisant les notifications PositionChangedLite de Surveyor®. Dès qu'une modification est détectée, les informations associées (coordonnées X, Y, Z et angles de rotation X, Y, Z) sont récupérées, converties en millimètres, puis horodatées. Ces données sont *ensuite* enregistrées dans des fichiers CSV (Comma-Separated Values) distincts, un par cadre, dont le nom correspond à celui du cadre pour une organisation optimale. Ces fichiers, regroupés dans un répertoire dédié, contiennent, sur chaque ligne, une mesure complète : position, orientation et horodatage.

Ce processus permet d'acquérir et d'enregistrer les données de position et d'orientation de chaque cadre en temps réel. Chaque modification de position déclenche une capture et un enregistrement immédiats, fournissant ainsi un flux continu de données. Le format CSV a été choisi pour sa simplicité, sa lisibilité, et sa compatibilité avec les outils d'analyse, permettant un traitement ultérieur ou en direct de ces données.

3.2.3.5 PolyWorks™

PolyWorks™ est une suite logicielle innovante développée par InnovMetric, une entreprise canadienne basée à Québec qui s'est imposée comme un leader mondial de la métrologie 3D au cours de ses 25 années d'existence. Cette multinationale, présente directement dans 18 pays, propose plusieurs solutions spécialisées au sein de sa plateforme PolyWorks™ (Anon, [s d]), notamment PolyWorks™ Inspector représente la solution universelle pour l'analyse dimensionnelle 3D et le contrôle de la qualité. Cette plateforme permet aux entreprises manufacturières de maîtriser la précision dimensionnelle en contrôlant les dimensions exactes des outils et pièces, anticipant ainsi les problèmes de fabrication et d'assemblage avant qu'ils ne surviennent.

PolyWorks™ AR est une solution de métrologie 3D qui utilise la réalité mixte pour les flux de travail d'inspection industrielle. Cette technologie superpose des hologrammes sur les pièces à mesurer, permettant aux opérateurs d'interagir avec leurs projets d'inspection via des lunettes intelligentes connectées à PolyWorks™ Inspector. Pour assurer une précision optimale dans la superposition des hologrammes sur les pièces physiques, PolyWorks™ AR propose quatre méthodes d'alignement distinctes adaptées aux différents besoins d'inspection et d'assemblage, comme l'illustre la Figure 3.10. L'alignement manuel permet aux opérateurs de positionner intuitivement les hologrammes sur la pièce. La méthode d'ajustement minutieux (Fine-Tune) offre un contrôle précis pour affiner le positionnement. L'approche par paires de points (Point pairs) utilise des points de référence spécifiques pour établir l'alignement géométrique. Enfin, la localisation automatique (Auto-locate) exploite les algorithmes de reconnaissance pour positionner automatiquement les hologrammes, optimisant ainsi l'efficacité du processus d'inspection.

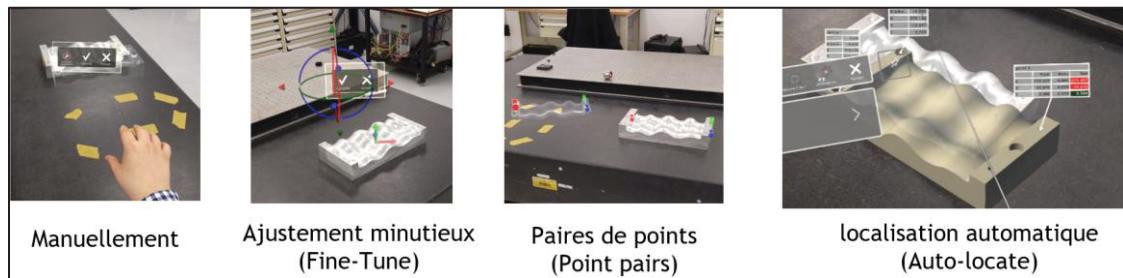


Figure 3.10: Méthodes d'alignement disponibles dans PolyWorks™ AR

Dans le cadre de ce projet, nous avons utilisé ces deux solutions complémentaires : PolyWorks™ Inspector pour l'analyse dimensionnelle traditionnelle et PolyWorks™ AR pour explorer les possibilités offertes par la RA dans les processus de contrôle qualité industriel.

3.2.3.6 Plugiciel PolyWorks™ iGPS

Pour pouvoir exploiter pleinement le potentiel de l'iGPS, ce dernier peut être combiné avec PolyWorks™ Inspector, qui est un logiciel polyvalent et performant. Il facilite l'inspection, le diagnostic et la prévention des problèmes de fabrication, en améliorant simultanément la

qualité des produits et les processus d'ingénierie. En effet, pour ce projet, un plugiciel a été développé afin d'établir une liaison fonctionnelle entre le système iGPS et le logiciel PolyWorks™. L'objectif de cette intégration est d'acquérir en temps réel des données des détecteurs iGPS et ainsi de permettre d'exploiter les capacités de chacun pour améliorer le processus de mesure et d'inspection.

Pour pouvoir utiliser ce plugiciel sur PolyWorks™ (voir Figure 3.11), l'utilisateur doit d'abord sélectionner l'outil «7D iGPS» dans l'interface de PolyWorks™, ce qui déclenche l'ouverture d'une fenêtre dédiée. Préalablement à toute acquisition, le logiciel Surveyor® doit être en fonctionnement et la calibration du système de coordonnées correctement réalisée - sans quoi un message d'erreur apparaîtra lors de l'activation du bouton « Start ».

Lorsque ces prérequis sont satisfaits, l'activation du bouton « Start » lance l'exécution du code d'acquisition, dont on a parlé précédemment, qui enregistre en temps réel les données de position et d'orientation de chaque cadre. Simultanément, une nouvelle section s'affiche dans la fenêtre principale, invitant l'utilisateur à sélectionner un capteur spécifique. Les informations relatives au capteur choisi sont alors extraites du fichier CSV correspondant, ces fichiers étant générés et mis à jour en continu par le code d'acquisition, et ainsi ces informations sont envoyées à PolyWorks™. L'arrêt du processus s'effectue simplement via le bouton « Stop ». Un avantage majeur de ce plugiciel réside dans sa capacité à permettre l'utilisation des fonctionnalités natives de PolyWorks™, notamment les fonctions de probing et d'inspection, créant ainsi un environnement de métrologie intégré et performant.

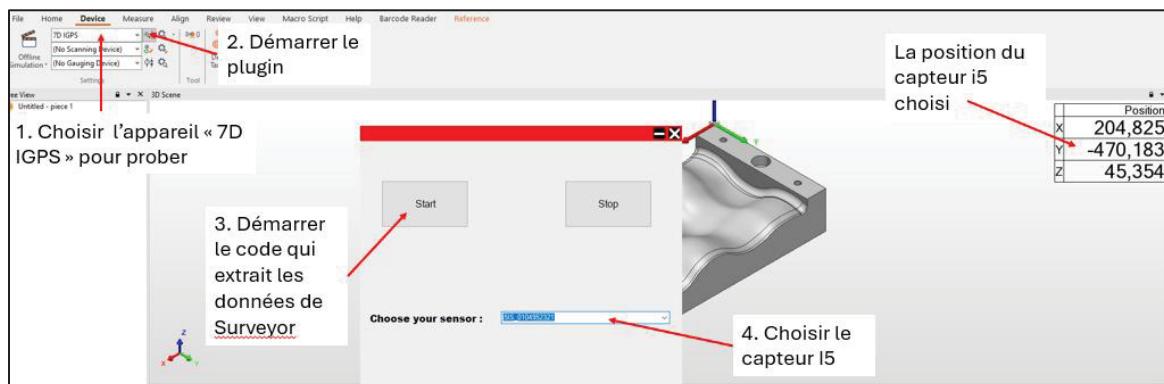


Figure 3.11 : Étapes d'utilisation du plugiciel iGPS dans PolyWorks™ Inspector

3.2.4 Estimation de la matrice de transformation entre la caméra du MS HoloLens 2 et le custom frame

Dans cette section, nous présentons la méthodologie développée pour estimer la matrice de transformation entre la caméra des MS HoloLens 2 et le Custom Frame Hololens2 utilisé pour suivre la position de l'utilisateur. Cette transformation est essentielle pour assurer l'alignement précis des éléments virtuels avec l'environnement réel dans notre système de Réalité augmentée. Avant de détailler les étapes du processus, il convient de présenter l'application développée pour le MS HoloLens 2, qui constitue un élément central de notre approche. Pour mieux comprendre notre approche les Figures 3.12 et 3.13 illustrent bien cela.

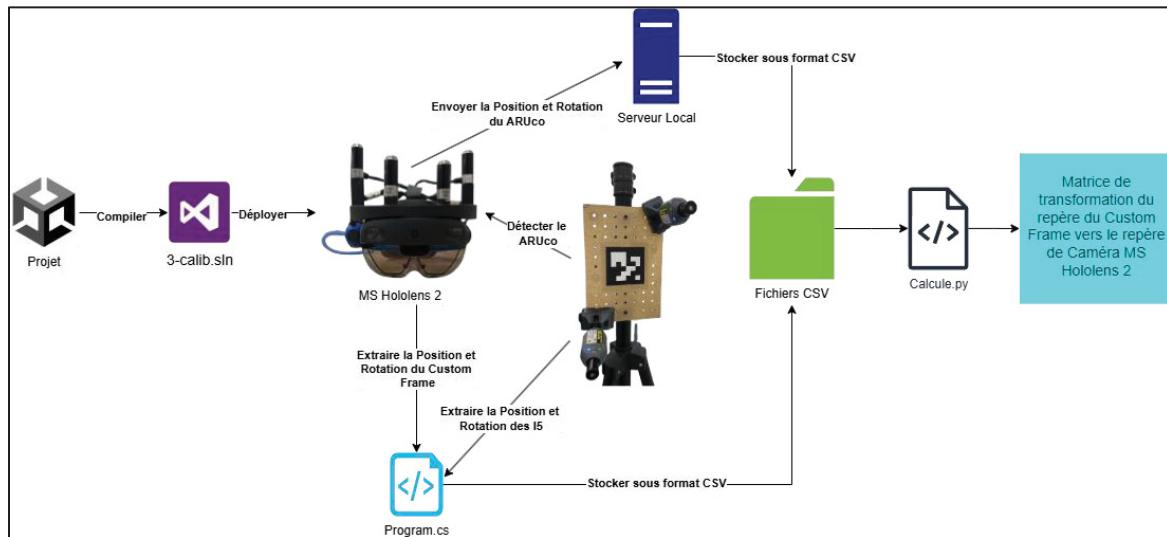


Figure 3.12 : Processus d'estimation de la matrice de transformation entre le MS HoloLens 2 et le Custom Frame

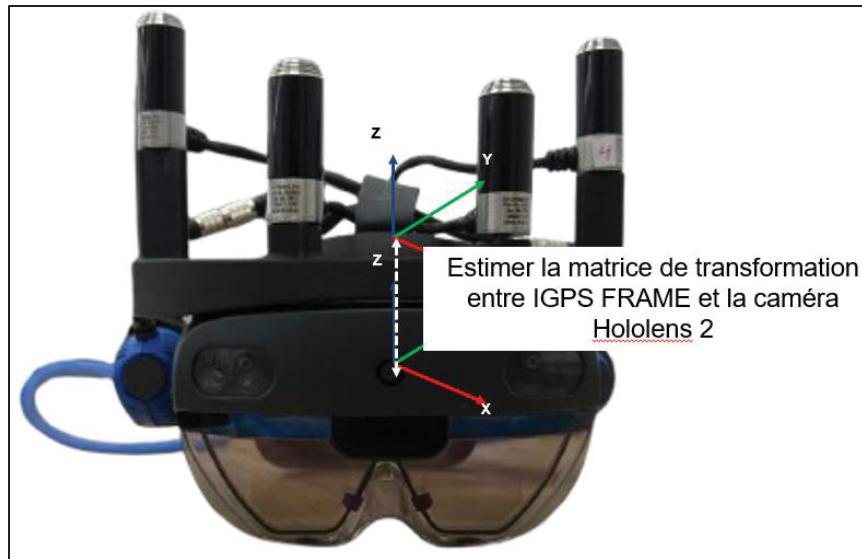


Figure 3.13: Matrice de transformation du repère Custom Frame HoloLens2 vers le repère de la caméra des MS HoloLens 2

3.2.4.1 Développement de l'application MS HoloLens 2

Pour estimer la distance et la rotation entre la caméra de l'HoloLens 2 et un marqueur ArUco, nous avons développé une application de Réalité augmentée, en nous inspirant du travail de Doughty (2022) sur le ciblage chirurgical assisté par visiocasque. Le processus d'estimation repose sur l'analyse d'images vidéo capturées par le MS HoloLens 2. Tout d'abord, la capture vidéo est initialisée avec une résolution spécifique. Nous définissons ensuite le type de marqueur ArUco utilisé (via un dictionnaire) ainsi que sa taille physique.

Le cœur du processus se déroule en boucle : à chaque nouvelle image capturée, la fonction CvUtils.DetectMarkers d'OpenCV est appelée. Cette fonction, cruciale, utilise les paramètres intrinsèques précalibrés de la caméra, que nous avons pu extraire grâce à l'étape précédente, pour corriger les déformations de l'image et identifier le marqueur ArUco. Une fois le marqueur détecté, OpenCV estime sa pose 3D, c'est-à-dire sa position (un vecteur 3D) et son orientation (un autre vecteur 3D, souvent représenté sous forme de vecteur de Rodrigues) par rapport à la caméra.

Une étape cruciale intervient ensuite : la conversion des coordonnées d'OpenCV vers le système de coordonnées du MS HoloLens 2. Cette conversion est nécessaire, car OpenCV et

Unity® (utilisé par MS HoloLens 2) emploient des systèmes de coordonnées différents. Notre code implémente cette transformation via la méthode `GetTransformInUnity®Camera`, qui convertit les vecteurs de position et de rotation obtenus d'OpenCV en une matrice de transformation compatible avec le repère d'Unity®. Ensuite, nous utilisons `GetViewToUnity®Transform` pour obtenir la transformation entre le système de coordonnées de l'image caméra et celui d'Unity®, en exploitant le `SpatialCoordinateSystem` de Windows Mixed Reality. Cette chaîne de transformations (`frameCoordinateSystem` → `Unity®CoordinateSystem`) nous permet finalement de positionner avec précision les objets virtuels en alignement avec les marqueurs réels détectés.

Pour collecter et enregistrer ces données, nous avons implémenté dans la même application Unity® le script `SendData.cs` qui interagit directement avec le composant `NetworkBehaviour`. Ce script extrait périodiquement les coordonnées et rotations du dernier marqueur détecté, stockées dans les propriétés `LastDetectedMarkerPosition` et `LastDetectedMarkerRotation` de `NetworkBehaviour`. Après validation de leur pertinence, ces données sont transmises toutes les 100 millisecondes via HTTP (HyperText Transfer Protocol) POST à un serveur Flask distant. Le serveur Python (`HoloLensAPI.py`) réceptionne ces informations, les horodate précisément et les enregistre de façon structurée dans un fichier CSV. Cette approche intégrée garantit une capture fluide et en temps réel de la trajectoire des marqueurs, tout en préservant les performances du casque MS HoloLens 2, et constitue une base de données robuste pour l'analyse ultérieure de la précision du système de tracking.

3.2.4.2 Préparation du matériel de tracking

Notre approche a débuté par la fabrication d'une planche acrylique personnalisée de dimensions 200 mm × 300 mm. Cette planche a été conçue pour inclure un motif imprimé, plus précisément un marqueur ARUco de 100 mm × 100 mm, spécifiquement sélectionné en fonction des exigences de l'algorithme de suivi utilisé. À l'aide d'une machine CNC (Computer Numerical Control), nous avons réalisé une matrice précise de trous de Ø4 mm, espacés uniformément de 25 mm.

3.2.4.3 Installation du capteur

La deuxième phase de notre protocole a consisté à installer deux capteurs i5 sur la plaque en acrylique (voir Figure 3.14). Chacun de ces capteurs a été fixé dans l'un des trous de la matrice, choisi de manière à optimiser la visibilité et la robustesse du suivi. Chaque position a été soigneusement documentée pour être prise en compte dans les calculs ultérieurs.

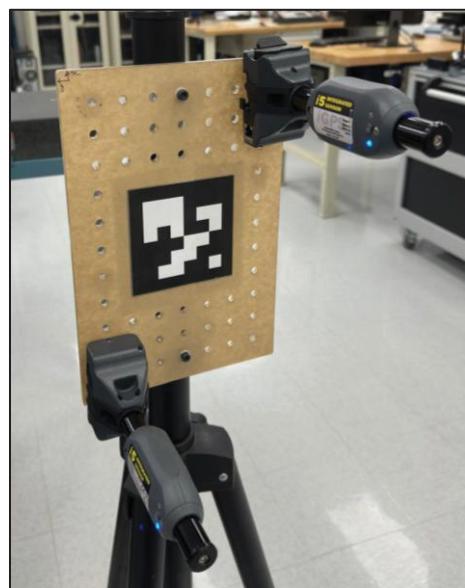


Figure 3.14 : Planche acrylique avec marqueur ArUco et deux capteurs i5

3.2.4.4 Collecte des données

Cette étape cruciale a impliqué la mise en place d'un système d'acquisition simultanée à partir de trois sources distinctes. Nous avons exécuté en parallèle les codes d'extraction et de stockage des données provenant du frame du capteur i5 et du Custom Frame Hololens2 indiquant la position des MS HoloLens 2. Simultanément, nous avons déployé et exécuté notre application sur le casque MS HoloLens 2, en veillant à ce que le serveur de capture soit correctement initialisé pour enregistrer la position du centre du marqueur ArUco relativement à la caméra du MS HoloLens 2. Une attention particulière a été portée au positionnement optimal du casque pour garantir une détection fiable du marqueur. L'ensemble des données issues de ces trois

sources (capteur i5, Custom Frame et détection ArUco) a été sauvegardé dans des fichiers CSV pour l'analyse ultérieure.

3.2.4.5 Normalisation des données et construction des matrices

Ces deux phases, réalisées par un même algorithme, ont permis d'harmoniser les données collectées et de construire les matrices de transformation nécessaires. Toutes les positions ont été exprimées en millimètres et les rotations en degrés pour assurer la cohérence des unités. Nous avons également procédé à un réalignement des axes pour garantir l'homogénéité des différents repères. L'algorithme a ensuite construit quatre matrices de transformation fondamentales :

- **Matrice M1** : Transformation du repère du Custom Frame (situé sur la tête du porteur du MS HoloLens 2) vers le repère de l'iGPS (voir Figure 3.15).

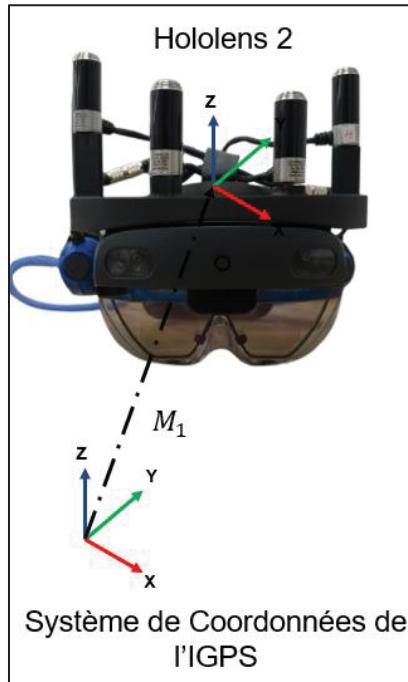


Figure 3.15: Matrice de transformation M_1 du repère Custom Frame HoloLens2 vers le repère global iGPS

- **Matrice M2** : Transformation du repère du local Capteur i5 vers le repère de l'iGPS (voir Figure 3.16).

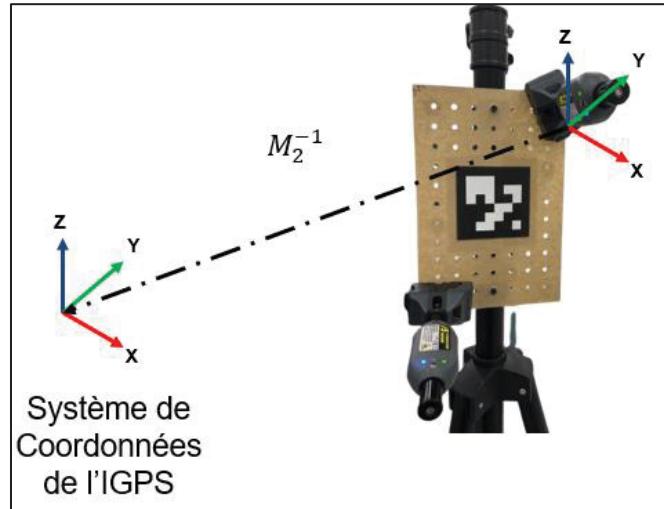


Figure 3.16: Matrice de transformation M_2^{-1} du repère global iGPS au repère local Capteur i5

- **Matrice M3** : Transformation du repère i5 vers le repère ARUco qui se trouve au centre de ce dernier, établi à partir de la distance connue entre le tracker i5 et le centre de la plaque acrylique (voir Figure 3.17).

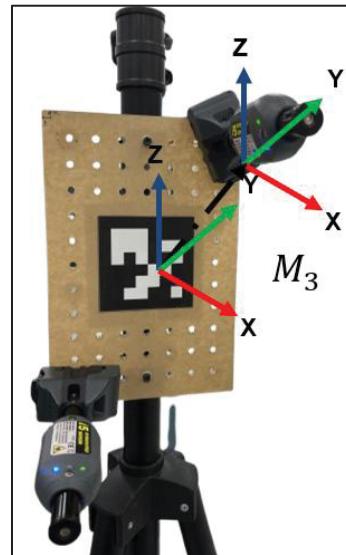


Figure 3.17: Matrice de transformation M_3 du repère local du Capteur i5 vers le repère ARUco

- **Matrice M4** : Transformation du repère ArUco vers celui de la caméra du MS HoloLens 2 (voir Figure 3.18).

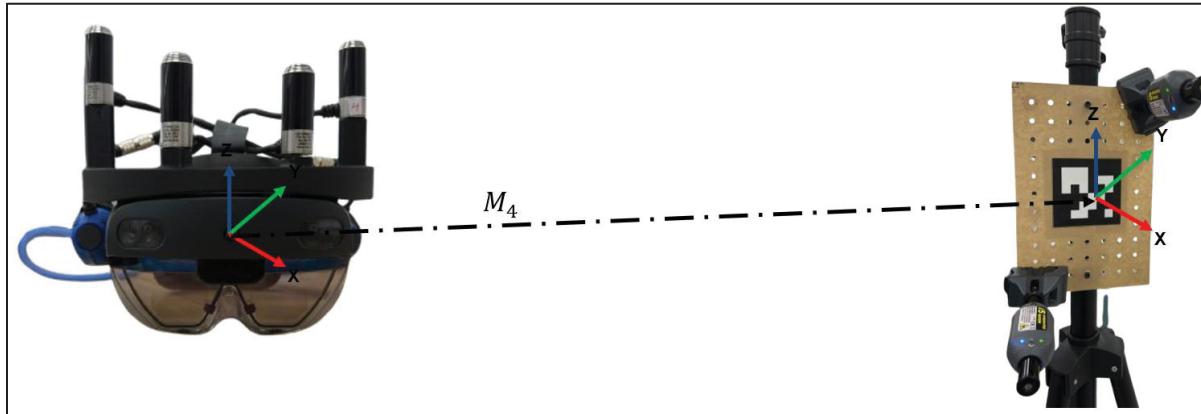


Figure 3.18: Matrice de transformation M_4 du repère ARUco vers le repère de la caméra du MS HoloLens 2

Chacune de ces matrices 4×4 intègre une sous-matrice 3×3 de rotation, calculée à partir des angles d'Euler convertis en radians, ainsi qu'un vecteur de translation 3×1 exprimé en mètres, car c'est l'unité utilisée dans Unity®.

3.2.4.6 Calcul de la transformation finale

La dernière phase a consisté à combiner les matrices précédemment calculées selon la formule :

$${}_{\text{Hololens 2}}^{\text{Camera}}M = {}_{\text{ARUco}}^{\text{Camera}}M {}^{\text{ARUco}}_{I5}M {}^{\text{I5}}_{\text{IGPS}}M {}^{\text{IGPS}}_{\text{Hololens 2}}M \quad (3.1)$$

Ou bien :

$$M = M_4 \times M_3 \times M_2^{-1} \times M_1 \quad (3.2)$$

Cette opération mathématique établit la relation spatiale complète entre la caméra du MS HoloLens 2 et le Custom Frame Hololens2, tout en corrigeant les décalages inhérents aux différences de repères. La matrice finale M constitue la transformation recherchée qui permettra d'aligner avec précision les éléments virtuels sur l'environnement réel, élément essentiel pour les applications de RA développées dans ce travail. La figure 3.19 illustre cette matrice de transformation du repère Custom Frame Hololens2 vers le repère de la caméra du MS HoloLens 2, résumant l'ensemble de ce processus de calibration spatiale.

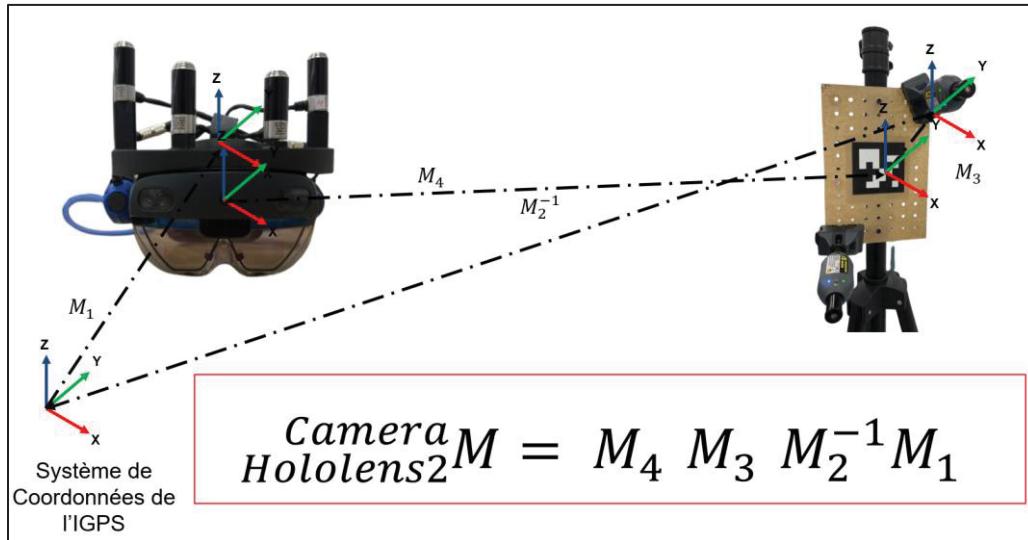


Figure 3.19: Matrice de transformation du repère Custom Frame Hololens2 vers le repère vers le repère de la caméra du MS HoloLens 2

3.2.5 Application pour alignement sur les MS HoloLens 2

Cette section présente l'implémentation complète du système de RA développé pour le Microsoft HoloLens 2, destiné principalement à l'alignement précis d'hologrammes avec des objets physiques dans un contexte industriel. Cette section se décompose en deux volets principaux : un volet mathématique qui explique les calculs de transformation matricielle complexes utilisés dans l'application pour assurer la précision de l'alignement, et un volet fonctionnel qui gère l'implémentation pratique de ces calculs dans l'environnement de Réalité augmentée.

L'architecture générale repose sur un système client-serveur où un serveur Flask en Python centralise majoritairement les calculs mathématiques et la distribution des données, tandis qu'une application Unity® en C# s'exécute sur le MS HoloLens 2 pour l'affichage des hologrammes et leur positionnement précis. L'objectif principal est de réaliser un alignement précis entre les modèles CAD virtuels et les objets physiques correspondants, permettant ainsi des opérations d'inspection et de maintenance de haute précision. Au-delà de cette fonctionnalité, le système intègre également des outils de guidage d'opérateur et d'inspection visuelle pour enrichir l'expérience utilisateur.

3.2.5.1 Partie mathématique : Fondements théoriques

Le processus d'alignement repose sur une chaîne de transformations matricielles qui convertit les coordonnées du repère local CAD, créé en utilisant un Custom Frame qui est une fonctionnalité du logiciel iGPS Surveyor®, vers le repère Unity® le MS HoloLens 2. D'abord, les matrices M1 et M2 gèrent les transformations par rapport au repère global iGPS défini initialement grâce à la probe de référence, où M1 convertit les coordonnées du repère local CAD vers le repère global iGPS en utilisant les données de positionnement des capteurs i5 fixés sur l'objet physique (figure 3.20), tandis que M2 établit la relation spatiale entre le système de positionnement global et le Custom Frame Hololens2, tracké par les capteurs iGPS montés sur l'appareil (figure 3.21).

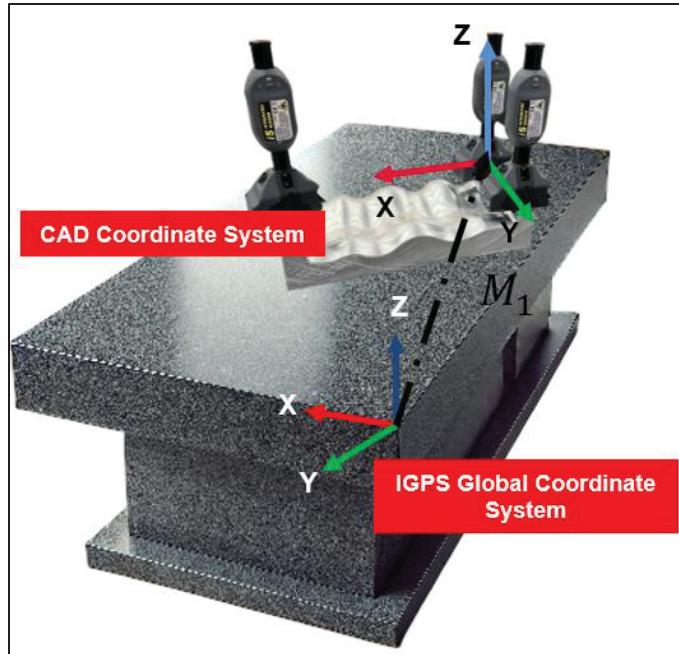


Figure 3.20: Matrice de transformation M_1 du repère local CAD vers le repère global de l'iGPS

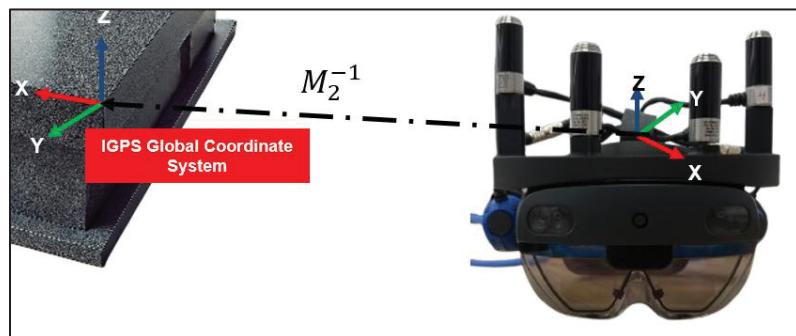


Figure 3.21: Matrice de transformation M_2^{-1} du repère global de l'iGPS vers le repère Custom Frame HoloLens2

Ensuite, la matrice M3 convertit les coordonnées du repère Custom Frame HoloLens vers le repère de la caméra du MS HoloLens 2, cette transformation ayant été estimée précisément dans la section 3.2.3 « Estimation de la matrice de transformation entre la caméra du MS HoloLens 2 et le Custom Frame » (voir Figure 3.22).

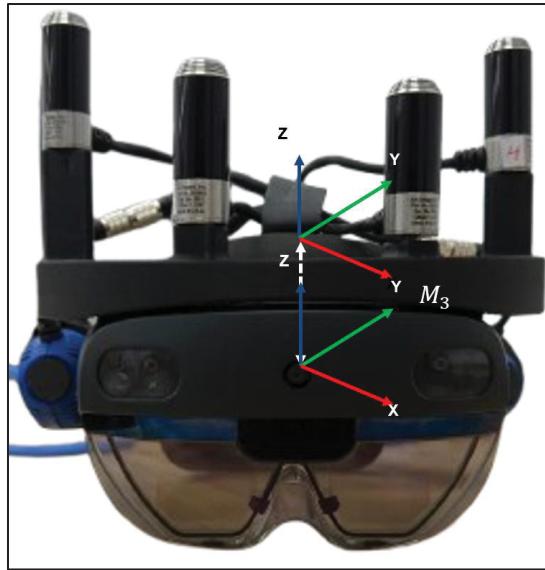


Figure 3.22: Matrice de transformation M_3 du repère Custom Frame HoloLens2 vers le repère de la caméra du MS HoloLens 2

Cependant, avant d'appliquer la matrice M4 qui effectue la transformation finale du repère de la caméra du MS HoloLens 2 vers le repère Unity®, il est d'abord nécessaire d'adapter les conventions de coordonnées entre le système iGPS (droitier) et le système Unity® (gaucher) (voir Figure 3.23). Cette conversion préalable s'effectue par la multiplication de matrices de conversion qui transforment le repère iGPS où l'axe X pointe vers le devant, Y vers la gauche et Z vers le haut, en un repère intermédiaire compatible avec Unity® où l'axe X pointe vers la droite, Y vers le haut et Z vers l'arrière. Une fois cette conversion de coordonnées réalisée, la matrice M4 (voir Figure 3.24) peut alors effectuer la transformation finale du repère de la caméra du MS HoloLens 2 vers le repère Unity®, intégrant les corrections d'orientation des axes et les conventions spécifiques à l'environnement Unity® pour l'affichage des hologrammes. Finalement, toute la troisième ligne de la matrice finale est multipliée par -1 pour respecter les conventions d'orientation finales requises par Unity®.

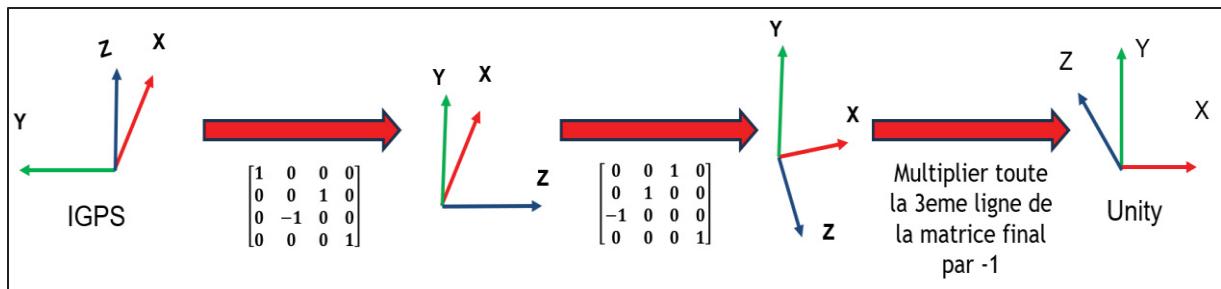


Figure 3.23: Conversion du système de coordonnées iGPS vers Unity®

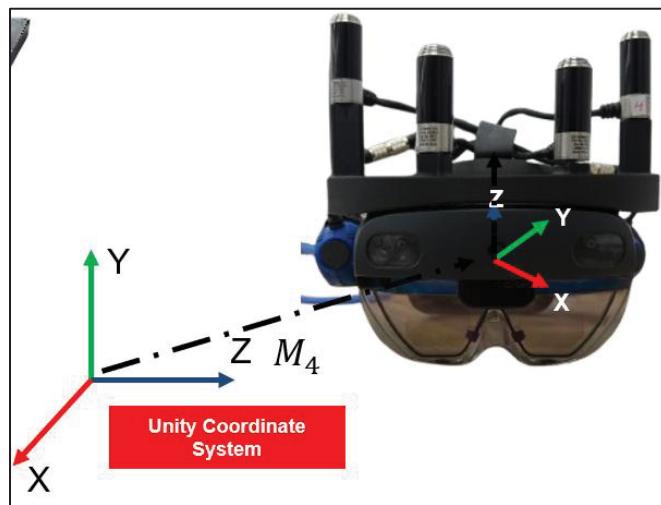


Figure 3.24: Matrice de transformation M_4 du repère de la caméra du MS HoloLens 2 vers le repère de Unity®

Finalement, la transformation complète du repère CAD vers le repère Unity® résulte de la multiplication en chaîne :

$${}_{CAD}^{Unity}M = {}_{Camera}^{Unity}M \cdot {}_{HoloLens 2}^{Camera}M \cdot {}_{IGPS}^{HoloLens 2}M \cdot {}_{CAD}^{IGPS}M \quad (3.3)$$

Ou bien :

$$M = M_4 \times M_3 \times M_2^{-1} \times M_1 \quad (3.4)$$

Cette formule composite intégrant toutes les transformations géométriques et les adaptations de repères nécessaires selon une séquence logique : conversion CAD vers iGPS global, puis vers Custom Frame HoloLens, ensuite vers caméra HoloLens, adaptation des systèmes de coordonnées droitier/gaucher, et finalement conversion vers Unity®. La figure 3.25 illustre cette matrice de transformation complète du repère local du CAD vers le repère de Unity®. Ainsi, cette chaîne de transformation assure que les hologrammes affichés par le MS HoloLens 2 sont positionnés avec précision millimétrique par rapport aux objets physiques, condition essentielle pour la fiabilité des opérations d'inspection industrielle en Réalité augmentée.

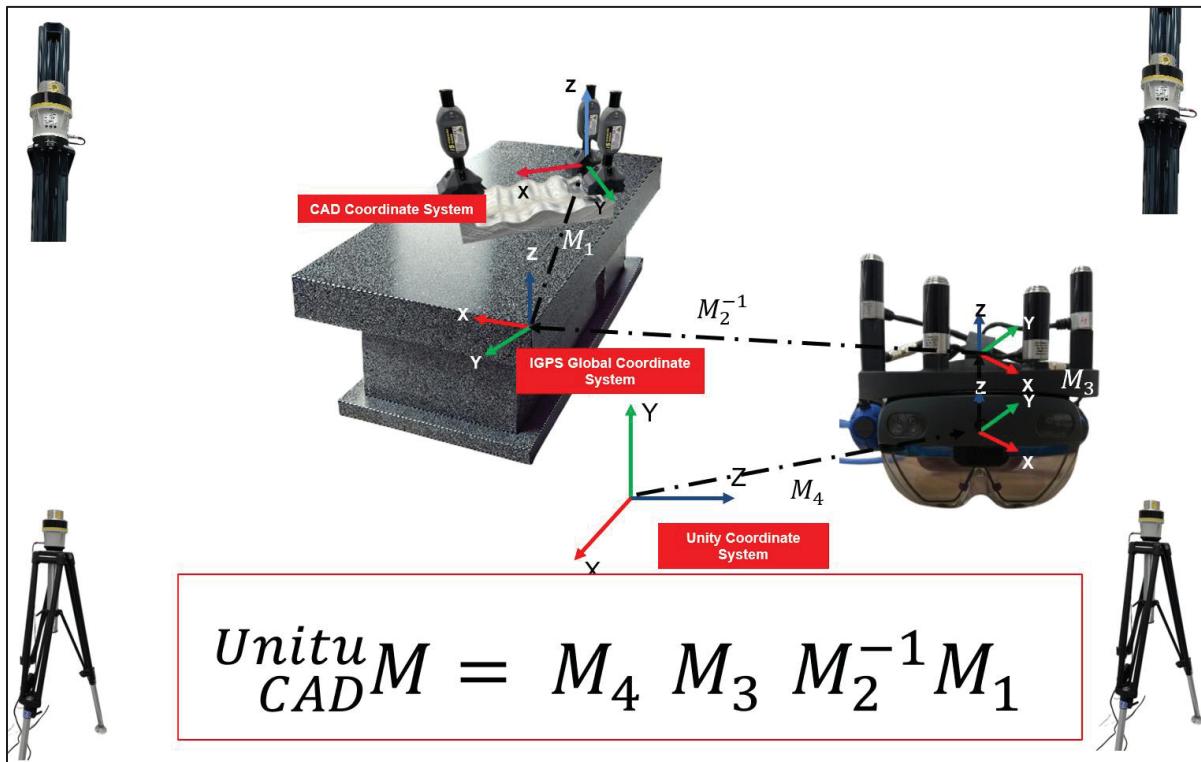


Figure 3.25: Matrice de transformation du repère local du CAD vers le repaire de Unity®

3.2.5.2 Partie pratique : implémentation et mise en œuvre

Cette section présente la concrétisation pratique des fondements théoriques développés précédemment en une solution opérationnelle pour l'industrie. L'implémentation traduit les calculs de transformation matricielle en un système fonctionnel utilisant le MS HoloLens 2, PolyWorks™ Inspector et le positionnement iGPS.

L'architecture développée repose sur une communication client-serveur où une application Unity® déployée sur le MS HoloLens 2 interagit avec un serveur Flask orchestrant les calculs et la synchronisation des données métriques. Cette partie détaille quatre aspects essentiels : les prérequis techniques, l'importation des modèles CAD, le processus d'alignement temps-réel, et les fonctionnalités complémentaires d'inspection industrielle.

L'utilisation du système d'alignement sur MS HoloLens 2 nécessite plusieurs étapes préparatoires essentielles pour assurer le bon fonctionnement de l'application. Ces prérequis incluent la préparation de l'environnement spatial, le déploiement de l'application, la configuration du logiciel de métrologie, et l'extraction des données de positionnement. Chaque étape doit être réalisée dans l'ordre spécifié pour garantir la précision de l'alignement et la stabilité du système.

Avant toute utilisation de l'application d'alignement, l'opérateur portant le MS HoloLens 2 doit effectuer une cartographie spatiale complète de l'environnement de travail. Cette étape consiste à parcourir lentement et méthodiquement l'ensemble de la zone où se dérouleront les opérations d'inspection, en regardant dans toutes les directions et en observant attentivement tous les objets présents.

Le processus de spatial mapping permet aux MS HoloLens 2 de construire une représentation tridimensionnelle précise de l'environnement physique grâce à leurs capteurs de profondeur et caméras intégrées. Cette cartographie est cruciale pour le système de tracking spatial qui localise en permanence la position et l'orientation des HoloLens dans l'espace réel. Sans cette étape préliminaire, le système ne peut pas maintenir un alignement stable entre les hologrammes et les objets physiques.

La qualité du spatial mapping influence directement la précision du positionnement des hologrammes, il est donc recommandé de prendre le temps nécessaire pour obtenir une cartographie complète et détaillée de l'environnement de travail. Les Figures 3.26 et 3.27 représentent les résultats de notre spatial mapping réalisé dans notre laboratoire.

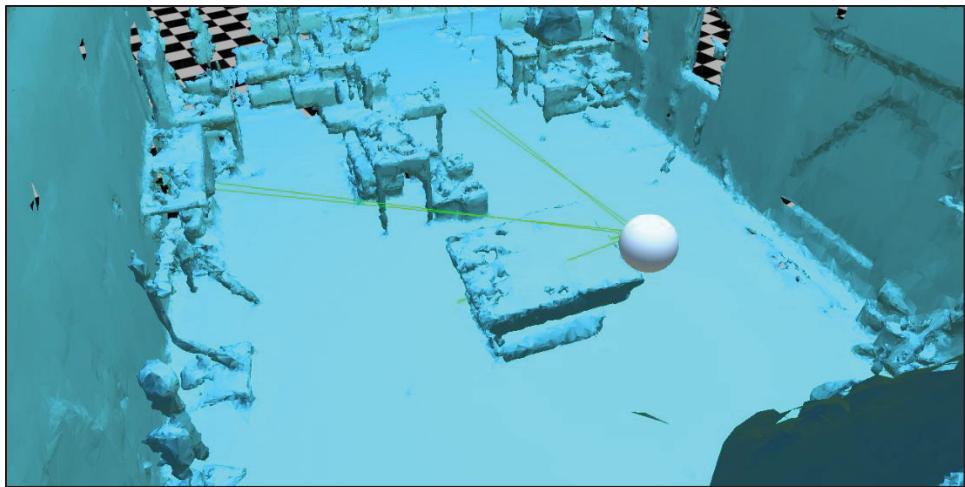


Figure 3.26: Spatial mapping de la partie arrière du laboratoire d'expérimentation - MS HoloLens 2

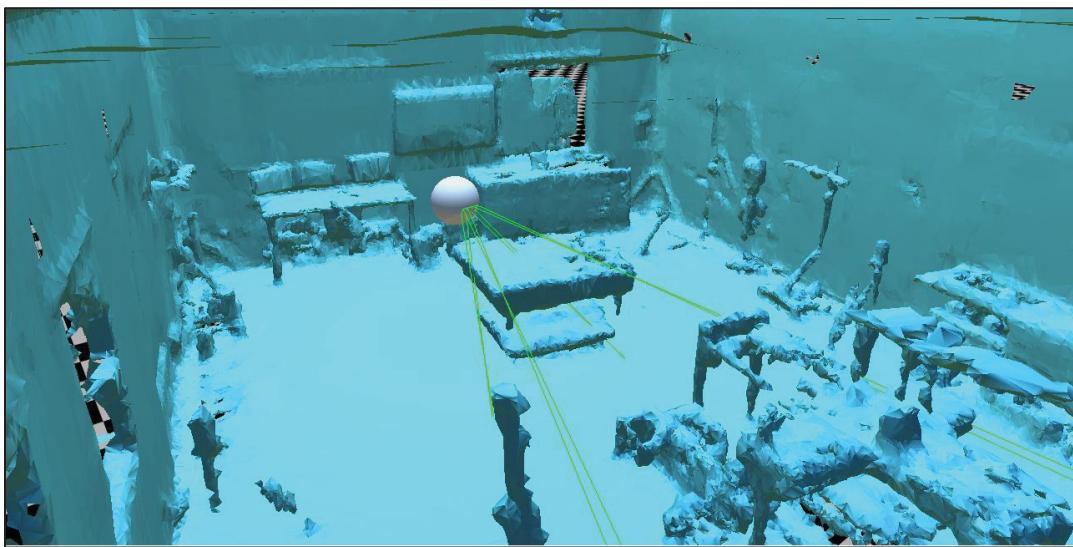


Figure 3.27: Spatial mapping de la partie avant du laboratoire d'expérimentation - MS HoloLens 2

L'application Unity® développée pour l'alignement doit être compilée spécifiquement pour la plateforme MS HoloLens 2 avant son déploiement. Cette compilation génère un package d'application compatible avec le système d'exploitation Windows Holographic des HoloLens, incluant toutes les dépendances nécessaires et les optimisations spécifiques à la Réalité augmentée.

PolyWorks™ Inspector doit être lancé avec le projet d'inspection approprié, incluant l'importation du modèle CAO de référence. Une fois le projet configuré, l'opérateur doit démarrer le plugiciel iGPS, développé spécifiquement pour ce système d'alignement, après avoir procédé à la calibration et à la configuration de l'iGPS via le logiciel Surveyor®.

Ce plugiciel gère automatiquement l'extraction des informations de positionnement des capteurs i5 et des Custom Frame créés. Il établit la communication avec le système iGPS et synchronise les données de localisation en temps réel. Le plugiciel exporte automatiquement ces données vers les fichiers CSV que le serveur Flask utilise pour les calculs de transformation matricielles

Parallèlement à l'extraction des données de positionnement, le plugiciel exporte le modèle CAO actuellement chargé dans PolyWorks™ au format OBJ. Cet export génère automatiquement les fichiers géométriques (OBJ) et de matériaux (MTL) nécessaires à l'affichage du modèle en Réalité augmentée. Les fichiers sont automatiquement placés dans le répertoire configuré du serveur Flask, rendant le modèle immédiatement disponible pour téléchargement par le MS HoloLens 2.

Parallèlement à l'extraction des données de positionnement, le plugiciel exporte automatiquement le modèle CAO actuellement chargé au format OBJ standard. Cet export génère les fichiers géométriques (OBJ) et de matériaux (MTL) nécessaires à l'affichage du modèle en RA sur le MS HoloLens 2.

L'importation des modèles CAD constitue la première étape pour afficher les hologrammes dans l'environnement de Réalité augmentée. Cette fonctionnalité permet au MS HoloLens 2 de récupérer et d'afficher les modèles 3D depuis un serveur centralisé.

Le serveur Flask expose deux points d'accès dans le fichier hololensAPI.py pour distribuer les fichiers de modèles 3D. La route /PolyWorks™CAD transmet le fichier géométrique OBJ qui contient la forme 3D de l'objet, tandis que /PolyWorks™CAD_MTL transmet le fichier de matériaux MTL qui définit les couleurs et textures. Ces points d'accès utilisent la fonction `send_file` de Flask pour transmettre les fichiers avec vérification de leur existence et gestion des types de fichiers. Le chemin des fichiers est défini par les constantes

POLYWORKSTM_CAD_PATH et POLYWORKSTM_CAD_MTL_PATH pour une configuration centralisée.

L'application, présente sur le MS HoloLens 2, utilise le script ModelDownloader.cs pour télécharger et intégrer les modèles 3D. La méthode DownloadObjAndMtlCoroutine exécute des requêtes de téléchargement avec Unity®WebRequest pour récupérer les deux fichiers depuis le serveur. Les fichiers téléchargés sont stockés temporairement dans la mémoire cache de l'application puis traités par la bibliothèque OBJLoader pour les convertir en objets que Unity® peut afficher.

Une fois les fichiers chargés, le script applique des transformations pour adapter le modèle au système MS HoloLens 2. La transformation loadedObj.transform.localScale = new Vector3(-0.001f,0.001f,0.001f) réduit la taille du modèle de 1000 fois pour passer des millimètres utilisés dans les logiciels CAO aux mètres utilisés par les HoloLens, tout en inversant l'axe horizontal pour corriger l'orientation. Le modèle chargé reçoit automatiquement le nom « model » et est positionné au centre de la scène pour permettre son utilisation par les autres composants du système d'alignement.

Le processus d'alignement constitue le cœur technique du système, permettant de positionner précisément les hologrammes par rapport aux objets physiques. Cette section présente l'implémentation pratique qui applique les calculs de transformation matricielle (détailés en section 3.2.4.2.1) dans l'environnement HoloLens pour réaliser l'alignement en temps réel.

Communication serveur-client pour les matrices : Le serveur Flask orchestre le calcul et la transmission des matrices de transformation à travers l'endpoint /send_data dans le fichier hololensAPI.py. Cette route suit un processus structuré : elle instancie un objet MatrixCalculator, charge les données de positionnement depuis les fichiers CSV correspondant aux capteurs i5 et aux Custom Frame, calcule la matrice de transformation finale en appliquant la chaîne de transformations matricielles, puis retourne une réponse JSON (JavaScript Object Notation) structurée.

La réponse JSON contient une représentation des données de transformation pour optimiser l'utilisation côté client. L'objet matrix contient les 16 éléments de la matrice de transformation 4x4 complète pour les calculs de positionnement précis. Les éléments de translation (m03,

m13, m23) subissent une conversion d'unités par division par 1000 pour passer des millimètres aux mètres, tandis que les éléments de rotation demeurent inchangés.

L'application utilise le script RecevoirHologramme.cs pour récupérer et traiter les matrices de transformation transmises par le serveur Flask. Ce composant définit des structures de données sérialisables spécialisées pour gérer les réponses JSON complexes de manière typée et sécurisée. Les classes Coordonnees, MatrixData et CompleteResponse correspondent exactement à la structure des données JSON transmises, évitant les erreurs de parsing et facilitant la maintenance.

La méthode ProcessCompleteData constitue le point central du traitement des données reçues. Elle extrait les informations JSON et les convertit immédiatement en formats Unity® natifs pour une utilisation directe dans l'environnement de Réalité augmentée. La reconstruction de la matrice 4x4 suit l'ordre des colonnes Unity® avec la syntaxe new Matrix4x4(col0, col1, col2, col3) où chaque colonne est un Vector4. Cette conversion respecte scrupuleusement les conventions de Unity® pour maintenir la cohérence des transformations entre les calculs mathématiques effectués côté serveur et leur application pratique côté client.

Le script établit une communication continue avec le serveur via la coroutine ReceiveDataRoutine, interrogeant l'endpoint à intervalles réguliers pour maintenir la synchronisation temps réel. Cette approche asynchrone évite de bloquer l'interface utilisateur tout en assurant que les matrices de transformation restent actualisées selon les dernières mesures de positionnement.

Le composant HologramPositioner.cs représente l'élément le plus sophistiqué du système d'alignement, intégrant les capacités de tracking spatial du MS HoloLens 2 avec les matrices de transformation personnalisées calculées par le serveur. Ce script exploite l'API Windows Mixed Reality pour accéder au système de coordonnées spatiales natif des HoloLens via PerceptionInterop.GetSceneCoordinateSystem, établissant une connexion entre le monde virtuel Unity® et l'espace physique réel.

La méthode GetViewToUnity®Transform effectue la conversion cruciale entre les systèmes de coordonnées. Elle obtient d'abord la transformation caméra-vers-Unity® du système spatial MS HoloLens 2 avec frameCoordinateSystem. TryGetTransformTo(_Unity®CoordinateSystem), qui fournit la relation spatiale en temps réel entre la caméra et le

repère Unity®. Cette matrice subit ensuite une série de corrections spécifiques pour adapter les conventions de coordonnées entre WinRT (Windows Runtime) et Unity® : transposition de la matrice, inversion de certains éléments de la ligne 3, et ajustements des composantes pour corriger les différences d'orientation des axes.

Dans la méthode Positionner, la transformation finale résulte de la multiplication matricielle CameraToWorldUnity® * TransformUnity® Camera, combinant le tracking spatial temps réel du MS HoloLens 2 avec les matrices personnalisées calculées par le serveur. Cette opération fusionne deux sources d'information : la localisation spatiale native des HoloLens qui suit les mouvements de l'utilisateur, et les calculs de transformation spécifiques qui alignent le modèle CAO avec l'objet physique.

L'application de la transformation au modèle 3D s'effectue par l'assignation directe des propriétés Unity® : transform.position =ArUcoUtils. GetVectorFromMatrix (transformUnity®WorldLeft) pour la position et transform.rotation = ArUcoUtils.GetQuatFromMatrix (transformUnity®WorldLeft) pour l'orientation. Ces utilitaires extraient les composantes position et rotation de la matrice de transformation finale et les convertissent aux types Unity® appropriés (Vector3 et Quaternion).

Visualisation et débogage de l'alignement

Pour faciliter le débogage et la validation de l'alignement, le script HologramPositioner.cs génère des systèmes de coordonnées visuels qui permettent de vérifier en temps réel la qualité du positionnement. Ces indicateurs visuels prennent la forme de flèches colorées représentant les axes de coordonnées : rouge pour l'axe X, vert pour l'axe Y, et bleu pour l'axe Z selon les conventions standard.

La méthode CreateArrow génère des flèches composites constituées de cylindres pour les tiges et de sphères pour les pointes. Ces éléments utilisent des matériaux émissifs spécialement conçus pour assurer une excellente visibilité en Réalité augmentée, même dans des environnements fortement éclairés. Les flèches sont dimensionnées de manière appropriée pour être facilement identifiables sans encombrer l'affichage. Pour mieux illustrer ce qui précède, la Figure 3.29 représente le fonctionnement de tout notre système ainsi que la Figure 3.28 qui montre notre application en cours d'exécution.

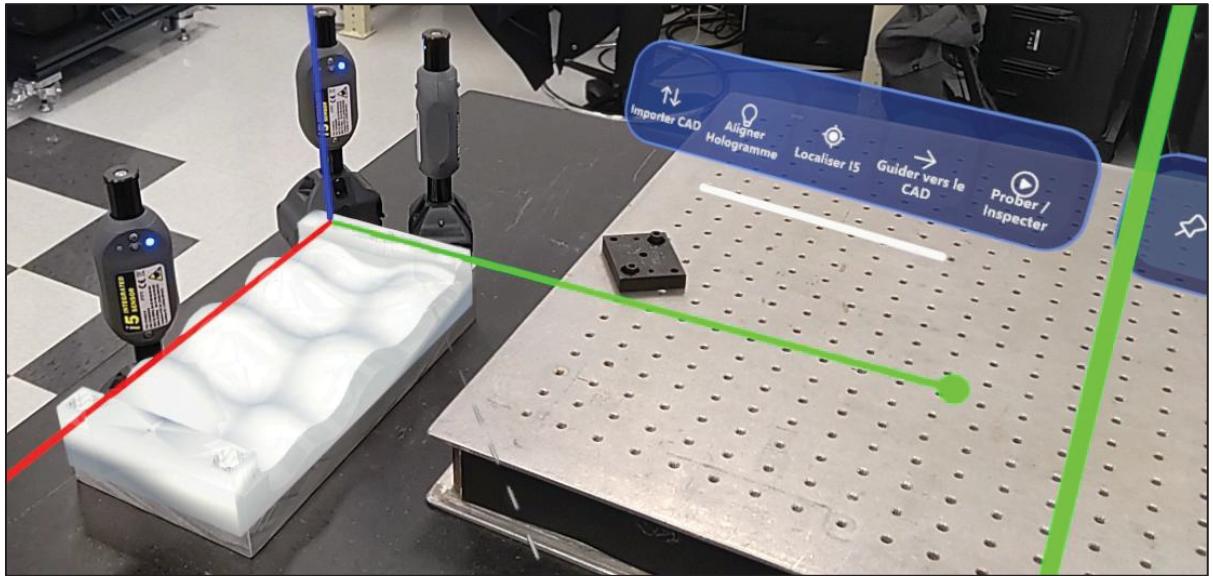


Figure 3.28: Interface utilisateur de l'application d'alignement en cours d'exécution sur MS HoloLens 2

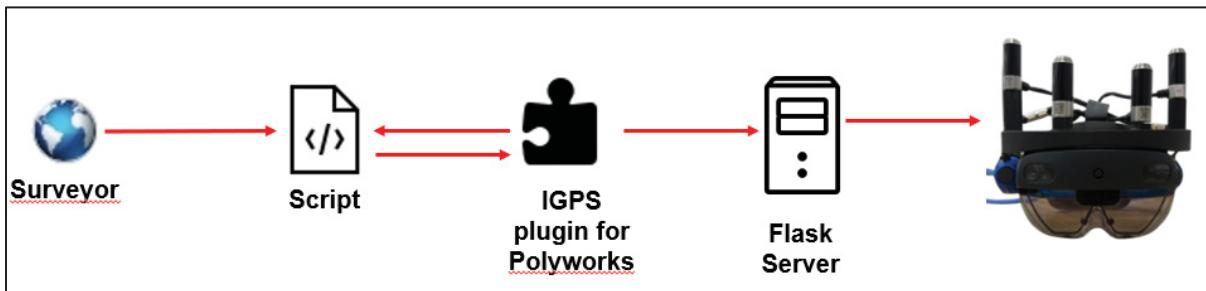


Figure 3.29: Architecture de communication du système d'alignement iGPS-MS HoloLens 2

3.2.5.2.1 Autres fonctionnalités

Au-delà de l'alignement principal entre objet réel et virtuel, l'application intègre plusieurs fonctionnalités complémentaires qui enrichissent l'expérience utilisateur et facilitent les tâches d'inspection industrielle. Ces fonctionnalités incluent des systèmes de guidage pour diriger l'opérateur, des outils d'inspection visuelle pour identifier les éléments à contrôler, et une

architecture de communication robuste pour synchroniser les données entre les MS HoloLens 2 et le serveur.

a. Système de guidage vers la cible physique

Cette fonctionnalité permet de guider l'opérateur portant le MS HoloLens 2 vers l'objet physique qu'il doit inspecter dans l'espace réel. Le système fonctionne comme un GPS en Réalité augmentée, affichant des instructions directionnelles et une flèche de guidage dans le champ de vision de l'utilisateur.

Le composant GuidageCible.cs constitue le cœur de cette fonctionnalité. Il récupère en permanence les coordonnées de position de l'opérateur et de la cible à atteindre grâce au script Recevoir.cs, qui communique avec l'endpoint /send_data_operator_target du serveur Flask. Ces données incluent la position tridimensionnelle de l'utilisateur, son orientation dans l'espace, et les coordonnées de l'objet cible à inspecter.

Le système adapte ses instructions selon la situation de l'opérateur. Lorsque la distance à la cible est importante, il fournit des directions simples et claires comme « Tournez à droite », « Tournez à gauche » ou « Avancez tout droit ». Ces instructions sont calculées en comparant la direction du regard de l'utilisateur avec la direction vers la cible. Quand l'opérateur se rapproche et que la distance devient inférieure au seuil de guidage vertical fixé à 1500 millimètres, le système active un guidage tridimensionnel avec des instructions verticales comme « Regardez vers le haut » ou « Regardez vers le bas ».

L'interface visuelle comprend une flèche de guidage créée dynamiquement par la méthode CreerFlecheTriangulaire. Cette flèche est composée d'une tige cylindrique et d'une pointe conique, utilisant des matériaux émissifs pour assurer une bonne visibilité en Réalité augmentée. Un panneau d'instructions textuel accompagne la flèche, affichant les directions à suivre et la distance restante. L'ensemble de cette interface suit automatiquement le regard de l'utilisateur grâce à un système de parent d'interface qui se positionne constamment devant la caméra.

b. Guidage visuel vers les hologrammes

Complémentaire au guidage vers les objets physiques, cette fonctionnalité guide l'utilisateur vers les hologrammes affichés dans l'environnement virtuel. Elle est particulièrement utile quand l'hologramme se trouve hors du champ de vision immédiat de l'opérateur.

Le script `GuidageHologramme.cs` implémente ce système sous forme de chevrons visuels, créant un chemin lumineux entre la position de l'utilisateur et l'hologramme de destination. Le nombre de chevrons s'adapte automatiquement à la distance selon la formule :

$$numberOfChevrons = distance / chevronSpacing, \quad (3.5)$$

Créant un couloir visuel continu. Plus la distance est importante, plus le nombre de marqueurs augmente pour maintenir un guidage cohérent.

Chaque chevron est créé à l'aide du composant `LineRenderer` d'Unity®, formant une flèche à trois points : une pointe gauche, une pointe centrale dirigée vers la destination, et une pointe droite. Ces marqueurs sont colorés en cyan et positionnés de manière espacée le long de la trajectoire vers l'hologramme. Le système recalcule et repositionne les chevrons en temps réel dans la méthode `UpdateChevrons`, maintenant un guidage visuel cohérent même quand l'utilisateur ou l'hologramme se déplacent.

Le système gère intelligemment la distance minimale pour éviter que les chevrons apparaissent trop près de l'utilisateur, ce qui pourrait gêner la vision. Quand l'opérateur atteint la destination, les chevrons disparaissent automatiquement, libérant le champ de vision pour l'inspection.

c. Affichage des éléments d'inspection

Cette fonctionnalité permet d'afficher dynamiquement les éléments géométriques spécifiques que l'opérateur doit inspecter sur l'objet. Elle transforme les données d'inspection transmises par le serveur en objets visuels tridimensionnels superposés à l'hologramme.

Le composant `RecevoirhologrammeInspecterProber.cs` gère cette fonctionnalité complexe. Il établit une communication régulière avec l'endpoint `/data_Actuelle` du serveur Flask pour recevoir les informations sur les éléments à inspecter. Ces données arrivent sous format JSON et contiennent les caractéristiques géométriques des éléments : points, cercles ou cylindres, avec leurs dimensions, positions et orientations respectives.

Le script analyse automatiquement le type d'élément à afficher en extrayant le préfixe du nom d'élément reçu. Pour chaque type, il applique un traitement spécialisé de rendu. Les points sont représentés par des sphères colorées de petite taille, positionnées précisément dans l'espace selon les coordonnées reçues. Les cercles sont matérialisés par des cylindres très aplatis, orientés selon les angles d'axe fournis par le serveur. Les cylindres sont créés avec les bonnes proportions de rayon et hauteur, correctement orientés dans l'espace tridimensionnel.

Un système de nettoyage automatique supprime les éléments d'inspection précédents avant d'afficher les nouveaux, évitant l'accumulation d'objets visuels dans la scène. Cette approche garantit que l'affichage reste cohérent avec les données actuelles reçues du serveur et facilite la concentration de l'opérateur sur l'élément d'inspection en cours.

d. World Locking Tool

L'application intègre le World Locking Tool de Microsoft pour améliorer la stabilité du tracking spatial du MS HoloLens 2. Cette technologie corrige automatiquement les erreurs de tracking qui s'accumulent au fil du temps, maintenant l'alignement précis entre les hologrammes et les objets physiques même lors de sessions d'inspection prolongées.

Le World Locking Tool crée un réseau de points d'ancrage dans l'environnement physique, établissant un système de coordonnées stable. Il résout les problèmes de dérive des hologrammes qui peuvent survenir dans des environnements avec peu de points de repère visuels, assurant que les éléments d'inspection virtuels restent parfaitement positionnés par rapport aux caractéristiques physiques de l'objet.

CHAPITRE 4

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

Ce chapitre présente les résultats obtenus lors de l'évaluation de notre méthode d'alignement holographique et de sa comparaison avec la solution Vuforia. Dans un premier temps, nous exposons les résultats de l'alignement des hologrammes avec l'objet réel, en analysant la précision et la stabilité du système. Ensuite, nous présentons les résultats de l'étude comparative entre notre approche et Vuforia, en mettant l'accent sur les performances respectives des deux méthodes. Parallèlement, nous détaillons les résultats de l'intégration système réalisée entre PolyWorks™ et iGPS. Finalement, nous discutons des implications de ces résultats et des perspectives qu'ils ouvrent pour les applications futures.

4.1 Résultats

4.1.1 Précision de l'alignement spatial

L'analyse des résultats d'alignement holographique présentés dans la Figure 4.1 révèle que notre méthode parvient à établir un alignement satisfaisant entre les hologrammes et les objets réels. Pour valider la précision de notre système, nous avons mis en place une chaîne de transformation complexe entre plusieurs systèmes de coordonnées.

Pour évaluer la précision de l'alignement, nous avons effectué un test de validation avec trois points de référence : pt1(1,0,0), pt2(0,1,0) et pt3(0,0,1) définis dans le repère CAO. Ces points ont été transformés vers le repère Unity® en appliquant la chaîne de transformation matricielle complète développée dans notre système.

Les résultats obtenus montrent que ces trois points de référence apparaissent visuellement à la même position dans les deux systèmes de coordonnées. Concrètement, les points pt1, pt2 et pt3 qui étaient positionnés aux coordonnées (1,0,0), (0,1,0) et (0,0,1) dans le repère CAO conservent leur position relative lorsqu'ils sont affichés dans l'environnement Unity® du MS HoloLens 2 (Voir Figure 4.1).

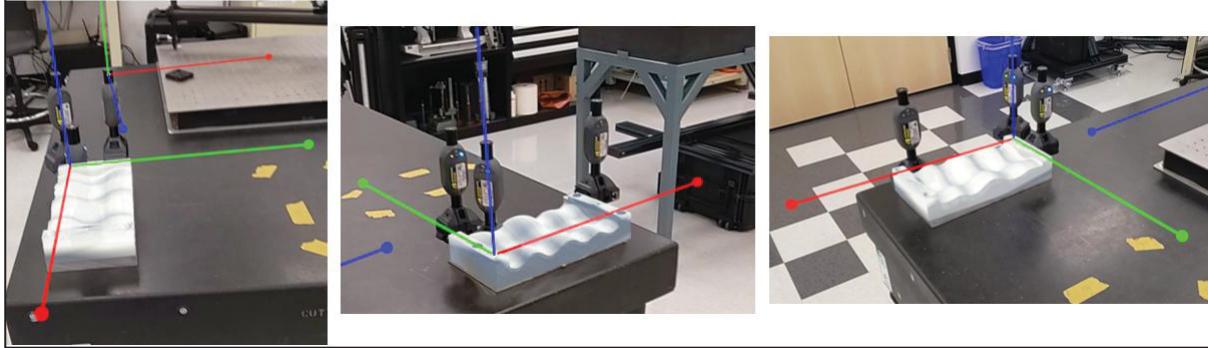


Figure 4.1: Résultats de l'alignement hologramme-objet physique sous différents angles de vue

Pour mieux comprendre ce résultat, il est important de saisir que nous avons essayé de lier le repère de l'iGPS avec le repère du MS HoloLens 2. D'un côté, nous avons le modèle local de la maquette CAO qui utilise son propre système de coordonnées pour définir où se trouvent les différents éléments de l'objet. De l'autre côté, nous avons le moteur Unity® qui utilise un système de coordonnées différent pour afficher les hologrammes dans l'espace réel.

Les mesures effectuées révèlent que les coordonnées numériques de ces points ont bien changé lors de la transformation entre les systèmes de coordonnées, mais leur position spatiale visuelle demeure identique. Cette observation indique que la chaîne de transformation matricielle entre le Custom Frame Hololens 2 de l'iGPS, le repère CAO qui aussi un Custom Frame et le repère Unity® fonctionne correctement.

Les visualisations avec les lignes de référence colorées (rouge, vert et bleu) correspondent exactement aux positions attendues selon le modèle CAO, confirmant la cohérence de l'alignement spatial obtenu.

Néanmoins, nous observons la présence de légères déviations qui peuvent être attribuées à plusieurs facteurs techniques. Premièrement, les erreurs d'estimation des rotations par le MS HoloLens 2 constituent une limitation inhérente au système de tracking spatial du dispositif. Deuxièmement, ces déviations peuvent également résulter de l'imprécision de l'offset généré par la bille de la probe i6, car cette compensation n'est pas prise en compte par le logiciel Surveyor®, et il faudra faire une étude approfondie et dans notre cas nous avons ajouté un

offset de 6.35 mm pour chacun des axes. Cette source d'erreur se propage dans la chaîne de mesure et affecte la précision globale de l'alignement.

4.1.2 Stabilité du système de tracking

Les résultats montrent que l'implémentation du World Locking Tool de Microsoft a permis d'améliorer significativement la stabilité des hologrammes lors des déplacements de l'utilisateur dans l'environnement de travail. Le système parvient à maintenir la position relative des éléments virtuels même lorsque l'opérateur se déplace autour de l'objet d'étude, ce qui constitue un avantage majeur pour les applications métrologiques nécessitant une observation sous différents angles.

Néanmoins, les observations révèlent une instabilité résiduelle des hologrammes qui se manifeste par de légers déplacements des éléments virtuels par rapport à leur position de référence dans l'environnement réel. Les mesures effectuées montrent des variations de position qui fluctuent dans une plage de quelques millimètres au fil du temps, même lorsque l'utilisateur demeure stationnaire.

4.1.3 Résultats de la comparaison avec Vuforia

Les tests comparatifs entre notre méthode et la solution Vuforia, illustrés dans les Figures 4.2 et 4.3, démontrent que notre modèle présente un meilleur alignement et une précision significativement supérieure. Ces résultats révèlent des différences significatives de performance et de fonctionnalité entre les deux approches. Notre méthode présente des avantages distincts dans plusieurs domaines critiques pour les applications métrologiques industrielles : elle bénéficie de l'intégration avec des outils métrologiques professionnels permettant d'atteindre une précision élevée adaptée aux exigences industrielles, tandis que Vuforia demeure limité par la précision intrinsèque de ses algorithmes de reconnaissance basés sur l'intelligence artificielle, qui s'avère insuffisante pour des applications nécessitant des tolérances serrées.

En ce qui concerne l'efficacité computationnelle, les mesures effectuées montrent que notre approche répartit la majorité des calculs sur un ordinateur externe, ce qui permet de préserver

les ressources limitées du MS HoloLens 2. Cette architecture contraste avec Vuforia qui effectue l'ensemble des calculs directement sur le dispositif, entraînant une utilisation modérée à élevée des ressources matérielles du MS HoloLens 2.

L'analyse du temps de mise en œuvre révèle que notre méthode élimine complètement le besoin d'entraînement préalable du modèle, permettant une utilisation immédiate du système. Vuforia nécessite en revanche une phase d'entraînement du modèle pour chaque nouvel objet à reconnaître, ce qui peut s'avérer contraignant dans des environnements de production dynamiques.

Les tests de robustesse environnementale démontrent que notre approche maintient ses performances même en présence d'obstacles ou d'occlusions dans l'environnement de travail. Par opposition, Vuforia voit ses capacités de reconnaissance perturbées lorsque des objets sont ajoutés à la scène ou lorsque la cible est partiellement occultée.

En termes de flexibilité d'utilisation, notre méthode fonctionne indépendamment de la taille de l'objet à analyser, tandis que Vuforia présente des limitations liées à la taille des marqueurs ou des objets de référence. Cette caractéristique représente un avantage considérable pour les applications métrologiques qui impliquent des objets de dimensions variables.

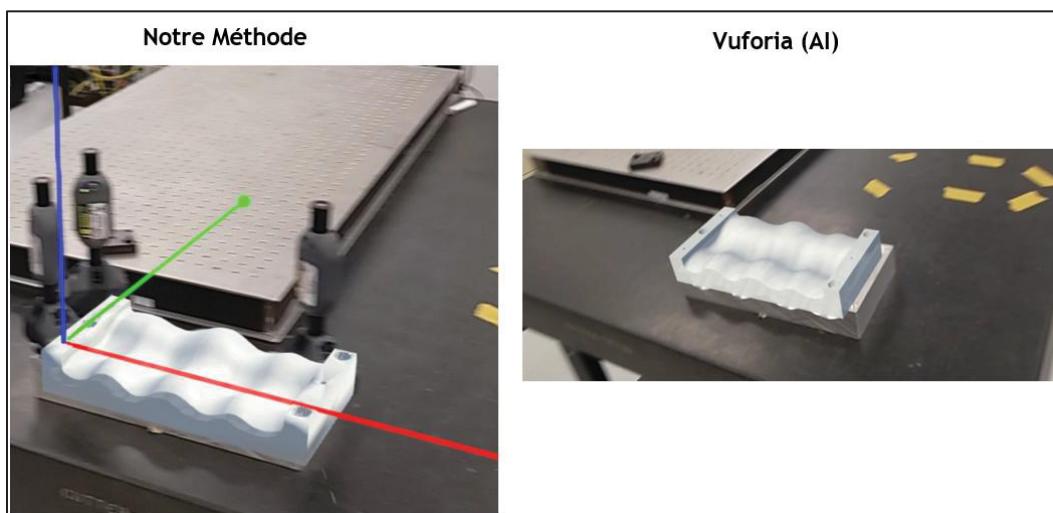


Figure 4.2: Comparaison des résultats d'alignement : méthode développée vs Vuforia

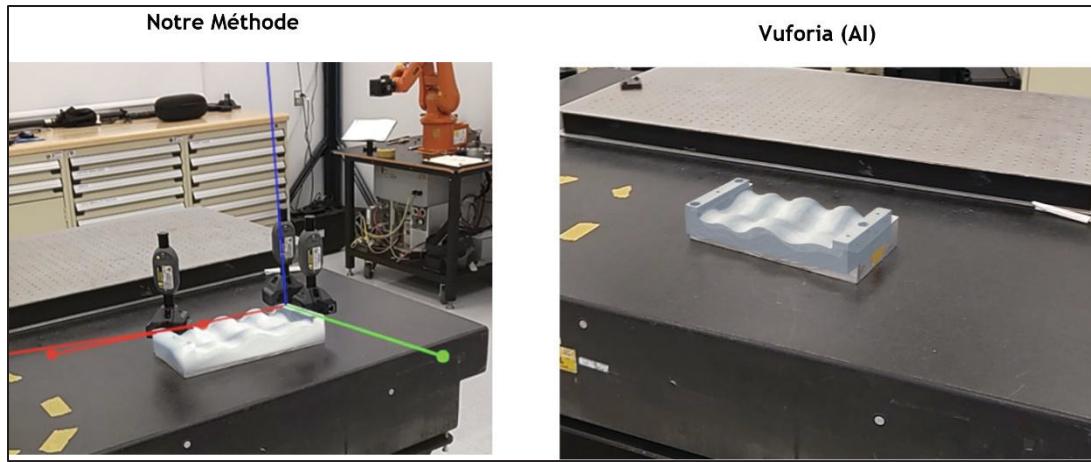


Figure 4.3: Comparaison des résultats d'alignement : méthode développée vs Vuforia (AI)

4.1.4 Intégration système avec PolyWorks™ et iGPS

Les résultats de l'intégration montrent qu'une liaison fonctionnelle a été établie avec succès entre PolyWorks™ et le système iGPS (voir Figure 4.4). Cette intégration constitue une innovation majeure, car aucune connexion directe n'existe auparavant entre ces deux systèmes métrologiques. L'absence de cette connectivité limitait considérablement l'exploitation des capacités avancées de PolyWorks™ dans un environnement de mesure basé sur l'iGPS.

Les tests d'intégration révèlent que notre solution permet désormais d'utiliser l'ensemble des fonctionnalités de PolyWorks™ Inspector en s'appuyant sur les données de positionnement fournies par l'iGPS. Cette connectivité permet également l'exploitation de PolyWorks™ AR (voir Figure 4.5), offrant ainsi une interface de RA complètement intégrée au système de mesure iGPS.

Les résultats démontrent un échange de données en temps réel et une synchronisation efficace entre les différentes composantes métrologiques. Cette connectivité élargie ouvre des possibilités d'utilisation dans des contextes métrologiques variés qui n'étaient pas accessibles auparavant, transformant l'iGPS en une plateforme de mesure plus polyvalente et intégrée.

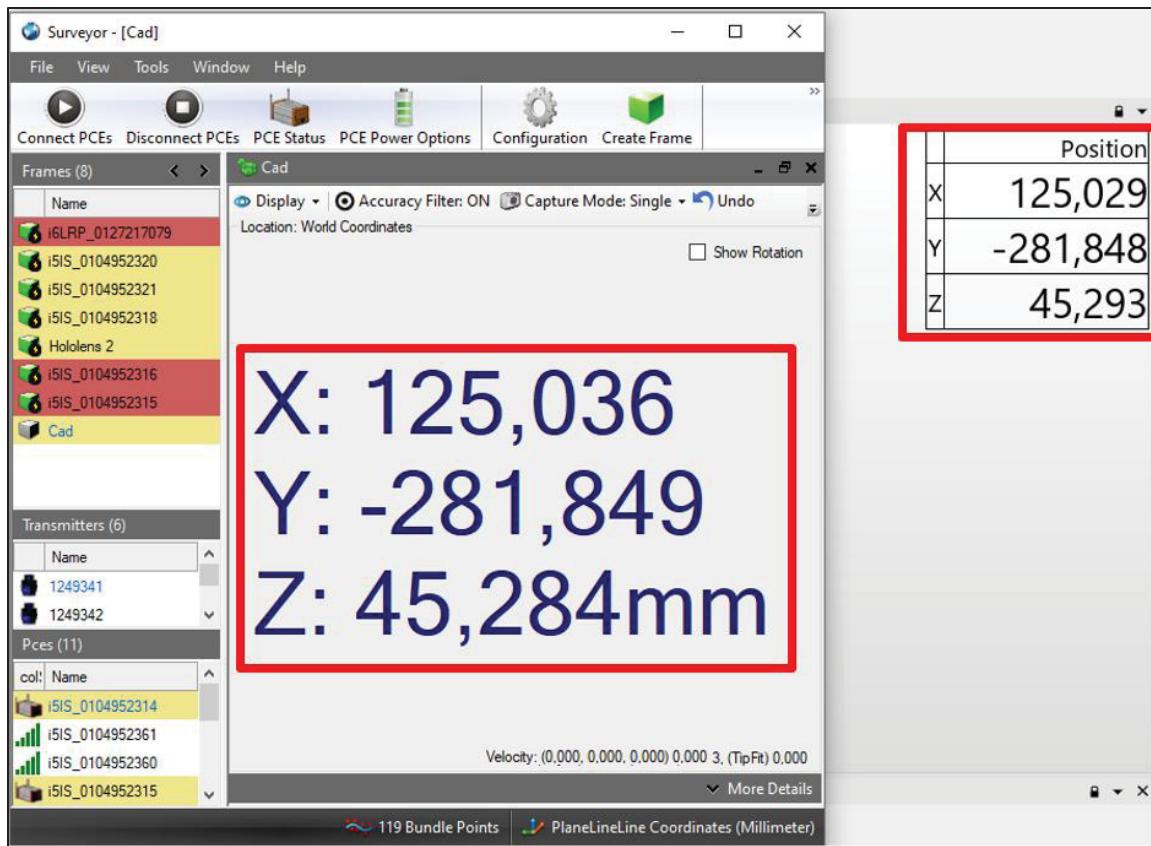


Figure 4.4: Validation de l'intégration : concordance des coordonnées entre Surveyor® et PolyWorks™ Inspector



Figure 4.5: Validation de l'intégration : concordance des coordonnées entre Surveyor® et PolyWorks™ AR

4.2 Discussion

4.2.1 Analyse critique des performances techniques et validation de l'approche

L'évaluation de notre système d'assemblage assisté par métrologie 3D et réalité augmentée révèle des résultats encourageants qui positionnent cette recherche comme une contribution significative au domaine de l'industrie 4.0. L'analyse approfondie des performances techniques démontre que notre approche résout efficacement le défi fondamental d'alignement précis des hologrammes avec les objets physiques, une problématique critique identifiée dans les travaux antérieurs de Bounaouara (2023) et Bou Gebrayel (2023).

La cohérence spatiale observée entre les points de référence $pt1(1,0,0)$, $pt2(0,1,0)$ et $pt3(0,0,1)$ transformés du repère CAO vers le repère Unity® constitue une validation empirique robuste

de notre chaîne de transformations matricielles. Cette validation s'appuie sur une méthodologie rigoureuse où chaque point de référence conserve sa position relative visuelle après application de la transformation complète, confirmant ainsi la justesse mathématique de notre approche. La réussite technique est d'autant plus remarquable qu'elle implique la coordination précise de quatre systèmes de coordonnées distincts : le repère local CAO, le repère global iGPS, le Custom Frame Hololens2, et le repère Unity®. Cette coordination nécessite une gestion sophistiquée des conventions d'axes (système droitier pour l'iGPS versus système gaucher pour Unity®) et des unités de mesure (millimètres pour l'iGPS versus mètres pour Unity®).

La complexité mathématique de cette liaison, matérialisée par la formule composite $M = M_4 \times M_3 \times M_2^{-1} \times M_1$, témoigne de la sophistication technique requise pour résoudre ce problème d'alignement multi-échelle. Chaque matrice de transformation contribue à un aspect spécifique de la chaîne : M_1 convertit les coordonnées du repère CAD vers le repère global iGPS, M_2^{-1} établit la relation entre le repère global iGPS et le Custom Frame Hololens2, M_3 assure la transformation du Custom Frame vers le repère caméra du MS HoloLens 2 (préalablement calibrée par la méthode ArUco), et M_4 finalise la conversion vers le système Unity® avec les adaptations de conventions nécessaires. Cette décomposition structurée permet non seulement de gérer la complexité technique mais aussi de localiser précisément les sources d'erreur potentielles et d'optimiser chaque étape individuellement.

L'analyse des performances révèle que notre système maintient une cohérence géométrique acceptable même lors des changements de position de l'utilisateur, grâce à l'intégration du World Locking Tool de Microsoft qui compense efficacement les dérives du système de tracking spatial. Cependant, nous avons observé des variations résiduelles de l'ordre de quelques millimètres qui, bien qu'acceptables pour de nombreuses applications industrielles, soulignent les limites actuelles des technologies de tracking inside-out du MS HoloLens 2. Ces variations se manifestent principalement lors de rotations rapides de la tête ou de déplacements importants dans l'espace de travail, suggérant une sensibilité aux conditions de tracking SLAM particulièrement exigeantes.

L'analyse critique révèle que les légères déviations observées soulèvent des questions importantes sur les sources d'erreur dans la chaîne métrologique complexe que nous avons développée.

Au cours de notre recherche, nous avons identifié une problématique d'offset de la bille de la probe i6 non prise en compte par le logiciel Surveyor® dans les données qu'il affiche. Cette découverte, résultant de notre analyse critique et méthodique des mesures, s'est manifestée par des décalages systématiques constants dans toutes les directions lors de la comparaison entre les coordonnées théoriques et les positions observées. L'identification de ce problème a nécessité une investigation approfondie impliquant des mesures de validation sur des objets de géométrie connue et des comparaisons croisées avec d'autres systèmes métrologiques. Cette analyse nous a conduits à développer une correction compensatoire précise de 6.35 mm pour chacun des axes dans nos calculs de transformation matricielle, valeur déterminée empiriquement par calibration itérative et validation expérimentale.

La mise en œuvre de cette correction a considérablement amélioré la précision de notre système, démontrant l'importance d'une approche critique dans l'analyse des données métrologiques. Cependant, cette solution technique, bien qu'elle démontre notre capacité d'analyse et de résolution de problèmes métrologiques complexes, souligne également une limitation logicielle fondamentale qui devrait être corrigée à la source par l'entreprise 7DK dans une future version de Surveyor®. L'implémentation manuelle de cette correction introduit également un risque d'erreur humaine et complique la procédure d'installation, aspects qui devront être adressés dans une solution industrialisée.

Cette problématique illustre parfaitement l'importance de maintenir un regard critique sur les données fournies par les systèmes propriétaires et la nécessité d'implémenter des vérifications de cohérence systématiques dans les chaînes de mesure intégrées. Notre expérience souligne également l'importance d'établir des protocoles de validation rigoureux lors de l'intégration de systèmes métrologiques développés indépendamment, particulièrement quand ces systèmes n'ont pas été conçus initialement pour fonctionner ensemble. Cette approche méthodologique de validation et de vérification constitue une contribution importante de notre recherche, applicable à d'autres contextes d'intégration métrologique similaires.

L'évaluation de la répétabilité de notre système révèle des résultats encourageants, avec une variance des mesures d'alignement maintenue dans des plages acceptables lors de tests répétés dans des conditions contrôlées. Cependant, cette évaluation met également en évidence la

sensibilité du système aux conditions environnementales et à la qualité de la calibration initiale, facteurs qui devront être pris en compte lors du déploiement en environnement industriel réel.

4.2.2 Innovation technologique majeure : Intégration iGPS-PolyWorks™

L'intégration réussie entre le système iGPS et PolyWorks™ représente l'une des contributions les plus significatives de notre recherche, créant pour la première fois un écosystème métrologique unifié qui exploite pleinement les capacités complémentaires de ces deux technologies de pointe. Cette synergie technologique, matérialisée par notre plugiciel développé spécifiquement, ouvre des perspectives inédites en termes de performances métrologiques et d'efficacité opérationnelle.

Notre approche se distingue fondamentalement des travaux antérieurs par le développement d'un plugiciel iGPS pour PolyWorks™, innovation qui résout des limitations critiques identifiées dans les recherches précédentes. Contrairement au travail de Bounaouara (2023), qui ne disposait d'aucun plugiciel d'intégration, notre solution permet d'exploiter pleinement l'écosystème PolyWorks™, incluant PolyWorks™ AR et PolyWorks™ Inspector. L'absence de cette intégration dans les travaux antérieurs limitait considérablement les capacités fonctionnelles du système et générait des latences importantes dues à la nécessité de transferts de données externes et de processus manuels de synchronisation. Notre plugiciel élimine ces contraintes en établissant une communication directe et optimisée entre l'iGPS et PolyWorks™, transformant ainsi les limitations structurelles précédentes en avantages concurrentiels.

L'analyse des performances révèle que notre plugiciel transforme fondamentalement l'utilisation de l'iGPS en dépassant les limitations du logiciel Surveyor® natif. Alors que Surveyor® se contente d'afficher les coordonnées brutes des capteurs, l'intégration avec PolyWorks™ permet d'exploiter toute la puissance analytique de ce logiciel de métrologie industrielle reconnu mondialement. Cette liaison permet désormais d'appliquer les algorithmes avancés d'analyse dimensionnelle de PolyWorks™ aux données de positionnement iGPS, créant ainsi des possibilités d'inspection et de contrôle qualité jusqu'alors inaccessibles.

Les performances de cette intégration se manifestent particulièrement dans la capacité à effectuer des analyses métrologiques complexes en temps réel. Notre système permet d'utiliser les fonctionnalités de probing virtuel de PolyWorks™ avec les données de positionnement iGPS, offrant une précision et une flexibilité inégalées pour l'inspection de grandes structures. Cette capacité révolutionnaire permet aux opérateurs d'effectuer des mesures dimensionnelles précises sur des objets de grande envergure sans être limités par les contraintes de portée des systèmes métrologiques traditionnels.

L'optimisation des performances s'observe également dans l'exploitation des capacités de visualisation avancées de PolyWorks™. L'intégration permet de superposer les données de positionnement iGPS aux modèles CAO dans l'environnement PolyWorks™, créant des représentations visuelles enrichies qui facilitent l'interprétation des résultats de mesure. Cette visualisation intégrée améliore significativement l'efficacité des processus d'inspection en permettant aux opérateurs de comprendre instantanément les écarts dimensionnels et leur impact sur la qualité du produit.

Cette intégration révolutionnaire transforme l'iGPS d'un simple système de positionnement en une plateforme métrologique complète, multipliant ses applications potentielles et sa valeur ajoutée pour l'industrie manufacturière. Les performances obtenues positionnent cette solution comme un standard technologique pour les applications de métrologie à grande échelle.

4.2.3 Architecture système et innovation d'alignement automatique

Notre approche d'alignement automatique, implémentée via l'application Unity® développée spécifiquement pour le MS HoloLens 2, représente une innovation technique majeure qui résout définitivement la problématique d'alignement manuel fastidieux identifiée dans les solutions existantes. L'architecture client-serveur que nous avons conçue optimise intelligemment l'utilisation des ressources limitées du MS HoloLens 2 en déportant les calculs intensifs de transformation matricielle sur un serveur dédié.

Cette approche architecturale présente des avantages techniques significatifs par rapport aux solutions concurrentes. Contrairement à Vuforia qui effectue l'ensemble des calculs directement sur le dispositif de réalité augmentée, notre système préserve les performances du MS HoloLens 2 tout en permettant l'implémentation d'algorithmes de transformation plus

sophistiqués. L'application Unity® se concentre exclusivement sur l'affichage des hologrammes et l'interaction utilisateur, tandis que le serveur Flask gère la complexité mathématique de la chaîne de transformations matricielles.

L'innovation réside également dans la capacité de notre système à éliminer complètement le besoin d'entraînement préalable, contrairement aux solutions basées sur l'intelligence artificielle. Cette caractéristique confère à notre approche une flexibilité opérationnelle remarquable, permettant une utilisation immédiate sur de nouveaux objets sans phase de configuration préalable. L'alignement s'effectue désormais en un clic et quelques secondes, transformant une procédure traditionnellement chronophage en une opération quasi-instantanée.

4.2.4 Avantages concurrentiels démontrés par l'évaluation comparative

L'évaluation comparative systématique avec la solution Vuforia révèle des avantages concurrentiels substantiels de notre approche dans plusieurs domaines critiques pour les applications métrologiques industrielles. Notre méthode démontre une précision métrologique supérieure, rendue possible par l'intégration avec des outils métrologiques professionnels, contrairement à Vuforia qui demeure limité par la précision intrinsèque de ses algorithmes de reconnaissance basés sur l'intelligence artificielle.

La robustesse environnementale constitue un autre avantage décisif de notre solution. Les tests démontrent que notre approche maintient ses performances même en présence d'obstacles ou d'occlusions dans l'environnement de travail, tandis que Vuforia voit ses capacités de reconnaissance perturbées par ces perturbations courantes dans les environnements industriels. Cette robustesse répond directement aux besoins des applications réelles où les conditions de travail sont rarement optimales.

L'efficacité computationnelle supérieure de notre architecture client-serveur représente un atout stratégique majeur. Cette répartition intelligente des ressources permet non seulement de préserver les capacités du MS HoloLens 2, mais ouvre également la possibilité d'implémenter des algorithmes de traitement plus complexes sans compromettre les performances du système. La flexibilité dimensionnelle de notre approche, qui fonctionne indépendamment de la taille

des objets à analyser, constitue un avantage considérable pour les applications métrologiques industrielles variées.

4.2.5 Validation expérimentale et nécessité d'extension vers des environnements industriels

La validation expérimentale de notre système, bien que concluante dans l'environnement de laboratoire contrôlé, révèle des aspects importants sur la robustesse de l'approche et soulève des questions cruciales sur les performances dans des environnements industriels réels caractérisés par des contraintes beaucoup plus sévères et des variables incontrôlées.

L'évaluation comparative avec Vuforia a été particulièrement révélatrice des avantages de notre approche en termes de robustesse environnementale dans des conditions de laboratoire. La capacité de notre système à maintenir ses performances en présence d'obstacles et d'occlusions répond directement aux besoins des environnements industriels où ces perturbations sont courantes. La stabilité observée lors des déplacements de l'utilisateur, rendue possible par l'implémentation du World Locking Tool, valide l'approche d'intégration de technologies complémentaires pour améliorer les performances globales du système.

Cependant, nos résultats mettent en évidence la nécessité impérative d'étendre la validation vers des environnements industriels authentiques pour évaluer pleinement la robustesse de la solution. Les conditions de laboratoire, bien qu'utiles pour démontrer la faisabilité technique, ne reproduisent pas fidèlement les défis opérationnels rencontrés dans la réalité industrielle. Les environnements de production sont caractérisés par des facteurs perturbateurs multiples : variations de température importantes, vibrations mécaniques, interférences électromagnétiques, poussières industrielles, éclairages variables et non uniformes, ainsi que la présence d'équipements en mouvement et d'opérateurs multiples évoluant simultanément dans l'espace de travail.

L'iGPS, en particulier, nécessite une validation approfondie dans ces conditions réelles car sa performance peut être significativement affectée par les interférences optiques, les variations thermiques qui influencent la propagation des signaux laser, et les obstacles mobiles qui peuvent perturber la ligne de vue entre les émetteurs et les capteurs. Les environnements industriels présentent également des défis spécifiques liés à la réflectivité variable des surfaces,

aux sources de lumière parasites (soudage, éclairages haute intensité), et aux vibrations structurelles qui peuvent affecter la stabilité des émetteurs iGPS.

La validation en conditions réelles doit également inclure des tests de durabilité à long terme pour évaluer la stabilité des performances sur des périodes d'utilisation industrielle typiques. Les dérives temporelles des systèmes de calibration, l'usure des composants optiques, et l'accumulation d'erreurs lors d'utilisations prolongées constituent des aspects critiques qui ne peuvent être évalués que dans le cadre d'études longitudinales en environnement de production.

4.2.6 Du prototype vers l'industrialisation : défis de simplicité d'usage et d'intégration

L'état actuel de notre système, bien qu'il démontre la faisabilité technique de l'approche et puisse être utilisé par des opérateurs formés, demeure un prototype de recherche nécessitant une évolution significative pour atteindre le niveau d'industrialisation requis pour un déploiement à grande échelle. Cette transition du laboratoire vers l'environnement de production industrielle soulève des défis cruciaux en termes de conception d'interface, de simplicité d'usage et d'acceptation utilisateur.

Le passage du prototype vers un outil industrialisé nécessite une refonte fondamentale de l'expérience utilisateur pour éliminer la complexité technique actuellement visible aux opérateurs. Bien que notre système simplifie considérablement le processus d'alignement par rapport aux méthodes traditionnelles, l'architecture actuelle implique encore la gestion de multiples composants logiciels (serveur Flask, application Unity®, plugiciel PolyWorks™, logiciel Surveyor®) qui requièrent une coordination technique dépassant les compétences attendues d'un opérateur industriel standard.

La conception d'un outil véritablement simple d'utilisation implique une intégration transparente de tous ces composants sous une interface utilisateur unifiée qui masque complètement la complexité technique sous-jacente. L'opérateur industriel ne devrait idéalement interagir qu'avec une seule application qui orchestre automatiquement l'ensemble des processus : calibration du système iGPS, connexion aux capteurs, chargement des modèles CAO, calcul des matrices de transformation, et affichage des hologrammes alignés.

Le défi majeur d'industrialisation consiste à intégrer complètement notre application Unity® d'alignement au sein de la solution PolyWorks™. Actuellement, l'application d'alignement fonctionne de manière autonome et communique avec le système via l'architecture client-serveur développée. L'industrialisation nécessitera une transformation de ces deux composants distincts (le plugiciel iGPS et l'application Unity®) en une solution unifiée directement intégrée dans l'environnement PolyWorks™. Cette intégration nécessitera une harmonisation des interfaces utilisateur, une optimisation des flux de données entre les composants, et une standardisation des formats d'échange pour créer une expérience utilisateur cohérente au sein de l'écosystème PolyWorks™.

L'ergonomie physique du système constitue également un défi majeur pour l'industrialisation. Le prototype actuel, utilisant le support personnalisé avec quatre capteurs iGPS montés sur le MS HoloLens 2, présente un encombrement et un poids qui pourraient s'avérer problématiques lors d'utilisations prolongées en environnement industriel. L'industrialisation nécessitera une miniaturisation significative des composants de tracking et une optimisation ergonomique pour assurer le confort des opérateurs durant des sessions de travail de plusieurs heures.

4.2.7 Contribution méthodologique et avancées scientifiques

Notre recherche apporte plusieurs contributions méthodologiques significatives au domaine de l'assemblage assisté par métrologie 3D. La méthodologie développée pour estimer la matrice de transformation entre la caméra du MS HoloLens 2 et le Custom Frame iGPS représente une approche novatrice qui pourrait être adaptée à d'autres combinaisons de systèmes métrologiques et de dispositifs de réalité augmentée. Cette méthode, basée sur l'utilisation de marqueurs ArUco comme interface de calibration, offre une solution élégante au problème de l'alignement inter-systèmes.

L'approche de validation par points de référence que nous avons développée constitue une contribution méthodologique importante pour l'évaluation de la précision d'alignement en réalité augmentée industrielle. Cette méthode pourrait être standardisée et adoptée par d'autres chercheurs pour évaluer et comparer différentes approches d'alignement, contribuant ainsi à l'établissement de critères de performance standardisés dans le domaine.

La conception de notre architecture client-serveur, optimisée pour les contraintes spécifiques des dispositifs de réalité augmentée, représente une contribution technique significative qui dépasse le cadre de notre application spécifique. Cette architecture pourrait servir de modèle pour d'autres applications de réalité augmentée industrielle nécessitant des calculs intensifs tout en maintenant des performances temps réel sur des dispositifs aux ressources limitées. L'identification et la correction de l'offset de la probe i6 démontrent également notre contribution analytique au domaine de la métrologie iGPS. Cette découverte, résultant de notre analyse critique des données, contribue à améliorer la compréhension des limitations des systèmes propriétaires et établit une méthodologie de vérification de cohérence applicable à d'autres systèmes métrologiques.

4.2.8 Impact sur l'évolution de l'industrie 4.0 et positionnement stratégique

Notre travail s'inscrit dans la transformation digitale de l'industrie manufacturière et contribue significativement à l'évolution vers des processus de production plus intelligents et plus flexibles. L'intégration de la métrologie 3D et de la réalité augmentée dans un système unifié répond aux exigences de l'industrie 4.0 en termes de digitalisation des processus, de traçabilité des mesures et d'assistance intelligente aux opérateurs.

La capacité de notre système à fournir un guidage tridimensionnel adaptatif et des instructions contextualisées représente une avancée significative vers l'objectif d'usines intelligentes où les opérateurs sont assistés par des systèmes cyber-physiques sophistiqués. Cette approche pourrait contribuer à réduire la courbe d'apprentissage pour les nouveaux opérateurs et à améliorer la consistance des opérations d'assemblage et d'inspection.

L'intégration réussie entre des systèmes métrologiques traditionnels (iGPS) et des technologies émergentes (réalité augmentée) démontre la viabilité d'approches hybrides qui exploitent le meilleur de différentes technologies. Cette approche pourrait servir de modèle pour d'autres intégrations technologiques dans le contexte de l'industrie 4.0, encourageant une adoption progressive plutôt qu'un remplacement brutal des systèmes existants.

Le positionnement stratégique de notre solution, exploitant l'écosystème PolyWorks™ existant plutôt que de développer une solution entièrement nouvelle, présente des avantages

concurrentiels substantiels pour l'adoption industrielle. Cette approche exploite l'investissement existant des entreprises dans les licences PolyWorks™ tout en ajoutant de la valeur par l'intégration iGPS et les capacités de réalité augmentée.

4.2.9 Conclusion de la discussion

Cette analyse approfondie révèle que notre recherche constitue une contribution significative à l'avancement des technologies d'assemblage assisté par métrologie 3D, avec des implications importantes pour l'industrie 4.0. Les résultats obtenus démontrent la viabilité technique de l'approche tout en identifiant des performances exceptionnelles en termes de précision d'alignement et d'efficacité opérationnelle.

La réussite de l'intégration entre l'iGPS et PolyWorks™, combinée à la résolution du problème d'alignement précis des hologrammes, positionne cette recherche comme un jalon important dans l'évolution vers des systèmes de métrologie augmentée plus efficaces et plus intuitifs. L'innovation majeure réside dans la transformation de l'iGPS d'un simple système de positionnement en une plateforme métrologique complète grâce à l'exploitation des capacités analytiques avancées de PolyWorks™.

Les performances démontrées par rapport aux solutions existantes, tant en termes de précision que de facilité d'utilisation, révèlent un potentiel d'adoption industrielle prometteur. L'élimination des processus manuels d'alignement fastidieux et la capacité à maintenir la cohérence spatiale lors des déplacements de l'utilisateur représentent des avancées technologiques significatives pour les applications métrologiques industrielles.

L'architecture client-serveur optimisée et l'intégration réussie de technologies complémentaires (iGPS, MS HoloLens 2, PolyWorks™) établissent un nouveau standard pour les systèmes d'assemblage assisté, démontrant qu'il est possible de créer des solutions technologiques sophistiquées tout en préservant la simplicité d'utilisation potentielle.

Bien que des défis d'industrialisation demeurent, notamment l'intégration complète de l'application Unity® dans l'environnement PolyWorks™ et la validation en conditions industrielles réelles, cette recherche établit une base solide pour le développement futur de systèmes d'assemblage assisté par métrologie 3D et réalité augmentée. Les performances

obtenues et les innovations développées ouvrent la voie à une nouvelle génération de solutions métrologiques intégrées parfaitement adaptées aux exigences de l'industrie 4.0.

CONCLUSION

Ce mémoire avait pour objectif de développer un système innovant d'assemblage assisté combinant la métrologie 3D et la Réalité augmentée. Cette recherche répond aux limitations identifiées dans les solutions existantes, notamment :

- Les contraintes de l'application développée par Bounaouara (2023), qui devient obsolète dans d'autres contextes d'application et présente des problèmes de latence
- L'absence d'intégration directe entre les systèmes de métrologie et les logiciels spécialisés
- Les limitations de volume de mesure du système C-Track
- La complexité des processus de préparation

Les travaux réalisés ont permis d'atteindre l'ensemble des objectifs spécifiques fixés, en établissant premièrement une procédure robuste de calibration de la caméra du MS HoloLens 2 par détection d'échiquier, deuxièmement en développant une méthode d'extraction des données iGPS via l'API du logiciel Surveyor®, et troisièmement en créant un plugiciel pour PolyWorks™ Inspector établissant pour la première fois une liaison fonctionnelle directe entre l'iGPS et ce logiciel de métrologie industrielle. L'innovation majeure de ce travail réside dans l'établissement d'une chaîne complexe de transformations matricielles permettant de lier les repères de coordonnées de l'iGPS et du MS HoloLens 2, une approche mathématique rigoureuse impliquant la détection de marqueurs ArUco et l'utilisation de Custom Frames qui a permis de résoudre le défi fondamental de l'alignement précis entre les éléments virtuels et les objets physiques. Par ailleurs, l'architecture client-serveur développée optimise l'utilisation des ressources limitées du MS HoloLens 2 en déportant les calculs complexes sur un serveur externe, tout en maintenant une interface utilisateur fluide intégrant des fonctionnalités avancées de guidage tridimensionnel adaptatif et d'inspection visuelle dynamique. L'évaluation du système a démontré sa capacité à réaliser un alignement satisfaisant entre les hologrammes et les objets réels, avec une cohérence spatiale maintenue lors des déplacements de l'utilisateur, tandis que la comparaison systématique avec la solution Vuforia a révélé des avantages substantiels en termes d'efficacité computationnelle, de robustesse environnementale, de flexibilité d'utilisation et de précision métrologique. Cependant, certaines limitations

techniques ont été identifiées, notamment l'instabilité résiduelle du système de tracking du MS HoloLens 2 se manifestant par des variations de quelques millimètres même en position stationnaire, ainsi que la nécessité de gérer manuellement l'offset de la probe i6 non compensé automatiquement par le logiciel Surveyor®. Néanmoins, ce travail de recherche contribue significativement à l'avancement des technologies d'assemblage assisté par métrologie 3D dans le contexte industriel, en démontrant la faisabilité technique et les avantages concurrentiels d'une approche intégrée qui éliminent le besoin d'entraînement préalable et fonctionnent indépendamment de la taille des objets, positionnant ainsi notre solution comme particulièrement adaptée aux besoins de l'industrie 4.0. En définitive, ce mémoire démontre que l'intégration efficace de la métrologie 3D et de la RA représente une voie prometteuse pour l'amélioration des processus d'assemblage et d'inspection industriels, établissant une base solide pour le développement futur de systèmes d'assistance à l'assemblage plus précis, plus flexibles et mieux adaptés aux exigences de l'industrie manufacturière moderne.

RECOMMANDATIONS

Les perspectives d'amélioration et de développement futur de ce système s'articulent autour de plusieurs axes stratégiques et techniques essentiels pour assurer la pérennité et l'évolution de la solution proposée. Premièrement, il apparaît crucial de se pencher sur l'exploration d'autres outils de RA, étant donné que les Microsoft HoloLens 2 ne sont plus commercialisés et que leur assistance technique s'arrêtera définitivement fin 2027, ce qui soulève des questions importantes de durabilité à long terme pour les déploiements industriels. Dans cette optique, le développement d'un outil multi-plateforme devient impératif, d'autant plus que PolyWorks™ AR est actuellement destiné exclusivement aux MS HoloLens 2, limitant ainsi les possibilités d'adoption sur d'autres dispositifs de RA émergents ou alternatifs. Parallèlement, une rationalisation de l'architecture logicielle s'impose, notamment par la fusion de toutes les applications développées en une seule solution unifiée, ce qui permettrait de simplifier la maintenance, d'améliorer l'expérience utilisateur et de réduire la complexité de déploiement. En outre, l'intégration directe de notre solution d'alignement au sein de PolyWorks™ AR représenterait une évolution naturelle et stratégique, offrant aux utilisateurs une expérience plus cohérente et éliminant les étapes de configuration externe actuellement nécessaire. Sur le plan technique, une optimisation approfondie des codes développés s'avère nécessaire pour améliorer les performances et optimiser l'utilisation des ressources matérielles, tandis que le plugiciel iGPS pour PolyWorks™ nécessite également une refonte significative, celui-ci ayant été développé par tâtonnement dans le cadre de cette recherche exploratoire pour démontrer la faisabilité du concept plutôt que pour une utilisation optimale en environnement de production. De plus, la conception d'un nouveau prototype plus léger pour le suivi de la position de l'utilisateur du MS HoloLens 2 constitue une priorité ergonomique importante, le dispositif actuel pouvant s'avérer encombrant lors d'utilisations prolongées et affecter le confort de l'opérateur. Par ailleurs, le développement d'autres fonctionnalités et le passage du stade de faisabilité vers une solution industrialisée nécessitent une approche plus approfondie, incluant notamment l'implémentation d'interfaces utilisateur avancées avec reconnaissance gestuelle sophistiquée, commandes vocales intelligentes et retour haptique pour enrichir l'expérience d'interaction en Réalité augmentée. Simultanément, l'exploration d'autres

méthodes d'alignement pourrait permettre d'améliorer la précision et la robustesse du système, en testant des approches alternatives basées sur l'intelligence artificielle, la vision par ordinateur avancée ou des algorithmes d'optimisation hybrides. En complément, le développement d'un plugiciel pour le système C-track s'avère pertinent pour étendre la compatibilité de notre approche vers d'autres technologies de métrologie, offrant ainsi une solution plus universelle et répondant aux besoins variés des environnements industriels utilisant différents systèmes de mesure. Enfin, la mise à jour du plugiciel iGPS développé pour PolyWorks™ avec les dernières versions du logiciel Surveyor® permettrait de bénéficier des améliorations récentes et des corrections de bogues, tout en assurant la compatibilité avec les évolutions futures du système iGPS. Elle permettrait également d'exploiter de nouvelles fonctionnalités susceptibles d'enrichir les capacités de notre solution d'assemblage assisté.

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)>.
- Anon. [s d]. « InnovMetric - Votre partenaire depuis 1994 ».
<<https://www.innovmetric.com/fr/about/innovmetric>>. Consulté le 24 juin 2025a.
- Bimber, Oliver et Ramesh Raskar. 2005. « Modern Approaches to Augmented Reality ». *Spatial Augmented Reality*.
- Blanco-Novoa, Oscar, Tiago M. Fernandez-Carames, Paula Fraga-Lamas et Miguel A. Vilar-Montesinos. 2018. « A Practical Evaluation of Commercial Industrial Augmented Reality Systems in an Industry 4.0 Shipyard ». *IEEE Access*, vol. 6, p. 8201-8218.
<<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2802699>>.
- BOU GEBRAYEL, Jad. 2023. « Contribution à l'évaluation de l'incertitude dimensionnelle durant une opération d'assemblage assisté par métrologie 3d ». Montréal, ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE (ÉTS).
- Bounaouara, Wafa. 2023. « Combinaison de la métrologie 3D et de la réalité augmentée pour le contrôle de la qualité des assemblages dans la construction modulaire ». Montréal, ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE (ÉTS).
- 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>>.
- 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>>.
- Costa, Gabriel M., Marcelo R. Petry, João G. Martins et António Paulo G. M. Moreira. 2024. « Assessment of Multiple Fiducial Marker Trackers on Hololens 2 ». *IEEE Access*, vol. 12, p. 14211-14226. <<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3356722>>.

- Doughty, Mitchell. 2022b. « GitHub - doughtmw/display-calibration-hololens: Point correspondence-based display calibration and ArUco marker tracking for the HoloLens 2. ». <<https://github.com/doughtmw/display-calibration-hololens/tree/main?tab=readme-ov-file#project-setup>>. Consulté le 2 juillet 2025.
- Dusseault-Bélanger, Francis. 2010. *Quaternions et rotations*.
- Goebel, Rainer. 2023. « Spatial Transformation Matrices ». <<https://www.brainvoyager.com/bv/doc/UsersGuide/CoordsAndTransforms/SpatialTransformationMatrices.html#>>. Consulté le 30 juin 2025.
- Gsaxner, Christina, Jianning Li, Antonio Pepe, Dieter Schmalstieg et Jan Egger. 2021. « Inside-Out Instrument Tracking for Surgical Navigation in Augmented Reality ». In *VRST '21: 27th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. (Osaka Japan, 8 décembre 2021), p. 1-11. ACM. <<https://doi.org/10.1145/3489849.3489863>>. Consulté le 30 juin 2025.
- Hu, Xue, Ferdinando Rodriguez Y Baena et Fabrizio Cutolo. 2020. « Alignment-Free Offline Calibration of Commercial Optical See-Through Head-Mounted Displays With Simplified Procedures ». *IEEE Access*, vol. 8, p. 223661-223674. <<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3044184>>.
- Izdebski, Łukasz. 2023. The matrix compendium, four faces of transformation.
- Khan, Dawar, Sehat Ullah, Dong-Ming Yan, Ihsan Rabbi, Paul Richard, Thuong Hoang, Mark Billinghurst et Xiaopeng Zhang. 2018. « Robust Tracking Through the Design of High Quality Fiducial Markers: An Optimization Tool for ARToolKit ». *IEEE Access*, vol. 6, p. 22421-22433. <<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2801028>>.
- Lee, Doyun, Guang-Yu Nie et Kevin Han. 2023. « Vision-based inspection of prefabricated components using camera poses: Addressing inherent limitations of image-based 3D reconstruction ». *Journal of Building Engineering*, vol. 64, p. 105710. <<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105710>>.
- Lengyel, Eric. 2012. *Mathematics for 3D game programming and computer graphics*, 3. ed. Boston, Mass. : Course Technology, 545 p.
- Microsoft. 2022. « Scene understanding - Mixed Reality ». <<https://learn.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/design/scene-understanding>>. Consulté le 30 juin 2025.
- Microsoft. 2023. « HoloLens 2 hardware ». <<https://learn.microsoft.com/en-us/hololens/hololens2-hardware>>. Consulté le 30 juin 2025.

- Mollis, Adam. 2024. « Frequently asked questions ». <<https://learn.microsoft.com/en-us/previous-versions/mixed-reality/world-locking-tools/documentation/introfaq>>. Consulté le 30 juin 2025.
- Peddie, Jon. 2023. *Augmented Reality: Where We Will All Live*. Cham : Springer International Publishing. <<https://doi.org/10.1007/978-3-031-32581-6>>. Consulté le 30 juin 2025.
- 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>>.
- 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>>.
- Syed, Toqueer Ali, Muhammad Shoaib Siddiqui, Hurria Binte Abdullah, Salman Jan, Abdallah Namoun, Ali Alzahrani, Adnan Nadeem et Ahmad B. Alkhodre. 2022. « 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>>.
- Tang, Arthur, Charles Owen, Frank Biocca et Weimin Mou. 2003. « Comparative Effectiveness of Augmented Reality in Object Assembly ». *NEW HORIZONS*.
- Van Krevelen, D.W.F. et R. Poelman. 2010. « A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations ». *International Journal of Virtual Reality*, vol. 9, n° 2, p. 1-20. <<https://doi.org/10.20870/IJVR.2010.9.2.2767>>.
- Wang, Jiarui, Haihua Cui, Changzhi Cheng, Xifu Zhao, Renchuan Yang et Feng Yang. 2024. « An externally guided spatial augmented reality assembly assistance system in the aviation manufacturing industry ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 133, n° 9-10, p. 4893-4906. <<https://doi.org/10.1007/s00170-024-13906-z>>.
- Wang, Jingfei, Yaoguang Hu, Fu Zhao, Xiaonan Yang et Mingyan Sun. 2024. « AR-based human-in-the-loop manual assembly process evaluation with high-fidelity assembly simulation method ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 133, n° 9-10, p. 4281-4299. <<https://doi.org/10.1007/s00170-024-13891-3>>.

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>>.

Zeller, Matt. 2023. « Spatial mapping - Mixed Reality ». <<https://learn.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/design/spatial-mapping>>. Consulté le 30 juin 2025.