

DÉVELOPPEMENT ET ANALYSE D'UNE MÉTHODE D'ASSEMBLAGE PAR PROJECTION DES INSTRUCTIONS

par

Ange AGOTIOH

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA
MAITRISE EN GÉNIE DES RISQUES DE SANTÉ ET DE SÉCURITÉ DU
TRAVAIL
M. SC. A

MONTREAL, LE 17 NOVEMBRE 2025

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Ange Agotioh, 2025



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

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE OU THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Sylvie Nadeau, directrice de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

M. William De Paula Ferreira, président du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

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

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

LE 23 OCTOBRE 2025

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la rédaction de ce mémoire.

Je voudrais dans un premier temps remercier, ma directrice de mémoire, Professeur Sylvie Nadeau et mon co-directeur de mémoire, Professeur Antoine Tahan pour leur expertise, leur patience, leur disponibilité et surtout leurs judicieux conseils tout au long de mon parcours à la maîtrise.

Mes sincères remerciements aussi à Valérie Ngô, assistante de recherche qui m'a assisté dans le cadre de mon protocole d'expérimentation et durant mes expériences au laboratoire de métrologie. Sa présence et son soutien ont été une aide précieuse pour le bon déroulement de mes activités de recherche. Je remercie également toute l'équipe du laboratoire en particulier, M. Joël Grignon, pour son aide lors des expérimentations, son assistance technique et ses conseils pendant le traitement de mes données expérimentales.

Je remercie également ma conjointe Ehon Kossiwa pour son soutien constant et ses encouragements durant ma maîtrise.

Développement et analyse d'une méthode d'assemblage par projection des instructions

Ange AGOTIOH

RÉSUMÉ

Au cours des dernières années, l'utilisation de dispositifs d'assistance numérique aux dépens de la méthode manuelle pour l'assemblage de produits a gagné de l'importance dans diverses industries, telles que l'aéronautique, la construction, l'agroalimentaire, promettant une productivité améliorée et des avantages ergonomiques pour les travailleurs.

Ce mémoire propose une étude comparative approfondie sur la mise en œuvre de deux méthodes durant un assemblage, l'une avec l'assistance d'un projecteur FARO® et l'autre, qui est plutôt manuelle basée sur des mesures dimensionnelles fournies sur un dessin technique. L'objectif est de comparer les performances des deux méthodes, d'aborder l'utilisabilité, l'impact de ces deux méthodes sur la performance (temps d'assemblage et critères de qualité) et le ressenti des participants au moment de l'assemblage. Cette étude consiste à assembler trois configurations spatiales composées de pièces à géométries différentes. Les paramètres à recueillir sont la qualité de l'assemblage (adéquation par rapport aux tolérances exigées et qui est inspectée avec un bras de mesure), le temps d'assemblage ainsi que la posture des participants avec les caméras GO-PRO®. Finalement, nous avons recueilli le ressenti des participants (charge mentale et physique) avec NASA-TLX (NASA Task Load Index).

Des analyses statistiques du type ANOVA réalisées sur les résultats expérimentaux indiquent que la méthode assistée par projection FARO® est significativement plus précise que la méthode manuelle. Les données pour la précision sont mesurées avec le bras de mesure HEXAGON®. Par ailleurs, une réduction révélatrice du temps d'assemblage de l'ordre de 75 % est constatée lors d'utilisation de la méthode assistée par projection par rapport à la méthode manuelle. L'absence de tâches de mesurage est l'une des raisons expliquant cette situation. Les résultats de NASA-TLX pour le ressenti du participant permettent de constater également une réduction de la charge mentale pendant l'utilisation de la méthode FARO® grâce aux instructions projetées et au guidage visuel en temps réel.

La méthode par projection offre certes une plus grande précision que la méthode manuelle, cependant, certaines formes géométriques, dont les empreintes sont difficiles à projeter, peuvent engendrer des erreurs (humaines, précisions) pendant l'assemblage. Par ailleurs, la table d'assemblage est adaptée pour l'assemblage debout. Néanmoins, en ne permettant aucun ajustement, elle ne peut pas garantir une posture ergonomique confortable pour 90 à 95 % d'une population de participants(es) nord-américains. De ce fait, plusieurs risques ergonomiques, comme la flexion du tronc, de même qu'une sollicitation importante de la ceinture scapulaire non soutenue lors d'un travail de précision, ont une influence sur la diminution de la précision d'assemblage et de la performance. Il serait alors judicieux d'utiliser une table ajustable en hauteur. Ces constats pourraient servir pour la suite des travaux en vue de distinguer les pièces favorables pour l'utilisation de la méthode assistée par projection FARO®.

Mots clés : assemblage, industrie 4.0, projection d'instructions, méthode, manuelle, assistance numérique, ressentie, NASA-TLX

Development and analysis of an assembly method using instruction projection

Ange AGOTIOH

ABSTRACT

In recent years, the use of digital assistance devices over manual methods for product assembly has gained importance in various industries such as aerospace, construction, and agri-food, promising improved productivity and ergonomic benefits for workers.

This thesis presents an in-depth comparative study on the implementation of two methods during assembly: one using the assistance of a FARO® projector and the other, a manual method based on dimensional measurements provided on a technical drawing. The objective is to compare the performance of the two methods, assess their usability, evaluate their impact on performance (assembly time and quality criteria), and analyze participants' experiences during the assembly process. This study involves assembling three spatial configurations composed of parts with different geometries. The parameters collected include assembly quality (compliance with required tolerances, inspected using a measuring arm), assembly time, and participants' postures captured with GO-PRO® cameras. Finally, participants' perceived workload (mental and physical) was evaluated using the NASA-TLX (NASA Task Load Index).

Statistical analyses using ANOVA on the experimental results indicate that the FARO® projection-assisted method is significantly more accurate than the manual method. The accuracy data is measured using the HEXAGON® measuring arm. Moreover, a remarkable 75% reduction in assembly time was observed when using the projection-assisted method compared to the manual method. The absence of measurement tasks is one of the key factors explaining this outcome. The NASA-TLX results also indicate a reduction in participants' mental workload when using the FARO® method, thanks to the projected instructions and real-time visual guidance.

While the projection method indeed offers greater precision than the manual method, certain geometric shapes with difficult-to-project outlines may lead to errors (human or precision-related) during assembly. Additionally, the assembly table used is designed for standing work. However, since it offers no adjustability, it cannot ensure a comfortable ergonomic posture for 90 to 95% of the North American participant population. As a result, several ergonomic risks—such as trunk flexion and significant strain on the unsupported shoulder girdle during precision work—can negatively affect assembly accuracy and overall performance. Therefore, using a height-adjustable table would be advisable. These findings could serve as a basis for future work aimed at identifying which parts are best suited for the FARO® projection-assisted method.

Keywords: assembly, instruction projection, industry 4.0, digital system assistance, Workload, NASA-TLX

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	3
1.1 Revue de l'état de l'art des systèmes d'assistance numérique en fabrication et assemblage	3
1.2 Systèmes de réalité augmentée dans le cadre d'un assemblage.....	6
1.3 Relation entre l'opérateur d'assemblage et l'interface du système d'assistance	8
1.4 Systèmes de métrologie 3D utilisés pour l'assemblage à grande échelle	9
1.5 État de l'art des systèmes de mesure en métrologie 3D à grande échelle.....	9
1.6 Question de recherche.....	11
1.7 Hypothèses retenues.....	13
1.8 Conclusion	13
CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE.....	15
2.1 Approche méthodologique : revue systématique (diagramme de flux PRISMA)	15
2.2 Justification du choix technologique et comparaison avec les gabarits traditionnels..	17
2.3 Cadre de l'étude	18
2.3.1 Pièces multiformes 3D imprimées	18
2.3.2 Un projecteur laser FARO®	21
2.3.3 Un bras de mesure HEXAGON®	21
2.4 Position du participant pendant l'assemblage.....	22
2.4.1 Données anthropométriques pertinentes (position debout).....	22
2.4.2 Hauteur idéale d'une surface de travail debout.....	23
2.4.3 Problème d'une table debout non ajustable	23
2.4.4 Conclusion	23
2.4.5 Solutions ergonomiques possibles	24
2.5 Participants sans limitations fonctionnelles	24
2.6 Variables choisies pour l'expérimentation.....	25
2.7 Protocole expérimental	26
2.7.1 Présentation des configurations spatiales.....	26
2.7.2 Planification d'expérience	27
2.7.3 Protocole d'assemblage	27
2.7.3.1 Assemblage avec la méthode FARO®	28
2.7.3.2 Méthode d'assemblage manuel.....	28
2.8 Méthode ANOVA.....	31
2.8.1 Mesure des déviations réelles	32
2.8.1.1 Exemple de déviations dimensionnelles après l'assemblage.....	33
2.9 Présentation de NASA-TLX	34
CHAPITRE 3 Données expérimentales.....	37
3.1 Déviations géométriques.....	38

3.2	Temps d'assemblage.....	39
3.3	Mesures NASA-TLX.....	41
3.3.1	Données NASA TLX - Méthode manuelle.....	41
3.3.2	Données NASA TLX - Système de projection FARO®	42
CHAPITRE 4 Analyses statistiques des données		45
4.1	Analyses ANOVA sur l'erreur de profil de l'assemblage	45
4.1.1	Réponse des participants en fonction de la méthode FARO®.....	45
4.1.2	Réponse des participants en fonction de la méthode manuelle.....	46
4.1.3	Comparaison globale de la méthode FARO® vs la méthode manuelle — erreur de profil	47
4.2	Analyse des déviations géométriques des éléments cylindriques (tolérance de localisation).....	48
4.2.1	Réponse des opérateurs avec la méthode FARO®	48
4.2.2	Réponse des participants avec la méthode manuelle	49
4.2.3	Comparaison globale de la méthode FARO® vs la méthode manuelle - erreur de localisation.....	50
4.3	Analyse du temps d'assemblage	51
4.3.1	Temps d'assemblage avec la méthode manuelle	51
4.3.2	Temps d'assemblage avec la méthode FARO®	52
4.3.3	Comparaison temps d'assemblage.....	53
4.4	Résultats NASA TLX	54
4.4.1	Données NASA TLX - méthode manuelle	54
4.4.2	Données NASA TLX - FARO®	56
CHAPITRE 5 Discussion		59
5.1	Limite du protocole expérimental.....	59
5.1.1	Conditions de laboratoire éloignées de la réalité	59
5.1.2	Mesures imprécises ou non fiables	59
5.1.3	Opérations pour mesurer les positions des pièces avec le bras de mesure HEXAGON®.....	60
5.1.4	Manque de répétition	61
5.1.5	Posture du participant pendant l'assemblage.....	61
5.2	Comparaison des résultats avec la littérature.....	62
5.2.1	Méthode FARO® et méthode manuelle (éléments surfaciques et localisation).....	62
5.2.2	Qualité dimensionnelle de l'assemblage.....	63
5.2.3	Temps d'assemblage	64
5.2.4	Ressenti pendant l'assemblage	65
5.2.4.1	NASA TLX - méthode manuelle	65
5.2.4.2	NASA TLX - méthode FARO®	67
5.2.5	Conclusion	69
5.3	Discussion des résultats en fonction des connaissances de base	70
CONCLUSION.....		71

RECOMMANDATIONS	73
ANNEXE I Impact des systèmes d'assistance basés sur la projection pour améliorer la courbe d'apprentissage.....	75
ANNEXE II Analyse ergonomique d'un procédé d'assemblage	77
ANNEXE III Systèmes d'assistance numériques pour des personnes ayant des limitations fonctionnelles	79
ANNEXE IV Relation entre l'opérateur et l'interface du système d'assistance	81
ANNEXE V Systèmes de mesures en métrologie à grande échelle	83
ANNEXE VI Déviations méthode FARO vs méthode manuelle	85
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	97

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1-1	Systèmes d'assistance aux opérateurs présents dans la littérature4
Tableau 1-2	Tableau de comparaison lecture de plans vs réalité augmentée7
Tableau 2-1	Comparaison gabarits traditionnels vs projecteur FARO®.....18
Tableau 2-2	Présentation des pièces 3D imprimées19
Tableau 2-3	Hauteur idéale de travail.....22
Tableau 2-4	Hauteur des coudes en position debout22
Tableau 2-5	Variables à mesurer lors de l'expérimentation26
Tableau 2-6	Présentation des configurations27
Tableau 2-7	Méthodes de transmission des informations.....31
Tableau 2-8	Exemple de présentation des données31
Tableau 3-1	Participants de l'expérimentation38
Tableau 3-2	Exemple de déviations pour le participant P1 (localisation)38
Tableau 3-3	Exemple temps d'assemblage pour les deux méthodes.....40
Tableau 3-4	Résultats individuels NASA-TLX.....41
Tableau 3-5	Résultats globaux NASA-TLX/méthode manuelle42
Tableau 3-6	Résultats individuels NASA-TLX/FARO®43
Tableau 3-7	Résultats globaux NASA TLX - FARO®43
Tableau 4-1	Résultats globaux NASA-TLX/manuelle55
Tableau 4-2	Résultats globaux NASA-TLX - FARO®.....56

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Systèmes de mesure en métrologie 3D.....10
Figure 2.1	Diagramme PRISMA 2025 pour revue systématique16
Figure 2.2	Projecteur laser FARO®21
Figure 2.3	Bras de mesure Hexagon®21
Figure 2.4	Posture du participant24
Figure 2.5	Position des pièces sur la table avant l'assemblage.....29
Figure 2.6	Assemblage avec la méthode FARO®30
Figure 2.7	Assemblage avec la méthode manuelle.....30
Figure 2.8	Mesure de la déviation avec le bras Hexagon®32
Figure 2.9	P1CAD_2M -Entité géométrique 333
Figure 2.10	P1CAD_2M - Cylindre 1 et entité géométrique 133
Figure 2.11	P1CAD_2M - Entité géométrique 7 & 8 et cylindre 333
Figure 2.12	P3CAD_3M - Entité géométrique 6, 7, 8 et 934
Figure 4.1	Graphique des intervalles de la méthode FARO® en fonction des participants - erreurs de profil46
Figure 4.2	Graphique des intervalles de la méthode manuelle en fonction des participants erreurs de profil.....47
Figure 4.3	Graphique des intervalles de la méthode manuelle vs la méthode FARO® - erreurs de profil48
Figure 4.4	Graphique des intervalles de la méthode FARO® en fonction des participants - erreurs de localisation.....49
Figure 4.5	Graphique des intervalles de la méthode manuelle en fonction des participants - erreurs de localisation.....50
Figure 4.6	Comparaison de la méthode manuelle vs la méthode FARO® - erreurs de localisation.....51

Figure 4.7	Graphique des intervalles de la méthode manuelle et des participants52
Figure 4.8	Temps d'assemblage des participants avec la méthode FARO®.....53
Figure 4.9	Graphique des intervalles des temps d'assemblage de la méthode manuelle vs la méthode FARO®54
Figure 4.10	NASA TLX participant - méthode manuelle.....56
Figure 4.11	NASA TLX participant - FARO®57
Figure 5.1	Représentation de la répétabilité (gauche) et la reproductibilité (droite)61
Figure 5.2	Questionnaire NASA-TLX.....70

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AR	Augmented Reality
ETS	École de technologie supérieure
HF/E	Human Factors and Ergonomics
IOT	Internet Of Things
NASA - TLX	NASA Task Load Index

INTRODUCTION

L'assemblage et le désassemblage sont deux étapes cruciales dans le cycle de vie d'un produit ou d'un système. Par ailleurs, en ce qui concerne un produit, l'ergonomie et le génie des facteurs humains (HF/E), la qualité et le temps d'assemblage sont trois facteurs essentiels ayant un impact direct sur le coût de revient.

Assembler est l'action de mettre ensemble. Dans le cas des composants mécaniques, il s'agit, tout en respectant les impératifs des HF/E, de jumeler les bons composants à la bonne position. Il existe par ailleurs plusieurs types d'assemblage. À titre d'exemple, nous pouvons citer les assemblages de type mécano sans recours à d'autres artefacts, assemblage sur gabarits dédiés à cette tâche (très courant dans l'industrie aéronautique), etc. Par ailleurs, au niveau des laboratoires de l'ÉTS, on s'intéresse tout particulièrement aux assemblages complexes (différents composants).

La complexité d'un assemblage se manifeste à travers la nature des tâches à réaliser et les diverses exigences liées à cet assemblage (Nadeau 2025). On parle ici d'exigences cognitives telles que les capacités perceptives, visuelles et tactiles. Nous avons aussi des exigences décisionnelles incluant la facilité de construction mentale, le nombre d'options disponibles, la compatibilité spatiale et la qualité des rétroactions visuelles, tactiles et auditives. À cela s'ajoutent des contraintes liées à la manipulation, comme l'ergonomie, les limitations physiques et l'intégration de dispositifs de prévention tels que le poka-yoke, ainsi que des facteurs organisationnels influençant la réalisation des tâches (Nadeau, 2025).

Tout en étant étroitement liés, l'assemblage et le désassemblage présentent des spécificités qui nécessitent des modèles distincts. La diversité des approches et des paramètres, combinée à l'absence de consensus dans la littérature, met en évidence le caractère intrinsèquement multidimensionnel de la complexité en assemblage (Nadeau, 2025).

Le récent développement des technologies avancées, telles que la réalité augmentée, les systèmes de mesures 3D sans contacts et les systèmes de projection laser bousculent les paradigmes de production actuels en termes d'assemblage.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Le but de ce chapitre est de présenter une revue succincte de la littérature afférente aux systèmes d'assistance numérique. Elle nous permettra de recenser différents types de systèmes d'assistance numérique, tels que les systèmes de projections d'instructions, leurs caractéristiques et leurs spécificités. Elle nous permettra aussi de synthétiser ce qui est documenté dans la littérature sur les aspects ergonomiques du travail d'assemblage avec un système d'assistance numérique en général, le tout dans le but de mieux comprendre et d'évaluer l'efficacité et l'efficience du travail lors de l'utilisation d'un système d'assistance numérique par rapport à la méthode manuelle. Par ailleurs, on y découvre aussi différents processus de métrologie 3D permettant de vérifier et corriger l'erreur pendant un assemblage.

1.1 Revue de l'état de l'art des systèmes d'assistance numérique en fabrication et assemblage

L'environnement industriel devient de plus en plus complexe. Il est donc nécessaire de soutenir les opérateurs avec les technologies d'assistance disponibles afin de faire face à la diversité croissante des tâches de travail et à la complexité de la production industrielle (Mark, Rauch, & Matt, 2021).

Les systèmes d'assistance aux opérateurs sont définis comme des systèmes techniques qui assistent l'opérateur pendant les travaux de fabrication ou d'assemblage sans le remplacer, sans l'écarter et sans présenter de danger pour l'opérateur (Mark, B. G., Rauch, E., Matt, D.T 2021). L'un des principaux objectifs est d'accroître ou de soutenir les capacités existantes de l'opérateur ou en aplatissant la courbe d'apprentissage ou en réduisant l'impact des limitations fonctionnelles d'un travailleur.

Les systèmes d'assistance numériques peuvent être classés comme suit (Tableau 1.1) : systèmes de soutien sensoriel, de soutien physique et d'aide cognitive (Mark BG, Hofmayer S, Rauch E & Matt DT, 2019).

Tableau 1-1 Systèmes d'assistance aux opérateurs présents dans la littérature
Tirée et adaptée de Mark, B. G., Rauch, E., Matt, D.T (2021)

Système de soutien	Caractéristique	Système d'assistance	Explication
Sensorielles	Dispositif portable temporaire	Suivi oculaire	Technologie de mesure du point de regard ou du mouvement d'un œil par rapport à la tête.
		Capteur physiologique — réponse galvanique de la peau (gsr)	Mesure un changement de la résistance électrique de la peau causé par le stress émotionnel.
		Capteur physiologique — fréquence cardiaque (hr)	Mesure la vitesse des battements cardiaques en nombre de battements par minute.
		Suivi intelligent des mains	Système utilisant deux caméras de profondeur pour suivre les mouvements des mains du travailleur sur le lieu de travail.
	Caméra/traceur	Caméra rgb	Caméra équipée d'un capteur CMOS standard à travers lequel des images colorées sont acquises.
		Traceur de mouvement	Aide à suivre le mouvement des participants humains pour un traitement ultérieur.
		Caméra infrarouge	Système utilisé pour reconnaître l'opérateur afin d'exprimer son intention, par exemple par des gestes de la main.
		Détection de mouvement (ex. Kinect)	Kinect est une gamme de dispositifs de détection de mouvement produits par Microsoft qui sont souvent utilisés pour la capture de mouvement et la reconnaissance de gestes.
		Système de suivi de position	Système qui détecte la position d'objets (ex. une perceuse) qui sont équipés du système de suivi.
		Montre intelligente	Montre intelligente industrielle pouvant être utilisée pour différents types d'applications, par exemple, l'assemblage ou la maintenance.
		Traceur portable	Dispositifs pouvant mesurer des indicateurs de santé et d'autres données personnelles.
Physiques	Dispositif portable permanent	Gant haptique	Gants avec des capteurs (par exemple, de force) et des actionneurs ainsi que des moteurs de vibration pour mesurer la force de préhension et fournir un retour haptique.
		Vêtements intelligents	Vêtements intelligents avec un capteur de pression et une évaluation ergonomique de la santé de l'opérateur.
		Dispositif de vibration portable	Dispositif capable de recevoir des signaux d'erreur de systèmes techniques (via Bluetooth par exemple) et de les transférer sous forme de stimuli vibratoires au bras de l'opérateur.
	Exosquelette	Exosquelette actif/passif	Soutien actif ou passif pour le transport et la levée.
		Support de bras	Différentes structures/mécanismes de soutien pour la musculature du bras.
		Support de jambe	Différentes structures/mécanismes de soutien pour la musculature de la jambe.
		Support de dos	Différentes structures/mécanismes de soutien pour la musculature du dos.
		Robot assistance à l'assemblage flexible	Robot avec une grande précision et flexibilité pour une automatisation collaborative.

Système de soutien	Caractéristique	Système d'assistance	Explication
	Robot	Robots\automates	Système technique pour des solutions mécanisées pour des applications dans l'industrie
		Système d'assistance robotique avec caméra tof	Système basé sur un capteur tof (time-of-flight) qui livre des informations en temps réel.
		Robot collaboratif	Système également connu sous le nom de « cobot » qui est capable d'apprendre diverses tâches pour aider l'humain.
	Aide au levage/maintien	Télémanipulateur/équilibreur/aide au levage	Système utilisé pour transporter des pièces entre les postes de travail.
		Aide au levage/maintien portable	Système passif portable avec une machine à percer incluant un dispositif pour la compensation de niveau.
Cognitif	Lieu de travail	Manuel ergonomique	Le lieu de travail manuel ergonomique peut être considéré comme une agrégation de différentes technologies pour améliorer l'ergonomie, par exemple, par une table de travail réglable en hauteur, une lumière vive et un espace suffisant pour s'adapter à l'employé.
	Dispositif monté sur la tête	Réalité augmentée (AR)	Système technique qui superpose un contenu généré par ordinateur sur l'utilisateur et son environnement réel.
		Réalité virtuelle (VR)	Système technique qui simule des expériences qui peuvent être similaires ou différentes de la réalité.
		Réalité mixte (MR)	Système technique qui fusionne le réel et le virtuel pour créer des environnements interactifs.
		Affichage monté sur la tête (hmd)	Terme général pour un dispositif d'affichage porté comme un casque ou directement sur la tête.
	Dispositif portable	Tablette	Dispositif numérique qui peut être utilisé pour montrer des manuels d'instruction dans le cadre de la fabrication industrielle.
		Ordinateur portable	Système technique qui peut être combiné avec d'autres systèmes pour soutenir le travailleur dans la fabrication.
		Smartphone	Dispositif pouvant être utilisé dans la fabrication pour montrer des manuels d'instruction et recevoir des notifications.
		Gant de numérisation intelligent	Système qui combine un gant, un smartphone et Bluetooth pour soutenir les travailleurs pendant leur travail.
	Système de projection	Système d'assistance basé sur la projection	Système technique qui projette, par exemple, des manuels d'instruction sur le lieu de travail.
		Projection in situ	Terme qui décrit la projection d'informations directement dans la zone d'interaction et in situ.
		Système de projection laser	Un projecteur laser est un dispositif qui projette des images pour aider le travailleur dans ses tâches pendant la production.
	Instructions assistées par ordinateur (iao)	Instructions assistées par ordinateur (iao)	Dispositif informatique combiné à un moniteur pour afficher par exemple des manuels d'instructions.
	Outils de support visuel	Projecteur	Système technique utilisé pour projeter des informations sur un objet ou l'espace de travail de l'opérateur.
		Moniteur	Différentes technologies de moniteurs (LED, TFT, etc.) combinées avec

Système de soutien	Caractéristique	Système d'assistance	Explication
			d'autres systèmes pour présenter des informations utiles au travailleur.
	Instruction picturale	Instruction picturale	Façon indépendante de la langue de fournir des instructions qui peuvent être facilement comprises.
	Logiciel	Contrôle vocal	Un contrôle vocal peut être individuellement adapté à l'utilisateur et à l'environnement de travail industriel.
		Système informatique visuel	Les technologies informatiques visuelles peuvent améliorer l'interaction de la machine humaine dans la production intelligente
		Agent d'intelligence artificielle ou logiciel qui aide l'opérateur lors de l'interaction avec des ordinateurs ou des machines.	Intelligence artificielle ou agent logiciel qui aide l'opérateur lors de l'interaction avec des ordinateurs ou des machines.

Dans ce mémoire, nous nous focaliserons principalement sur les systèmes de projection laser dans le cadre d'un assemblage sans gabarit.

1.2 Systèmes de réalité augmentée dans le cadre d'un assemblage

Les systèmes d'assistance ont un potentiel de support aux opérateurs pour les diverses tâches d'assemblage, par exemple, la préfabrication de masse personnalisée ou les objets doivent être sélectionnés correctement et positionnés avec précision (B. Bartuska & Teischinger, 2022).

Une étude effectuée par Bartuska et Teischinger (B. Bartuska & Teischinger, 2022) avec 21 participants a permis d'évaluer deux méthodes d'assemblage, l'une avec « lecture de plans » et l'autre avec un « système de réalité augmentée ». Cette étude a permis de faire différentes observations qui sont résumées dans le Tableau 1.2.

Tableau 1-2 Tableau de comparaison lecture de plans vs réalité augmentée

Adaptée de B. Bartuska & Teischinger, (2022)

	Lecture de plans	Réalité augmentée	t-test	Résultat
Temps assemblage moyen	67 min 13 s [± 11 min]	35 min 40 s [± 20 min]	$p \leq 0.001$	Significatif
Temps réalisation tâches 1... 4 sauf tâche 2	lente	rapide		Significatif
Nombre d'erreurs	3,7 ± 2,0	3,5 ± 1,4	$p \leq 0.77$	Pas significatif
Temps assemblage participants (es) sans expériences (groupe 1)	84 min 52 s	43 min 52 s		Significatif
Erreurs participants (es) sans expérience (groupe 1)	3,5	2,5		Significatif
Charge de travail ressentie (TLX)	297 ± 54	239 ± 46	$p \leq 0.016$	Significatif

Dans le cadre de l'expérimentation, deux types de méthodes ont été utilisés pour assembler une maison préfabriquée en bois. L'une par lecture de plans conventionnels et l'autre en utilisant un système de réalité augmentée projetée. Le système de projection spatiale utilisé est le ViewSonic Pro 8800 WUL DLP Video projector. 21 participants(es), dont cinq femmes et 16 hommes, ont été recrutés parmi les élèves et les employés de l'institut de recherche. La moyenne d'âge des participants était de 34,8 ans et l'âge des participants était compris entre 22 ans minimum et 62 ans maximum. Suivant l'évaluation de leur niveau de connaissances en construction ou en lecture de plans, les participants ont été divisés en trois groupes : groupe 1 (aucune expérience), groupe 2 (certaines expériences — étudiants en construction) et groupe 3 (experts — charpentier professionnel). L'assemblage des éléments préfabriqués du mur a été réalisé en tâches séquentielles qui sont :

- **Tâche 1** : Positionner le bois de la charpente ;
- **Tâche 2** : Positionner, couper et fixer la barrière de vapeur ;
- **Tâche 3a** : Positionner les plaques de plâtre ;
- **Tâche 3b** : Fixer les plaques de plâtre ;
- **Tâche 4a** : Perçage de trous pour la plomberie et l'électricité ;
- **Tâche 4b** : Positionner une extrusion d'aluminium.

Le Tableau 1.2 nous présente le comparatif entre l'assemblage par lecture de plans et l'assemblage par projection d'instructions pour les participants du groupe 1.

Par ailleurs, les tâches 3 b et 4a présentent des différences de temps assez importantes du fait des travaux de marquage manuel à faire pour les clous et trous avec le processus de lecture de plans. Ces résultats supportent la position de (Uva et al. 2018) qui dit qu'un système de réalité augmentée est plus avantageux pour les tâches complexes. Par ailleurs, l'article de Yilmas et Gotkas (2023) permet de montrer que les applications de réalité augmentée (RA) ont un impact positif sur les utilisateurs et leurs performances.

En ce qui concerne les participants avec expérience (groupe 3), le nombre d'erreurs en utilisant un système de réalité augmentée est légèrement supérieur à celle des participants sans expérience (groupe 1). En effet, du fait de leur expérience, ils sont très confiants, ils travaillent plus vite et prêtent moins attention aux instructions d'assemblage.

On constate aussi que le manque d'expérience n'est plus un enjeu majeur quand il s'agit d'assemblage avec projection des instructions pour les opérateurs d'assemblage sans expérience (groupe 1), car le nombre d'erreurs est réduit en utilisant une assistance numérique. Dans le cadre de ce projet, cette étude est cruciale, car elle permet de comprendre comment utiliser avec efficacité un système d'assemblage par projections d'instructions.

1.3 Relation entre l'opérateur d'assemblage et l'interface du système d'assistance

Dans le cadre de notre projet, l'humain joue un rôle prépondérant, même si l'assemblage est effectué avec un système d'assistance numérique. Il est important de comprendre comment améliorer la relation entre ces deux entités. Par ailleurs, pour favoriser une bonne coopération entre le système et l'humain, il faudra adapter le système à l'humain. Nous présentons dans l'ANNEXE IV plusieurs solutions pour améliorer la relation entre l'opérateur et le système d'assistance numérique.

1.4 Systèmes de métrologie 3D utilisés pour l'assemblage à grande échelle

Les opérations d'assemblage à grande échelle présentent un défi, car les entreprises doivent continuellement innover, tout en livrant des produits volumineux, complexes, hautement personnalisés et coûteux à leurs clients (Maropoulos et Zhang, 2007). En effet, le contrôle de la qualité, les coûts de fabrication et de la livraison ainsi que la gestion des risques associés à ces activités sont essentiels à la compétitivité de ces entreprises. Pour y arriver, les entreprises ont besoin du déploiement parallèle et synchrone de diverses technologies d'ingénierie assistée par ordinateur « Computer-Aided Engineering - CAE ».

La technologie d'entreprise numérique « Digital Enterprise Technology - DET » représente une synthèse de nouvelles technologies pour la gestion globale du cycle de vie des produits (Maropoulos, 2003). Les entreprises peuvent tirer parti des récents progrès technologiques en matière de modélisation de produits, de planification de processus agrégés, de simulation, de logiciels de gestion des flux de travail et de métrologie 3D sans contact pour développer et gérer de nouveaux processus dans un cadre cohérent. Le DET comporte cinq domaines principaux techniques (Maropoulos et Zhang, 2007) :

- la conception du produit ;
- la conception des processus ;
- la conception des usines (ou les chaînes d'assemblage) ;
- les technologies assurant la conformité des produits et des processus ;
- la gestion des ressources, qu'elles soient numériques ou physiques (ex. artefacts, équipements, etc.), et leur intégration avec les systèmes à l'échelle de l'entreprise pour s'assurer de la disponibilité, de l'information et de la traçabilité.

1.5 État de l'art des systèmes de mesure en métrologie 3D à grande échelle

Plusieurs systèmes peuvent être utilisés dans un contexte d'assemblage assisté par la métrologie. Selon l'état de l'art (Figure 1.1), il existe deux familles systèmes de mesure en métrologie 3D qui sont : cinématique en série et systèmes optiques. Ces deux familles sont divisées en catégories qui sont :

- Les systèmes cartésiens : MMT (Machine à Mesurer Tridimensionnelle), machine-outil
- Les systèmes polaires : bras de mesure
- Les systèmes à coordonnées sphériques : tracker laser, radar laser, tachymètre, numériseur laser
- Les systèmes de multilatération : tracker laser, traceur laser
- Les systèmes de multi-angulation : théodolite, iGPS, Photogrammétrie

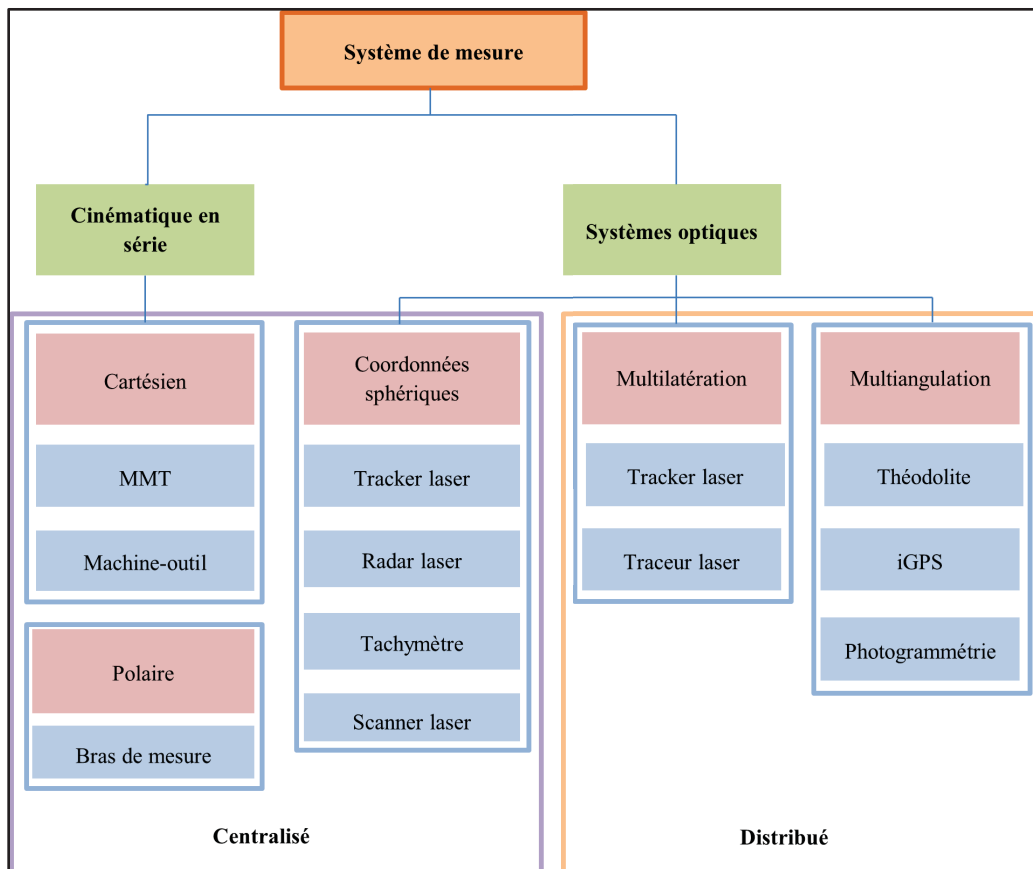


Figure 1.1 Systèmes de mesure en métrologie 3D
Tirée et adaptée de Maisano et Maropoulos (2009)

Dans le cadre de l'étude de (Yue Wang et Shusheng Zhang, 2018), les auteurs ont proposé d'utiliser un bras de mesure pour les besoins de validation métrologique (critère qualité). Pour améliorer l'applicabilité et la robustesse du processus de suivi tridimensionnel d'un système de guidage d'assemblage assisté par réalité augmentée, un processus de suivi basé sur la combinaison du nuage de points (capté par le robot de mesure) et de la caractéristique visuelle

est proposé. Tout d'abord, le système de coordonnées du banc d'essai de suivi est défini à l'aide d'un nuage de points du modèle de référence pour déterminer la position de l'assemblage virtuel guidant les informations. Ensuite, un algorithme de suivi de caméra combinant la correspondance visuelle des caractéristiques et l'alignement des nuages de points est mis en œuvre. Pour obtenir suffisamment de points d'appariement des caractéristiques visuelles dans un environnement d'assemblage sans texture, une nouvelle stratégie de correspondance des caractéristiques basée sur la cohérence des vecteurs de direction est présentée (Yue Wang et Shusheng Zhang, 2018).

Durant la phase hors ligne, le nuage de points du modèle de référence est généré par son modèle CAO. Dans la phase en ligne, la relation de transformation entre le nuage de points du modèle de référence et le nuage de points de l'environnement d'assemblage est calculée à l'aide d'un processus d'enregistrement basé sur ICP (*Internet Cache Protocol*). De cette façon, le système de référence des coordonnées est défini. Ensuite, un enregistrement d'image consécutif basé sur le nuage de points et les caractéristiques visuelles est exécuté pour estimer la position de la caméra dans le processus de mouvement, puis les fermetures en boucle sont mises en œuvre en faisant correspondre l'image par rapport à un sous-ensemble d'images précédemment recueillies pour optimiser la position estimée. Enfin, les informations de guidage virtuel sont superposées à l'environnement d'assemblage en fonction du résultat du suivi.

1.6 Question de recherche

La revue de la littérature a permis d'étudier les différents systèmes d'assistance numériques et différents systèmes de métrologie 3D permettant de vérifier la localisation et la position in situ dans le cadre d'un assemblage.

Ce projet porte spécifiquement sur une étude comparative approfondie sur la mise en œuvre de deux méthodes durant un assemblage, l'une avec la méthode FARO® et l'autre avec la méthode manuelle.

Les objectifs spécifiques dans le cadre de ce projet se présentent comme suit :

Objectif spécifique 1 : présenter les systèmes d'assistance numérique par projection laser pour un procédé d'assemblage.

Objectif spécifique 2 : expérimenter avec des participants humains l'utilisation du système de projection d'instructions FARO® et de la méthode manuelle pour l'assemblage basée sur des mesures dimensionnelles.

Objectif spécifique 3 : vérifier l'erreur d'assemblage (erreur de positionnement : localisation et orientation) dans différentes configurations à l'aide du bras de mesure HEXAGON®

Dans le protocole d'expérimentation, différents processus seront explorés pour l'assemblage :

- Assembler la configuration avec la méthode de projection d'instructions FARO® ;
- Assembler la configuration avec la méthode manuelle (lecture de plans PDF et mesurage avec mètre à mesurer) ;
- Validation de la position spatiale (critère qualité) via un système de suivi de cibles par le bras de mesure HEXAGON®.

Nous montrons les avantages et les inconvénients de chaque type de support à l'humain en prenant en compte la qualité, le temps et le ressenti :

- La performance de l'installateur à maintenir des requis dimensionnels (critère qualité) en termes d'erreur de positionnement (localisation et orientation) des pièces assemblées.
- Les postures pendant les assemblages sont filmées, mais pas étudiées. Seul le temps (critère de productivité) des caméras (GO-PRO®) est utilisé ;
- Le ressenti des travailleurs recueille via NASA-TLX après utilisation de chaque méthode d'assemblage, ce qui permettra de mesurer la perception de la charge mentale, physique, les exigences temporelles, les frustrations, la performance et l'effort ;

La question de recherche que nous examinons dans le cadre de ce projet de recherche est la suivante : « Dans quelle mesure, une méthode d'assemblage basée sur la projection d'instructions peut-elle améliorer la qualité, le temps d'assemblage et la charge de travail ressentie des utilisateurs lors de tâches d'assemblage ? »

Pour répondre à cette question de recherche, nous avons adopté la méthodologie présentée au CHAPITRE 2.

1.7 Hypothèses retenues

Dans le cadre de notre projet, différentes hypothèses ont été posées. Il s'agit entre autres :

- Les configurations et les caractéristiques à contrôler (erreurs de positionnement : localisation et orientation) sont identiques pour les deux méthodes (FARO®, manuelle).
- Le temps maximum alloué pour la tâche d'assemblage est identique pour les deux méthodes (FARO®, manuelle).
- La charge de travail ressentie est considérée comme similaire pour les deux méthodes (FARO®, manuelle).

1.8 Conclusion

En conclusion, le CHAPITRE 1 a présenté un aperçu de l'état de l'art concernant les systèmes d'assistance numérique pour l'assemblage 3D. Nous avons abordé différents types de système d'assistance numérique, tel que les systèmes sensoriels, physiques et cognitifs. Ensuite, nous avons aussi examiné les systèmes d'assistance numérique pour l'assemblage, en nous concentrant spécifiquement sur les systèmes cognitifs, tels que la réalité augmentée ou les systèmes de projection qui seront utilisés dans ce projet.

Ceci nous a permis de présenter les objectifs spécifiques liés à ce projet et la question de recherche du projet. Pour finir, des hypothèses de recherche ont été émises en vue du traitement des données.

CHAPITRE 2

OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente l'objectif de notre étude et décrit la méthodologie utilisée pour l'atteindre. Il décrit par ailleurs les méthodes de cueillette des données (protocole expérimental) ainsi que les méthodes adoptées pour le traitement des données recueillies. Enfin, il présente la méthode utilisée pour tester la validité des résultats au terme de l'étude.

2.1 Approche méthodologique : revue systématique (diagramme de flux PRISMA)

Dans le cadre du projet, nous avons réalisé une revue systématique en utilisant la méthode PRISMA. Le diagramme de flux PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) est un outil visuel servant à documenter et présenter de manière transparente les étapes d'une revue systématique, depuis l'identification des sources initiales jusqu'à l'inclusion finale des études.

Cette approche permet de détailler le nombre d'articles identifiés, exclus et retenus, en précisant les raisons des exclusions, tout en permettant d'adopter des modèles adaptés selon le type de revue et les sources utilisées. Ce diagramme assure ainsi la rigueur, la transparence et la reproductibilité du processus (Figure 2.1). Dans un premier temps, plusieurs articles en anglais ont été recherchés sur différentes bases de données, telles que ScienceDirect et Google Scholar, en utilisant les mots clés suivants : assemblage complexe, assemblage assisté, système de projection, instructions, réalité augmentée, assemblage sans gabarit, industrie 4.0, assemblage mécanique. Par la suite, les articles doublons ou qui s'éloignaient de notre sujet de recherche ont été abandonnés.

La couverture de la littérature pertinente en anglais a été maximisée grâce à « l'effet boule de neige ». Cette approche consiste, à partir d'un nombre restreint de publications clés identifiées lors d'une recherche initiale, à explorer les références citées dans ces documents pour repérer d'autres sources pertinentes. Chaque nouvelle source consultée devient à son tour un point de

départ pour élargir le référentiel documentaire, créant ainsi une dynamique cumulative de repérage.

Par ailleurs, les articles pertinents dans le domaine ne sont pas facilement accessibles en français. Les travaux publiés au cours de la période 2015-2025 ont été privilégiés, cependant, certaines publications pertinentes et intéressantes d'années antérieures ont été également incluses.

Cette recherche nous a permis de sélectionner les articles nécessaires dans le cadre de cette étude. Bien que la revue de littérature se focalise principalement sur deux sources, une exploration plus approfondie aurait été pertinente afin d'enrichir la compréhension des systèmes d'assistance numérique et de situer davantage la recherche dans son contexte théorique.

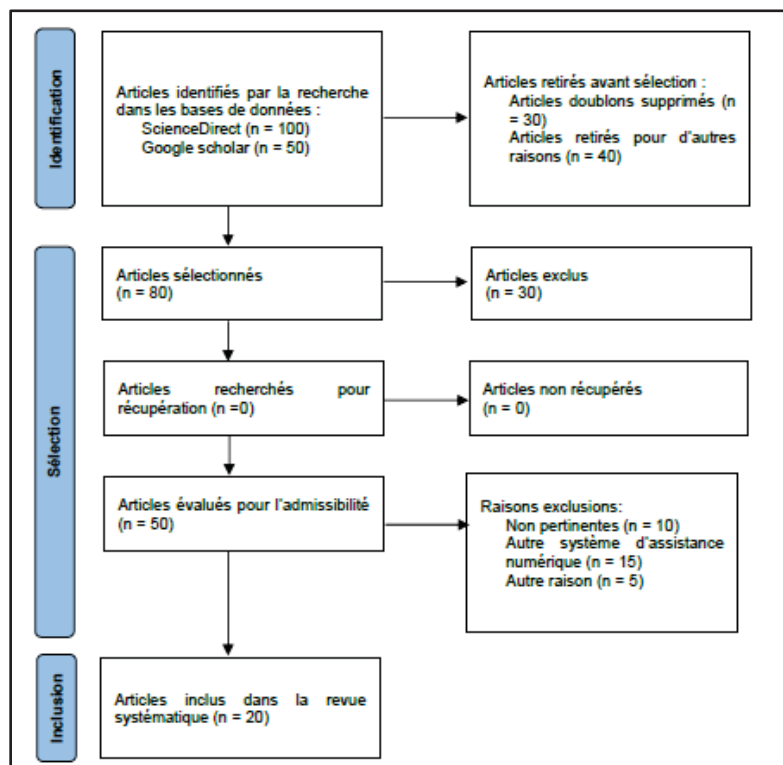


Figure 2.1 Diagramme PRISMA 2025 pour revue systématique
Tirée et adaptée de Mark, Rauch, et Matt (2022)

2.2 Justification du choix technologique et comparaison avec les gabarits traditionnels

Ce mémoire s'appuie sur l'utilisation d'un système d'assemblage assisté par projection, en particulier le projecteur d'instructions FARO®, comme solution innovante pour guider les opérateurs dans les tâches d'assemblage. Ce choix repose sur une volonté d'explorer des technologies compatibles avec les exigences de flexibilité, de traçabilité et d'ergonomie propres à l'industrie 4.0.

Les gabarits traditionnels sont des dispositifs physiques conçus pour guider le positionnement ou l'assemblage de pièces. Leur efficacité dans les environnements de production en grande série est bien documentée (Zhou et al., 2018), notamment en raison de leur simplicité, de leur robustesse et de leur faible coût d'exploitation. Cependant, leur rigidité structurelle limite leur adaptabilité dans des contextes de production à forte variabilité ou à personnalisation élevée. De plus, leur encombrement peut nuire à l'ergonomie des postes de travail et ralentir les cycles de production en cas de reconfiguration (Lee et al., 2020).

À l'inverse, les systèmes de projection comme ceux proposés par FARO® permettent de projeter des instructions visuelles directement sur la surface de travail, créant ainsi des gabarits virtuels dynamiques. Cette technologie offre une grande souplesse d'utilisation, une réduction significative des erreurs humaines, et une meilleure traçabilité des opérations. Selon une étude de Müller et al. (2021), l'assemblage assisté par projection permet une réduction moyenne de 30 % du temps de cycle et une diminution de 40 % des erreurs de positionnement par rapport aux méthodes conventionnelles. Ces résultats sont corroborés par les travaux de Kim et Park (2019), qui soulignent l'impact positif de la projection interactive sur la charge cognitive des opérateurs et sur la qualité du produit final.

La comparaison entre les deux approches (Tableau 2-1) met en évidence les avantages spécifiques de la projection assistée

Tableau 2-1 Comparaison gabarits traditionnels vs projecteur FARO®

Adapté de Muller et al. (2021)

Critère	Gabarits traditionnels	Projecteur FARO®
Coût d'installation	Faible	Élevé
Flexibilité	Faible	Très élevée
Temps de reconfiguration	Long	Court
Précision	Moyenne à élevée	Élevée
Ergonomie	Variable	Optimisée
Traçabilité	Faible	Forte

Ainsi, bien que les gabarits conservent leur pertinence dans des contextes de production standardisée, leur utilisation devient moins optimale dans des environnements industriels modernes où la réactivité et la personnalisation sont essentielles. Le choix de ne pas traiter les gabarits en profondeur dans ce mémoire repose donc sur leur inadéquation avec les objectifs de flexibilité et d'adaptabilité visés par cette étude. La méthode par projection est ici considérée comme plus représentative des évolutions technologiques actuelles et des besoins industriels émergents.

2.3 Cadre de l'étude

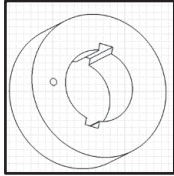
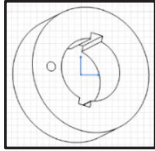
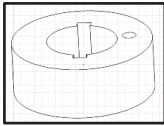
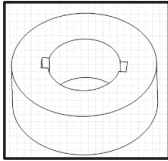
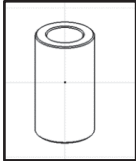
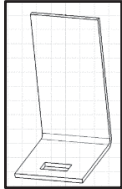
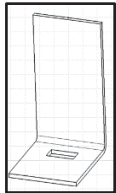
La présente étude a été initiée pour comparer l'impact de l'utilisation d'un système de projections laser pour l'assemblage par rapport à l'utilisation de plans 2D traditionnels. L'expérience a eu lieu dans le laboratoire de métrologie. Le poste d'assemblage dans le cadre de l'expérimentation est composé des équipements suivants :

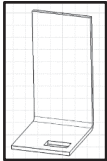
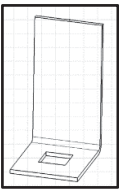
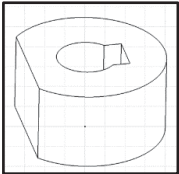
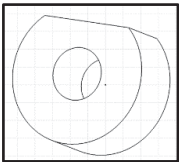
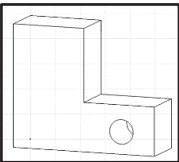
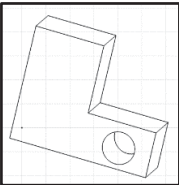
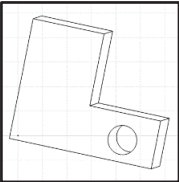
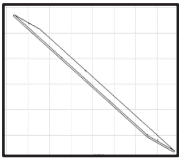
2.3.1 Pièces multiformes 3D imprimées

Les pièces sont de différentes formes géométriques (semblables à l'intérieur de la même catégorie). Nous présentons les différentes pièces de l'expérimentation dans le Tableau 2-2. Pour la conception des pièces, nous avons retenu le degré de symétrie lors de l'insertion : angle alpha (angle de rotation du composant autour d'un perpendiculaire à son axe d'insertion) et

l'angle bêta (angle de rotation autour du composant autour de son axe d'insertion) (Poli, 2011), les dimensions et le poids.

Tableau 2-2 Présentation des pièces 3D imprimées

Numéro pièce	Description de la pièce	Image	α	β	$\alpha + \beta$	Taille (mm)	Épaisseur (mm)	Poids (kg)
1	Cylindre avec épaisseur de 20 mm avec trou de 10 mm		180°	0°	180°	20	20	0.006
2	Cylindre avec épaisseur de 20 mm avec trou de 15 mm		180°	0°	180°	20	20	0.013
3	Cylindre avec épaisseur de 20 mm avec trou de 20 mm		180°	0°	180°	20	20	0.024
4	Cylindre avec épaisseur de 20 mm et double rainure		180°	0°	180°	20	20	0.038
5	Long cylindre		180°	0°	180°	20	20	0.0004
6	Tôle pliée 1		180°	180°	360°	93.8	3	0.004
7	Tôle pliée 2		180°	180°	360°	93.8	3	0.004

Numéro pièce	Description de la pièce	Image	α	β	$\alpha + \beta$	Taille (mm)	Épaisseur (mm)	Poids (kg)
8	Tôle pliée 3		180°	180°	360°	93.8	3	0.004
9	Tôle pliée 4		180°	180°	360°	93.8	3	0.008
10	Cylindre avec méplat et rainure interne		180°	0°	180°	20	20	0.038
11	Cylindre avec méplat		180°	0°	180°	20	20	0.077
12	Forme en L avec trou de 10 mm		180°	180°	360°	50	20	0.042
13	Forme en L avec trou de 12 mm		180°	180°	360°	50	20	0.042
14	Forme en L avec trou de 14 mm		180°	180°	360°	50	20	0.042
15	Plan d'assemblage en acrylique (20'' x 32 »)		180°	180°	360°	813	6.35	2.623

2.3.2 Un projecteur laser FARO®

Le projecteur laser FARO® (Figure 2.2) permet de projeter les empreintes des pièces 3D dans un plan d'assemblage et toute autre information (ex. des instructions, flèches, etc.). Ceci permettra au participant de faire une tâche du type « *Pick and Place* ».



Figure 2.2 Projecteur laser FARO®

2.3.3 Un bras de mesure HEXAGON®

Un bras de mesure Hexagon® (Figure 2.3) sera utilisé pour mesurer la position des pièces 3D une fois assemblée. Une comparaison sera faite avec les positions (localisations et orientations) obtenues par rapport à celles exigées sur les fichiers CAD.



Figure 2.3 Bras de mesure Hexagon®

2.4 Position du participant pendant l'assemblage

Durant l'expérimentation, les participants sont libres d'adopter la posture qui leur convient pendant les assemblages (Figure 2.4). Les participants ont réalisé des tâches manuelles pour réaliser les configurations spatiales. Les tâches manuelles (Tableau 2-3) sont classées selon le niveau de précision et d'effort (Grandjean et Kroemer, 1997).

Tableau 2-3 Hauteur idéale de travail
Tirée et adaptée Grandjean et Kroemer, 1997

Type de tâches	Hauteur idéale par rapport au coude	Exemple
Travail de précision	+5 à +10 cm au-dessus du coude	soudure fine, électronique
Travail léger (assemblage)	~au niveau du coude	vissage, collage
Travail de force	10 à 15 cm en dessous du coude	martelage, serrage

Dans notre cas, il s'agira de tâches d'assemblage manuel léger et du travail de précision pour l'orientation des pièces. Un travail de précision est une activité ou une tâche qui exige un haut niveau d'exactitude, de rigueur et de contrôle dans l'exécution. Il implique souvent des tolérances très faibles, des mesures minutieuses, et une attention soutenue aux détails, que ce soit dans un contexte technique, scientifique, artisanal ou industriel.

Nous allons alors prioriser le travail léger, car les tâches considérées comme travail de précision, tel que la soudure fine, électrique n'ont pas été réalisées dans notre étude. Ce qui équivaut à :

$$\text{Hauteur idéale} \approx \text{hauteur du coude debout}$$

2.4.1 Données anthropométriques pertinentes (position debout)

Selon les Human Scales Tables (Tableau 2-4), la mesure cruciale est la hauteur des coudes en position debout :

Tableau 2-4 Hauteur des coudes en position debout

Percentile	Hauteur des coudes en position debout
5e (petite femme)	~ 91 cm
50e (moyenne)	~ 102 cm
95e (grand homme)	~ 116 cm

2.4.2 Hauteur idéale d'une surface de travail debout

Selon les recommandations ergonomiques (NIOSH, OSHA, ISO 9241), pour une tâche de précision modérée (comme taper sur un clavier ou manipuler des objets légers) : la hauteur idéale de la surface de travail est alignée ou légèrement en dessous de la hauteur des coudes.

Autrement dit :

- Pour un utilisateur du 5^e percentile, hauteur de travail optimale \approx **91 cm**
- Pour un utilisateur du 95^e percentile, \approx **116 cm**

Cela représente une plage de variation de **25 cm**.

2.4.3 Problème d'une table debout non ajustable

Une table de travail debout standard fixe a généralement une hauteur de \sim 102 à 110 cm (dans les bureaux, bibliothèques, etc.).

Pour les personnes au 5^e percentile (\approx 91 cm)

- La table est trop haute de 10 à 20 cm
- Elles devront hausser les épaules, plier les poignets ou s'éloigner du plan de travail
- **Résultat** : inconfort musculaire, fatigue, troubles musculosquelettiques

Pour les personnes au 95^e percentile (\approx 116 cm)

- Une table de 102 – 110 cm est trop basse
- Ils devront se pencher, arrondir le dos, ou plier les genoux
- **Résultat** : mauvaise posture, douleurs lombaires

2.4.4 Conclusion

La hauteur idéale du plan de travail debout varie entre **90 cm à \sim 116 cm** pour couvrir **90 à 95 %** de la population nord-américaine.

La table d'assemblage dans le cadre du projet a une seule hauteur (**98 cm**). Elle ne peut donc pas convenir à la majorité des utilisateurs sans provoquer :

- Une flexion sagittale du tronc pendant l'assemblage ;
- Une sollicitation de la ceinture scapulaire qui n'est maintenue d'aucune façon ;
- Un risque de diminution de la précision et de la performance.



Figure 2.4 Posture du participant

2.4.5 Solutions ergonomiques possibles

La table d'assemblage n'étant pas adaptée pour un assemblage debout, les solutions ergonomiques possibles sont :

- **Surélever la surface de travail** (avec un plan intermédiaire, un tapis antidérapant, un support) ;
- **Adapter la tâche en position assise** (si elle ne demande pas trop de mouvement ou de force) ;
- **Utiliser une table ajustable en hauteur** (manuel ou électrique) ;
- **Fournir un tapis anti-fatigue** si le participant travaille debout et fixe.

2.5 Participants sans limitations fonctionnelles

Dans le cadre de ce projet, les participants ont subi le questionnaire de forme physique (2022 Par-Q+/2022Q-AAP+) pour une préparation à l'activité physique. Les personnes admissibles à l'expérience ont passé avec succès le test de forme physique 2022 Par-Q+/2022Q-AAP+.

2.6 Variables choisies pour l'expérimentation

Dans le cadre de l'expérimentation avec participants humains, quatre variables ont été choisies (Tableau 2-5). Il s'agit en l'occurrence des variables ci-dessous :

- **la méthode d'assistance** (variable indépendante),
- **la qualité de l'assemblage** (variable dépendante),
- **le temps d'assemblage** (variable dépendante),
- **le ressenti des participants** (variable dépendante).

En ce qui concerne **la qualité de l'assemblage**, il s'agit de vérifier l'erreur de positionnement (localisation et orientation) en millimètres et l'erreur en termes de choix de pièces. Les positions finales des pièces 3D seront recueillies par le bras de mesure HEXAGON® et, pour finir, une analyse statistique ANOVA nous permettra de comparer la qualité de l'assemblage dans le cadre des deux méthodes.

Les pièces ont été disposées de manière identique d'une séance de mesure à l'autre autour du plan de projection, comme illustré à la Figure 2.5. Les quatre plus gros cylindres creux (trois rouges et un bleu) étaient alignés en rangée, accompagnés des pièces de plus petites tailles (rouges et noirs) organisées selon une logique spatiale constante. Cette disposition a été choisie pour garantir une accessibilité équivalente à tous les composants indépendamment de la méthode utilisée. Les pièces étaient positionnées à égale distance du participant, sans hiérarchie visuelle ou fonctionnelle, afin de neutraliser l'impact du temps de recherche visuelle sur les performances mesurées.

Il est important de noter que le système FARO® n'a pas été utilisé pour assister le choix des pièces. Dans les deux conditions expérimentales (manuelle et FARO®), les participants devaient identifier et sélectionner eux-mêmes les pièces à assembler. Cette décision méthodologique vise à isoler l'effet de la projection sur le guidage spatial (positionnement) sans introduire de biais liés à une assistance au tri ou à la reconnaissance des composants. Ainsi, les conditions de sélection des pièces étaient strictement identiques, ce qui permet une comparaison équitable du temps de réaction et de la performance globale.

Aussi, en ce qui concerne **le temps d'assemblage**, il s'agira de mesurer l'efficacité de l'assemblage pendant les deux méthodes en recueillant le temps final (minutes). L'analyse

statistique ANOVA nous permettra alors de comparer l'efficacité de l'assemblage dans le cadre des deux méthodes.

Finalement, le **ressenti des participants** (charge de travail) pendant les assemblages avec les deux méthodes sera recueilli avec le formulaire NASA-TLX et traitée avec la méthode NASA-TLX.

Tableau 2-5 Variables à mesurer lors de l'expérimentation

Variable		Type de variable	Concept à mesurer	Unités de mesure	Processus de mesure	Type de test
Méthode d'assistance	FARO®	Indépendantes	-	Attribut	-	-
	Manuelle					
Temps d'assemblage		Dépendante	Efficacité	Minutes	Temps final de l'expérimentation par la caméra Go Pro	ANOVA sur l'influence de la méthode d'assistance
Ressenti des participants		Dépendante	Charge de travail	Ressenti	NASA-TLX (à la fin de chaque système)	NASA-TLX
Qualité		Dépendante	Erreur de position, d'orientation, choix de pièces	Erreur (mm)	Comparaison des positions obtenues avec le modèle CAO avec un bras de mesure Hexagon®	ANOVA

2.7 Protocole expérimental

2.7.1 Présentation des configurations spatiales

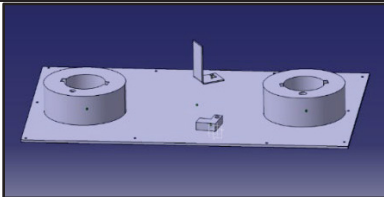
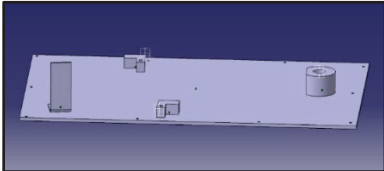
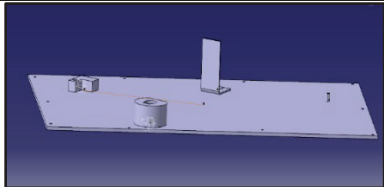
Dans le cadre de cette expérimentation, il est question de réaliser un assemblage de différentes pièces selon trois configurations spatiales préétablies. L'information sera accessible au participant via deux médiums : instructions papier et projecteur FARO®. L'expérimentation sera réalisée avec dix participants, ce qui représente un échantillon statistiquement significatif selon (Letho et Buck, 2008).

Le protocole expérimental se présentera de la façon suivante :

- 1) Première étape : une combinaison prédéterminée de pièces à assembler selon trois configurations spatiales différentes dans un plan d'assemblage.
- 2) En deuxième étape, un questionnaire NASA TLX est réalisé pour recueillir le ressenti des participants après l'utilisation de chaque méthode.

Dans le cadre des assemblages, les trois configurations spatiales qui ont été retenues sont les configurations **CAD2**, **CAD3** et **CAD6** (voir Tableau 2-6)

Tableau 2-6 Présentation des configurations

Configurations spatiales	Pièces sélectionnées	Configurations spatiales
CAD 2*	2, 3, 8 et 13	
CAD 3*	7, 11, 12, et 13	
CAD 6*	5, 6, 10 et 14	

2.7.2 Planification d'expérience

Le nombre d'expériences (N) prévu pour l'expérimentation est de $N = 60$ expériences si l'on retient le plan factoriel complet. Tous les participants feront les assemblages avec les deux méthodes et les mêmes configurations.

$$N = (10)participants \times (2) \begin{cases} FARO^{\circledR} \\ Manuelle \end{cases} \times (3)Configurations \quad (2.1)$$

2.7.3 Protocole d'assemblage

Dans le cadre de notre étude, l'assemblage avec chaque méthode d'assemblage se présente comme suit pour chaque participant :

2.7.3.1 Assemblage avec la méthode FARO®

1. Mettre la caméra GO-PRO® en marche. On utilise les caméras GO-PRO® uniquement pour recueillir le temps des participants pendant l'assemblage. Les données sur les mouvements ne sont pas traitées dans le cadre de notre étude.
2. Positionner les pièces à assembler devant le participant (Figure 2.5). Les pièces sont toujours disposées dans le même ordre et au même endroit ;
3. Démarrer l'enregistrement sur la caméra GO-PRO® ;
4. Projeter la configuration spatiale sur le plan d'assemblage ;
5. Le périmètre de la pièce et les détails comme des trous ou chanfreins seront projetés ;
6. Le participant doit choisir la bonne pièce dans le lot de pièces présentes (travail cognitif) ;
7. Le participant doit orienter la pièce dans le bon sens (travail cognitif) ;
8. Le participant prendra la bonne pièce, dans la bonne orientation et la placera au niveau de l'empreinte de la pièce. Cette étape sera du « *Pick and Place* » ;
9. Réaliser l'assemblage selon la configuration demandée (travail cognitif) ;
10. Arrêt du chronomètre sur la caméra GO-PRO® ;
11. Utiliser le pistolet à colle pour fixer de façon temporaire les pièces positionnées par le participant sur le plan de projection dans le but d'éviter les déplacements accidentels ;
12. Numériser la position des pièces avec le bras HEXAGON® sur le plan de projection ;
13. Reprendre les étapes 1 à 11 pour les autres configurations spatiales ;
14. Faire remplir au participant le questionnaire NASA-TLX après chaque méthode.

2.7.3.2 Méthode d'assemblage manuel

1. Mettre la caméra GO-PRO® en marche. On utilise les caméras GO-PRO® uniquement pour recueillir le temps des participants pendant l'assemblage. Les données sur les mouvements ne sont pas traitées dans le cadre de notre étude.
2. Positionner les pièces à assembler devant le participant (Figure 2.5). Les pièces sont toujours disposées dans le même ordre et au même endroit ;
3. Démarrer l'enregistrement sur la caméra GO-PRO® ;

4. Remettre les plans 2D de la configuration d'assemblage sur PDF au participant ;
5. Déterminer la position des pièces sur le plan d'assemblage par mesurage : utilisation du crayon et un ruban à mesurer (travail cognitif) ;
6. Le participant doit choisir la bonne pièce dans le lot de pièces présentes (travail cognitif) ;
7. Le participant doit orienter la pièce dans le bon sens (travail cognitif) ;
8. Le participant prendra la bonne pièce, dans la bonne orientation et la placera au niveau de la position qu'il a déterminée avec le ruban à mesurer sur le plan d'assemblage « *Pick and Place* » ;
9. Réaliser l'assemblage selon la configuration demandée (travail cognitif) ;
10. Arrêt du chronomètre sur la caméra GO-PRO® à la fin de l'assemblage ;
11. Utiliser le pistolet à colle pour fixer de façon temporaire les pièces positionnées par le participant sur le plan de projection dans le but d'éviter les déplacements accidentels ;
12. Numériser la position des pièces avec le bras HEXAGON® sur le plan de projection ;
13. Reprendre les étapes 1 à 11 pour les autres configurations spatiales ;
14. Faire remplir au participant le questionnaire NASA-TLX après chaque méthode.

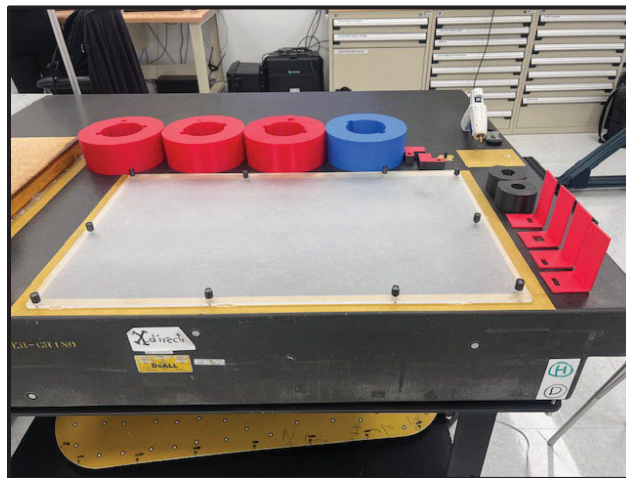


Figure 2.5 Position des pièces sur la table avant l'assemblage

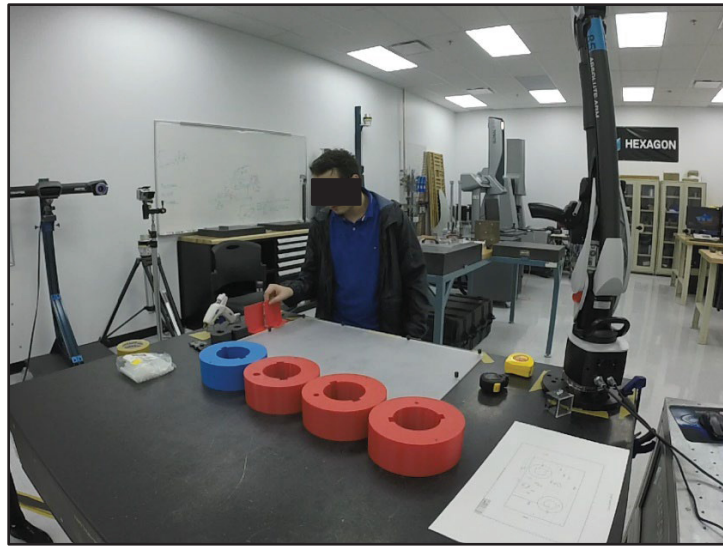


Figure 2.6 Assemblage avec la méthode FARO®

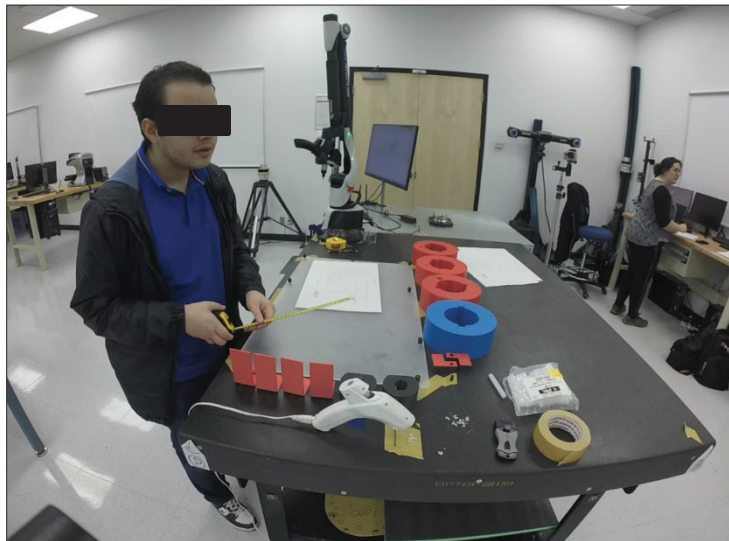


Figure 2.7 Assemblage avec la méthode manuelle

Les informations suivantes seront transmises dans le cadre des différentes méthodes d'assemblage de la façon suivante (voir Tableau 2-7)

Tableau 2-7 Méthodes de transmission des informations

Méthodes	Informations transmises
FARO®	Empreinte de la pièce dans le plan d'assemblage (plan de projection)
Manuelle	Plans 2D des configurations en PDF. Aucune instruction particulière n'a été fournie aux participants(es) pour réaliser le mesurage manuel

2.8 Méthode ANOVA

L'analyse de la variance (ANOVA : ANalysis Of VAriance) est une technique qui permet de comparer les moyennes de plus de deux populations. Il s'agit aussi de l'équivalent, pour des variables qualitatives, de la régression linéaire (Tahan, 2016). Le logiciel qui sera utilisé pour le traitement statistique des données est MiniTAB v17. Les différentes étapes de notre analyse se présentent comme suit.

Étape 1 : Nous présentons ci-dessous les hypothèses dans le cadre de notre mémoire :

- μ_1 : temps d'assemblage pour méthode d'assemblage manuel
- μ_2 : temps d'assemblage pour méthode d'assemblage par système de projection
- m : population (nombre de variables)
- n : nombre de données relevées
- $H_0 : \mu_1 = \mu_2$
- H_1 : au moins une moyenne est différente des autres
- α (seuil de signification) = 0,05

N.B. On aura les mêmes hypothèses pour les autres variables à mesurer (Tableau 2-8).

Tableau 2-8 Exemple de présentation des données

Variables	Manuel	Projecteur FARO
Temps d'assemblage		
Éléments de localisation		
Éléments surfaciques		

Étape 2 : Nous déterminerons de façon théorique $F_{théorique}$ en déterminant le nombre de degrés de liberté dF et en utilisant la table de Fisher.

$$F_{théorique} = F_{\alpha Df_{intra} Df_{extra}} \quad (2.2)$$

Étape 3 : Calcul de F_{test}

$$F_{test} = \frac{CM_{factor}}{CM_{Noise}} \quad (2.3)$$

Étape 4 : Test de l'hypothèse nulle

Si $F_{test} > F_{théorique}$ alors H_0 est rejetée, ou en considérant la probabilité d'effectuer une erreur de type I, si $p_{value} \leq 0.05$ alors H_0 est rejetée.

2.8.1 Mesure des déviations réelles

Le bras de mesure Hexagon® sera utilisé pour prendre la déviation (erreur) des pièces par rapport aux différentes configurations spatiales (Figure 2.8)

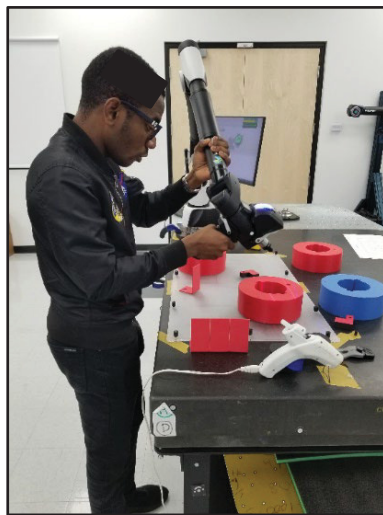


Figure 2.8 Mesure de la déviation avec le bras Hexagon®

2.8.1.1 Exemple de déviations dimensionnelles après l'assemblage

Nous présentons ci-dessous des exemples d'images des déviations à la suite de la numérisation des différentes configurations spatiales assemblées (Figure 2.9, Figure 2.10, Figure 2.11, Figure 2.12). La pièce positionnée numérisée avec le bras de mesure HEXAGON® se présente en couleur VERTE et la pièce CAD est en couleur GRISE.

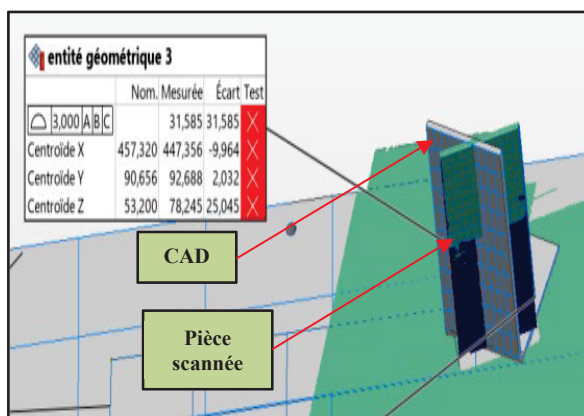


Figure 2.9 P1CAD_2M -Entité géométrique 3

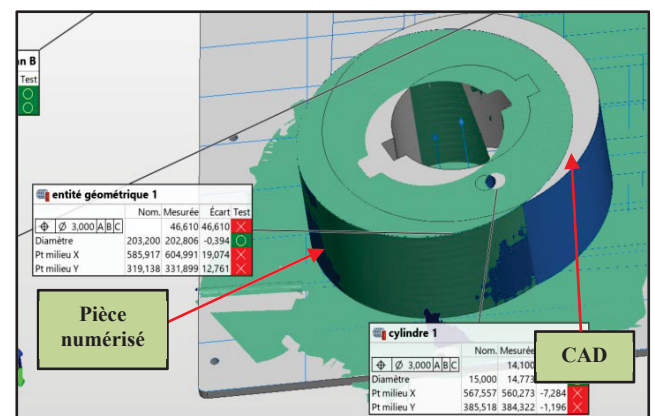


Figure 2.10 P1CAD_2M - Cylindre 1 et entité géométrique 1

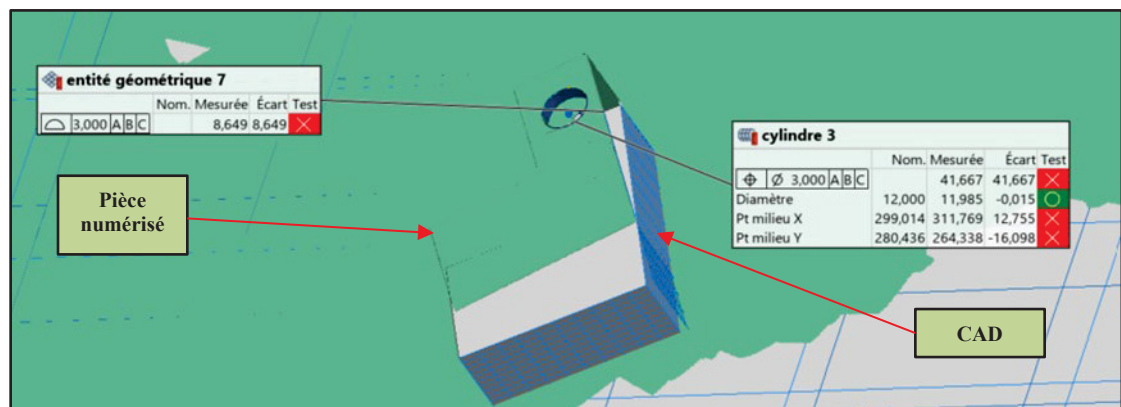


Figure 2.11 P1CAD_2M - Entité géométrique 7 & 8 et cylindre 3

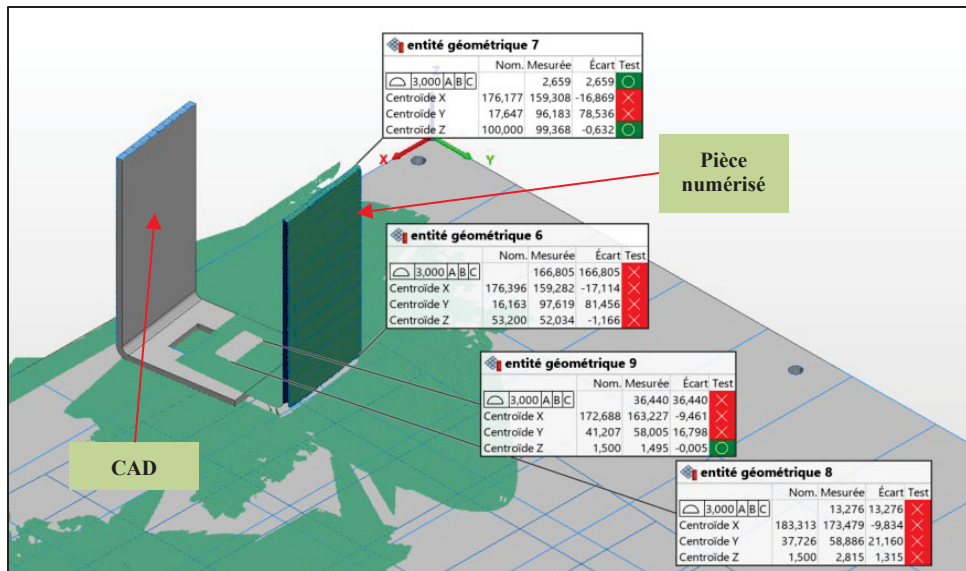


Figure 2.12 P3CAD_3M - Entité géométrique 6, 7, 8 et 9

2.9 Présentation de NASA-TLX

Dans le cadre de ce projet, il faudra réaliser les trois configurations spatiales en utilisant la méthode FARO® et la méthode manuelle qui comporte des opérations de mesurage. Il y aura du travail cognitif pour reconnaître les pièces, les sélectionner et les orienter dans le bon sens. Les opérations de mesurage dans la méthode manuelle vont engendrer aussi du travail cognitif. Par la suite, une opération de « *pick and place* » permettra de déplacer les pièces avec les mains sur le plan d'assemblage. De plus, les participants seront debout pendant l'assemblage dans une posture libre et n'auront pas la possibilité de régler la hauteur de la table d'assemblage (table non ajustable et fixée au sol). La durée globale de l'expérimentation dans le cadre des deux méthodes d'assemblage est estimée à 2h par participant. Cette durée a été jugée suffisante pour permettre une évaluation complète tout en évitant une fatigue excessive. Toutefois, il est reconnu que la durée d'une tâche peut influencer la perception de la charge de travail, notamment en termes d'effort, de frustration et de performance perçue (Hart & Staveland, 1988). Tous ces éléments induiront une charge physique pendant les assemblages. Au vu de ce contexte, NASA-TLX est l'outil avec le plus fiable et valide pour recueillir le ressenti de la charge de travail, car il nous permettra de recueillir la charge mentale et la charge physique ressentie par les participants pendant les assemblages.

NASA Task Load Index (NASA-TLX) est un outil permettant de mesurer et d'évaluer subjectivement la charge mentale de travail. Il permet de déterminer la charge mentale d'un participant pendant l'exécution d'une tâche. Il évalue la performance sur six dimensions afin de déterminer un score global de charge de travail. Les six dimensions sont les suivantes :

- **Exigence mentale** : à quel point la tâche a nécessité de penser, décider ou calculer
- **Exigence physique** : quantité et intensité d'activité physique requise pour accomplir la tâche
- **Exigence temporelle** : pression temporelle ressentie pour exécuter la tâche
- **Effort** : degré de concentration ou d'énergie nécessaire pour maintenir un niveau de performance
- **Performance** : niveau de réussite dans l'exécution
- **Niveau de frustration** : à quel point le participant s'est senti contrarié, découragé, confiant ou satisfait pendant la tâche

Les participants doivent évaluer chaque dimension sur une échelle allant de **1 (faible)** à **20 (élevée)**. La méthode NASA-TLX utilise également une procédure de comparaison par paires : on présente 15 combinaisons de deux dimensions, et le participant choisit, pour chaque paire, celle qui a le plus contribué à sa charge de travail.

Cette procédure permet de tenir compte de sources potentielles de variabilité entre les évaluateurs :

- La charge de travail ressentie en général entre les participants ;
- Les différences de sources de charge de travail entre les tâches.

La procédure d'utilisation de NASA-TLX est :

1. Faire effectuer la tâche d'assemblage aux participants et les inviter à remplir le formulaire NASA-TLX juste après la tâche ;
2. Suivre la procédure de pondération : utiliser le formulaire NASA-TLX pour présenter les 15 comparaisons par paire aux participants, et leur demander de sélectionner à chaque fois la dimension qui a le plus contribué à leur charge de travail ;

3. Remplir le NASA-TLX : demander aux participants de donner une note entre 1 et 20 pour chaque sous-échelle ;
4. Calcul du score TLX : le logiciel TLX permet de calculer le score global de charge de travail, compris entre 0 et 100.

CHAPITRE 3

Données expérimentales

À la suite des expérimentations qui se sont déroulées au Laboratoire de métrologie de l'ÉTS, différentes données comme la déviation géométrique qui nous permettront de vérifier l'erreur de positionnement (localisation et orientation) des pièces et le temps d'assemblage pour chaque configuration spatiale avec chaque méthode ont été recueillies via Polyworks® (logiciel de traitement des données du bras de mesure HEXAGON®) et le temps final d'assemblage par les caméras GO-PRO®.

Pour ce projet, un échantillon de participants a été constitué selon les critères d'inclusion et d'exclusion suivants :

Critères d'inclusion :

- Participants étudiants ou personnels de l'ÉTS, ayant 20 ans et plus;
- Avoir complété le formulaire sur les aptitudes physiques pour travailler debout (formulaire de forme physique 2022 Par-Q+/2022Q-AAP+) et être capable de porter des lunettes de réalité augmentée;
- Être familier et ou à l'aise avec le fait de manipuler un pistolet à colle chaude;
- Être disponible pour 2h30.

Critères d'exclusion :

- La présence d'une maladie systémique ou dégénérative (arthrite, rhumatisme, cancer, scléroses en plaques ou autres);
- Problèmes musculosquelettiques (chirurgie, douleur, inflammations);
- Une réponse négative sur le formulaire;
- Problèmes de vue qui pourraient empêcher le participant d'utiliser correctement les lunettes Hololens 2.

Le Tableau 3-1 présente les caractéristiques de cet échantillon :

Tableau 3-1 Participants de l'expérimentation

Catégorie	Nombre	Critères de regroupement	Méthode testée
Étudiants	7	Niveau d'études : Maîtrise ou Doctorat	FARO®/Manuelle
	1	Niveau d'études : Collégiales	
Professionnels techniques (mécanique)	2	Niveau d'études : DEP et Collégiales	FARO®/Manuelle
Sexe	1	Féminin	FARO®/Manuelle
	9	Masculin	FARO®/Manuelle

3.1 Déviations géométriques

Nous présentons dans le Tableau 3.1 (pour les tolérances de localisation-P1), les valeurs des déviations en mm tels que recueillies avec le bras HEXAGON® via le logiciel Polyworks® pendant les opérations d'assemblage pour le participant P1 avec la méthode FARO® et avec la méthode manuelle. Les tableaux entiers se trouvent dans l'ANNEXE VI. Par ailleurs, les déviations géométriques aberrantes (ex : heurts accidentels des pièces, etc.) ont été supprimées de l'analyse des données et ont été remplacées par (*) dans le tableau des données. Le Tableau 3-2 permet d'apprécier les erreurs de positionnement (localisation et orientation).

Tableau 3-2 Exemple de déviations pour le participant P1 (localisation)

CAD	Forme	Manuel	FARO®	Participant
CAD 2	Cylindre 1 : Localisation	*	1,595	P1
	Cylindre 2 : Localisation	2,307	0,491	
	Cylindre 3 : Localisation	12,755	1,509	
	Entité géométrique 1 : Localisation	19,074	2,137	
	Entité géométrique 2 : Localisation	16,684	0,801	
CAD 3	Cylindre 1 : Localisation	7,523	1,868	
	Cylindre 2 : Localisation	*	1,871	
	Cylindre 3 : Localisation	3,554	3,663	

CAD	Forme	Manuel	FARO®	Participant
	Entité géométrique 1 : Localisation	9,428	2,247	
CAD 6	Cylindre 1 : Localisation	*	0,984	
	Cylindre 2 : Localisation	*	1,718	
	Cylindre 3 : Localisation	*	3,310	
	Entité géométrique 1 : Localisation	*	0,880	
	Entité géométrique 8 : Localisation	11,163	2,508	

3.2 Temps d'assemblage

Nous présentons au Tableau 3-3, le temps d'assemblage (min) pour chaque configuration spatiale avec les méthodes FARO® et manuelle avec les caméras GO-PRO®. Le tableau entier se trouve dans l'ANNEXE VI. Ce tableau nous présente le temps d'assemblage pour chacune des configurations spatiales et suivant les deux méthodes d'assemblage. Il nous permet de comparer le temps d'assemblage lors de l'utilisation de la méthode FARO® par rapport à la méthode manuelle.

Tableau 3-3 Exemple temps d'assemblage pour les deux méthodes

CAD	Manuel (min)	FARO (min)	Participant
CAD 2	11,96	3	P1
CAD 3	7,95	2,23	P1
CAD 6	7,75	1,35	P1
CAD 2	19,88	2,68	P2
CAD 3	12,38	2,48	P2
CAD 6	12,76	1,7	P2
CAD 2	6,13	2,85	P3
CAD 3	4,75	1,66	P3
CAD 6	3,7	1,65	P3
CAD 2	12,95	3,8	P4
CAD 3	7,33	2,35	P4
CAD 6	7,9	2,46	P4
CAD 2	13,35	3,46	P5
CAD 3	9,41	1,6	P5
CAD 6	11,03	1,57	P5
CAD 2	11,97	1,8	P6
CAD 3	11,52	3,63	P6
CAD 6	10,9	1,38	P6
CAD 2	33,1	5,00	P7
CAD 3	8,6	3,78	P7
CAD 6	7,26	2,38	P7
CAD 2	24,09	2,05	P8
CAD 3	12,29	2,08	P8
CAD 6	17,30	1,76	P8

3.3 Mesures NASA-TLX

3.3.1 Données NASA TLX - Méthode manuelle

Nous présentons dans le Tableau 3-4 les scores bruts et non pondérés NASA TLX obtenus dans le cadre des expérimentations avec la méthode manuelle. Le Tableau 3.3 montre le ressenti de chaque participant au niveau des différentes catégories de NASA-TLX lors de l'assemblage des différentes configurations spatiales avec la méthode manuelle. L'échelle de lecture est de 0 à 100 pour les différents paramètres qui sont le mental, le physique, le temporel, la performance, l'effort et la frustration. Par ailleurs, le participant 1 n'a pas été pris en considération, car il y avait des sections non remplies sur son formulaire NASA TLX, donc ses données ont dû être abandonnées.

Tableau 3-4 Résultats individuels NASA-TLX

Participant	Mental	Physique	Temporel	Performance	Effort	Frustration
P1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
P2	95	60	20	70	90	55
P3	35	15	35	20	20	5
P4	100	100	95	50	95	85
P5	35	45	100	50	85	50
P6	85	15	95	55	45	75
P7	85	30	45	30	70	70
P8	100	5	85	5	75	50
P9	30	5	65	45	45	30
P10	95	10	75	50	95	40

En ce qui concerne le Tableau 3-5, il nous présente les résultats pondérés et non pondérés de la charge de travail pour tous les participants dans le cadre de l'assemblage avec la méthode manuelle. Cela nous permettra de comprendre les caractéristiques les plus exigeantes lors de l'assemblage en général avec la méthode manuelle.

Tableau 3-5 Résultats globaux NASA-TLX/méthode manuelle

Pondérés		Bruts/Non pondérés	
Total	63,21	Total	65,00
Sous-total		Sous-total	
Mental	279,38	Mental	70,63
Physique	74,17	Physique	34,38
Temporel	206,43	Temporel	54,06
Performance	143,13	Performance	40,63
Effort	221,88	Effort	65,63
Frustration	135,00	Frustration	52,50

3.3.2 Données NASA TLX - Système de projection FARO®

Nous présentons dans le Tableau 3-6 les résultats bruts et non pondérés NASA TLX obtenus dans le cadre des expérimentations avec la méthode FARO®. Le Tableau 3. 5 montre le ressenti de chaque participant au niveau des différentes catégories de NASA-TLX lors de l'assemblage des différentes configurations spatiales avec la méthode FARO®. L'échelle de lecture est de 0 à 100 pour les différents paramètres qui sont le mental, le physique, le temporel, la performance, l'effort et la frustration. Cette interprétation est identique pour l'ensemble des critères, mais leur sens dépend du paramètre évalué :

Par ailleurs, le participant 1 n'a pas été pris en considération, car il y avait des sections non remplies sur son formulaire NASA TLX, donc ses données ont dû être abandonnées.

Tableau 3-6 Résultats individuels NASA-TLX/FARO®

User #	Mental	Physical	Temporal	Performance	Effort	Frustration
P1	N/A	N/A	N/A	N/A	NA	N/A
P2	10	5	5	20	10	10
P3	10	5	5	10	5	5
P4	90	10	70	5	90	85
P5	10	10	15	15	10	10
P6	75	15	15	55	50	75
P7	45	15	65	25	55	15
P8	100	5	65	5	40	5
P9	5	5	15	5	5	10
10	75	10	45	15	10	20

En ce qui concerne le Tableau 3-7, il nous présente les résultats pondérés et non pondérés de la charge de travail pour tous les participants dans le cadre de l'assemblage avec la méthode FARO®. Cela nous permettra de comprendre les caractéristiques les plus exigeantes lors de l'assemblage en général avec la méthode FARO®.

Tableau 3-7 Résultats globaux NASA TLX - FARO®

Pondérés		Bruts/Non pondérés	
Total	32,93	Total	10,00
Sous-total		Sous-total	
Mental	231,88	Mental	46,67
Physique	10,00	Physique	8,89
Temporel	108,75	Temporel	25,28
Performance	58,89	Performance	17,22
Effort	70,56	Effort	30,56
Frustration	85,83	Frustration	26,11

CHAPITRE 4

Analyses statistiques des données

Après un premier traitement pour consolider les données, nous réalisons un traitement statistique par la méthode ANOVA pour établir (ou pas) l'influence de l'utilisation de deux méthodes d'assemblage : par la méthode de projection FARO® et par la méthode manuelle. L'analyse ANOVA dans ce cas est basée sur l'hypothèse de l'égalité des moyennes. C'est-à-dire :

$$\begin{aligned} H_0: \mu_{P1} &= \mu_{P2} = \dots = \mu_{P10} \\ H_a: \exists \mu_{Pi} &\neq \mu_{Pj} \end{aligned} \quad (4.1)$$

4.1 Analyses ANOVA sur l'erreur de profil de l'assemblage

4.1.1 Réponse des participants en fonction de la méthode FARO®

La Figure 4.1 illustre les déviations géométriques de l'erreur de profil 3D (surfaceutiques) des opérateurs P_i Selon la méthode d'assemblage assistée par projection FARO®. Les déviations géométriques ne varient pas beaucoup d'un participant à un autre lors de l'utilisation de la méthode FARO® hormis dans le cas des participants P5 et P7. Avec l'analyse statistique ANOVA avec Minitab, nous constatons aussi que $p_{value} = 0.604$, ce qui implique que l'hypothèse H_0 selon laquelle les moyennes sont identiques ne peut pas être rejetée. Après analyse des vidéos, nous constatons que les participants P5 et P7 ont fait des erreurs dans la sélection des pièces, contrairement aux autres opérateurs. Ils ont sélectionné des pièces cylindriques avec des diamètres de trous différents de ce qui était projeté, néanmoins la différence ne peut être considérée comme significative, car les pièces cylindriques sélectionnées ont le même diamètre que les empreintes cylindriques projetées.

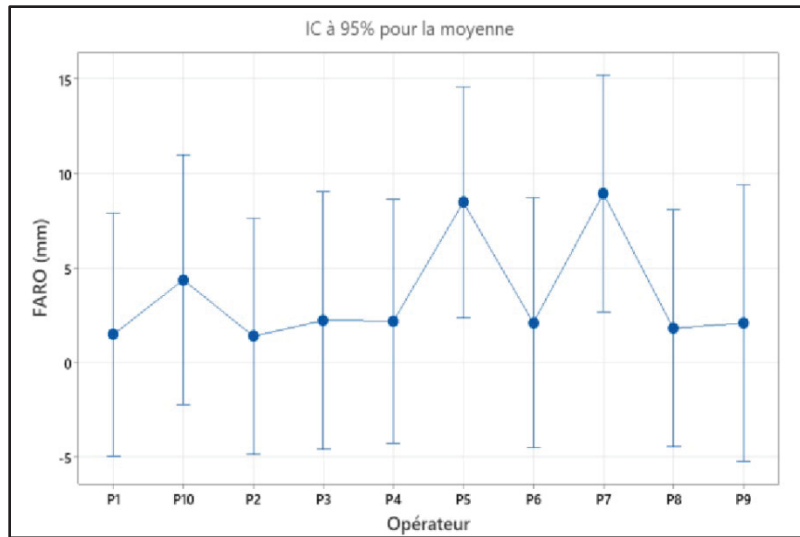


Figure 4.1 Graphique des intervalles de la méthode FARO® en fonction des participants - erreurs de profil

4.1.2 Réponse des participants en fonction de la méthode manuelle

La Figure 4.2 illustre les déviations géométriques de l'erreur de profil 3D des opérateurs P_i Selon la méthode d'assemblage manuelle. Les déviations géométriques sont significatives d'un participant à un autre. Avec l'analyse statistique ANOVA avec Minitab, nous constatons que $p_{value} \approx 0$, ce qui implique que l'hypothèse H_0 Selon laquelle les moyennes sont identiques est rejeté. Après visualisation des vidéos, le constat fait est que pendant l'utilisation de la méthode manuelle, aucune méthode de travail pour la mise en place des pièces n'a été imposée, ce qui fait que chaque participant a utilisé un mode opératoire individuel pour positionner les pièces dans le plan d'assemblage. Les différents modes opératoires adoptés par les participants lors de l'assemblage manuel, en l'absence de procédure standardisée, ont plusieurs implications ergonomiques. En effet, chaque participant a utilisé des gestes propres à sa logique, son anthropométrie et son expérience. Cela a entraîné une diversité dans les trajectoires, les amplitudes de mouvement, les postures et les efforts musculaires. Par ailleurs, les personnes de stature plus importante ont pu adopter des postures en flexion sagittale plus prononcée ou avec les bras en extension, tandis que les personnes de petite taille ont compensé par des mouvements plus rapprochés du corps ou des contournements de la table d'assemblage.

Cette variabilité a pu affecter la précision du positionnement des pièces. Aussi, l'absence de standardisation peut entraîner des efforts inutiles ou répétitifs, augmentant le risque de fatigue et donc un risque de réduction de la précision.

En l'absence de procédure de travail uniforme, la répétabilité est directement affectée (répétabilité des gestes d'assemblage). Aussi, il est difficile de reproduire les conditions d'assemblage ou de garantir la constance des résultats (reproductibilité) entre les participants P1 à P10.

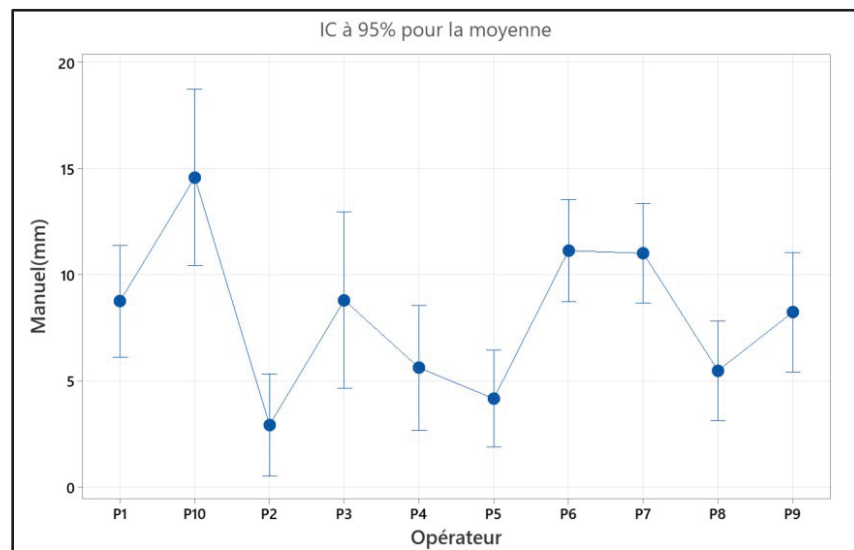


Figure 4.2 Graphique des intervalles de la méthode manuelle en fonction des participants erreurs de profil

4.1.3 Comparaison globale de la méthode FARO® vs la méthode manuelle — erreur de profil

La Figure 4.3 illustre la comparaison entre la méthode manuelle et à la méthode FARO®. Avec l'analyse statistique ANOVA avec Minitab, nous constatons que $p_{value} = 0.001$, ce qui implique l'hypothèse H_0 selon laquelle les moyennes sont identiques est rejeté. Les performances obtenues (précision, répétabilité) lors de l'utilisation de la méthode et de la méthode FARO® sont nettement différentes. Avec la Figure 4.3, nous pouvons dire que la méthode FARO® est plus précise que la méthode manuelle.

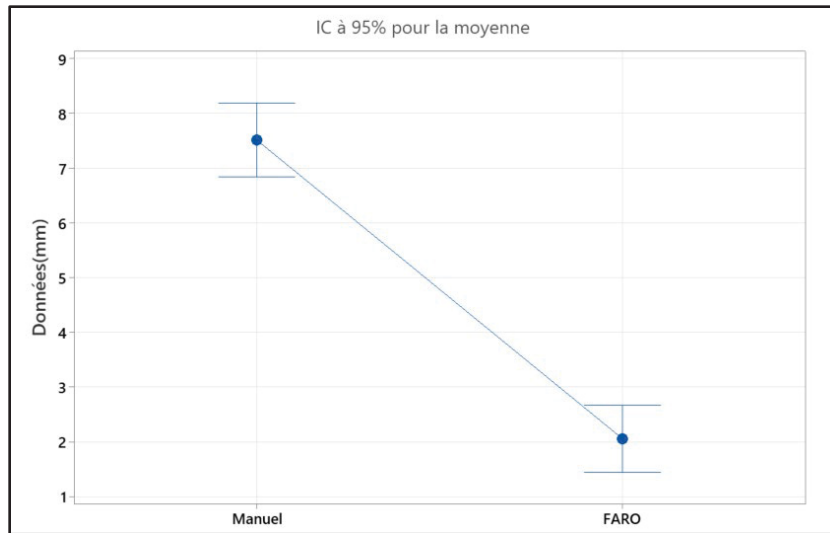


Figure 4.3 Graphique des intervalles de la méthode manuelle vs la méthode FARO® - erreurs de profil

4.2 Analyse des déviations géométriques des éléments cylindriques (tolérance de localisation)

4.2.1 Réponse des opérateurs avec la méthode FARO®

La Figure 4.4 illustre la moyenne et l'intervalle 95 % de la déviation (mm) en utilisant la méthode FARO® et en fonction des opérateurs P_i qui ont participé à l'étude. Avec l'analyse statistique ANOVA avec Minitab, nous constatons que $p_{value} \approx 0$, ce qui implique le rejet de l'hypothèse H_0 selon laquelle toutes les moyennes avec le projecteur FARO® sont identiques. Par ailleurs, avec la Figure 4.4, nous pouvons affirmer que le comportement n'est pas similaire à travers tous les opérateurs P_i (ex. on constate facilement la divergence des opérateurs P3 et P10). Les opérateurs P3 et P10 ont commis des erreurs dans la sélection des pièces.

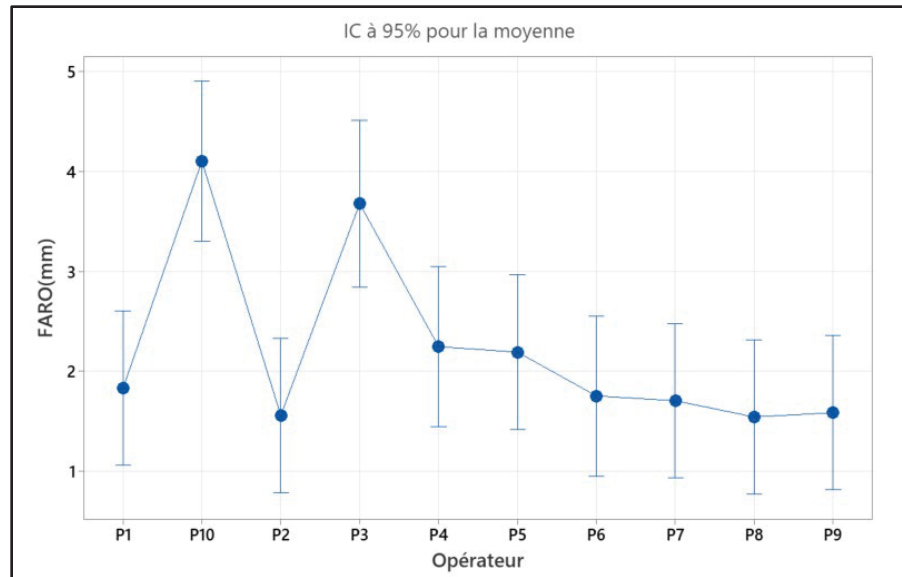


Figure 4.4 Graphique des intervalles de la méthode FARO® en fonction des participants - erreurs de localisation

4.2.2 Réponse des participants avec la méthode manuelle

La Figure 4.5 illustre la moyenne et l'intervalle 95 % de la déviation (mm) en utilisant la méthode manuelle et en fonction des opérateurs P_i qui ont participé à l'étude. Avec l'analyse statistique ANOVA, nous constatons que $p_{value} \approx 0$, ce qui implique le rejet de l'hypothèse H_0 Selon laquelle toutes les moyennes sont identiques. Nous constatons avec la Figure 4.5 que le comportement n'est pas similaire à travers tous les opérateurs P_i (ex. on constate facilement les divergences des opérateurs P2 et P7) dû au fait que chacun des participants utilisait son mode opératoire pour positionner les pièces. Par exemple, l'utilisation du mètre ruban et du crayon variait selon les individus : certains mesuraient à partir d'un bord de la table, d'autres du centre de la table, certains marquaient des repères plus précisément que d'autres.

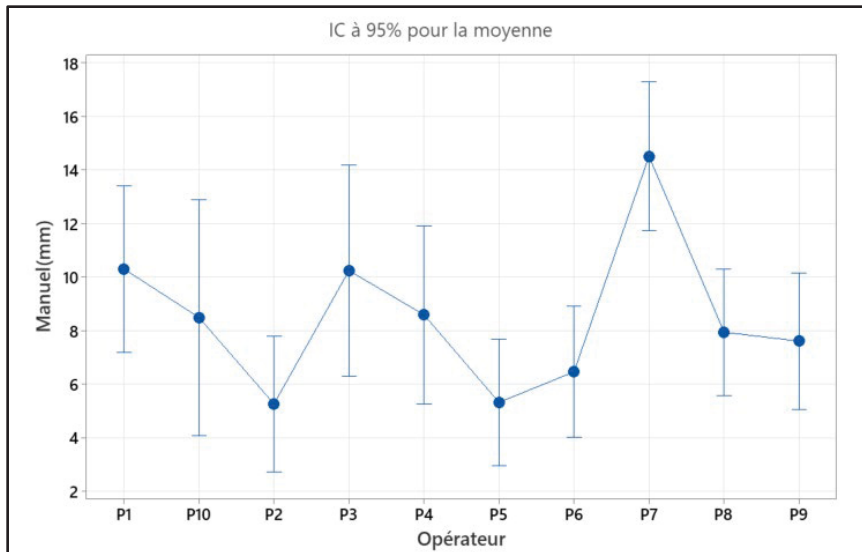


Figure 4.5 Graphique des intervalles de la méthode manuelle en fonction des participants - erreurs de localisation

4.2.3 Comparaison globale de la méthode FARO® vs la méthode manuelle - erreur de localisation

La Figure 4. 6 illustre la comparaison entre la méthode manuelle et la méthode FARO®. Avec l'analyse statistique ANOVA avec Minitab, nous constatons que $p_{value} \approx 0$, ce qui implique l'hypothèse H_0 Selon laquelle les deux moyennes sont identiques est rejetée. Avec la Figure 4.6, nous pouvons avancer que l'assemblage avec la méthode FARO® mène à une meilleure précision que l'assemblage avec la méthode manuelle dans laquelle on utilise un mètre à mesurer pour le positionnement des pièces.

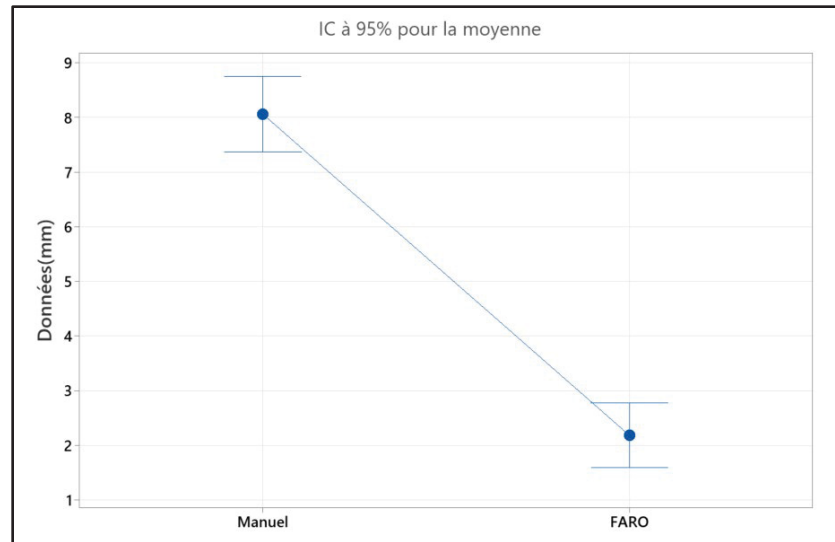


Figure 4.6 Comparaison de la méthode manuelle vs la méthode FARO® - erreurs de localisation

4.3 Analyse du temps d'assemblage

4.3.1 Temps d'assemblage avec la méthode manuelle

La Figure 4.7 illustre le temps d'assemblage des opérateurs P_i lors de l'utilisation de la méthode manuelle. Avec l'analyse statistique ANOVA avec Minitab, nous constatons que $p_{value} = 0.092$, ce qui est supérieur à l'indice de confiance. Ce qui implique l'hypothèse H_0 selon laquelle les moyennes sont identiques ne peut être rejeté. Avec la Figure 4.7, nous constatons que les moyennes de temps lors de l'utilisation du manuel tendent à se ressembler, cependant, nous constatons que les opérateurs P10 et P3 prennent moins de temps que les autres pendant leurs assemblages. Il est important de préciser qu'aucun temps n'a été fixé pour les configurations et que la méthode manuelle implique l'utilisation d'un mètre à mesurer pour positionner les pièces. La latitude a été laissée aux participants afin de terminer leurs assemblages respectifs, ce qui a mené à des modes opératoires différents.

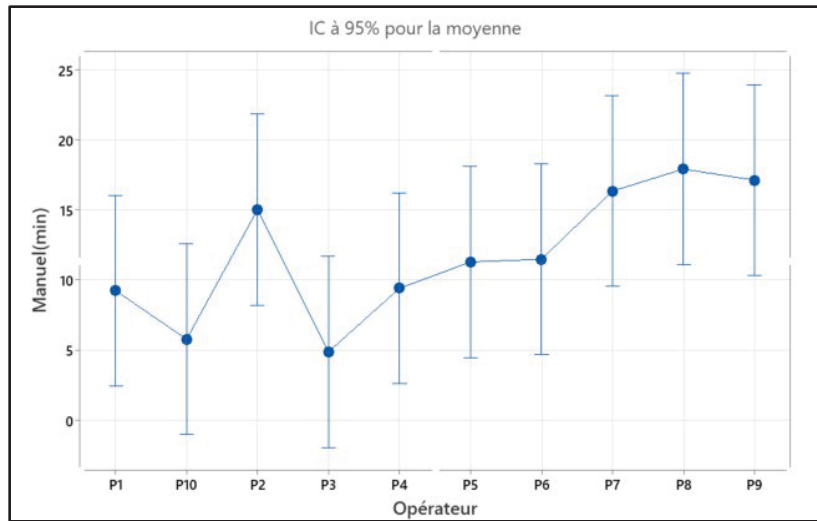


Figure 4.7 Graphique des intervalles de la méthode manuelle et des participants

4.3.2 Temps d'assemblage avec la méthode FARO®

La Figure 4.8 illustre le temps d'assemblage des opérateurs P_i lors de l'utilisation de la méthode FARO®. Avec l'analyse statistique ANOVA avec Minitab, nous constatons que $p_{value} = 0.386$, ce qui est supérieur à l'indice de confiance. Ce qui implique l'hypothèse H_0 selon laquelle les moyennes sont identiques ne peut être rejeté. Avec la Figure 4.8, nous constatons que les moyennes de temps lors de l'utilisation du FARO® tendent à se ressembler, cependant nous constatons que les opérateurs P7 et P9 prennent plus de temps que les autres pendant leurs assemblages. Les participants P7 et P9 ont eu du mal à reconnaître certaines pièces ayant des similarités (diamètres de trous) ou des pièces complexes. Il est important de préciser qu'aucun temps n'a été fixé pour les configurations. La latitude a été laissée aux participants afin de terminer leurs assemblages.

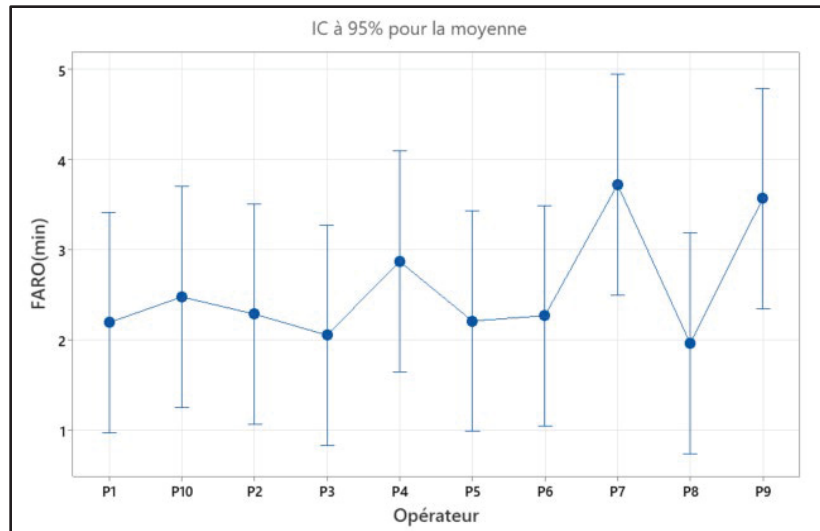


Figure 4.8 Temps d'assemblage des participants avec la méthode FARO®

4.3.3 Comparaison temps d'assemblage

La Figure 4.9 illustre le temps d'assemblage des opérateurs P_i Lors de l'utilisation de la méthode FARO® comparativement à la méthode manuelle. Nous constatons que $p_{value} \approx 0$, ce qui est inférieur à l'indice de confiance. Ce qui implique l'hypothèse H_0 est rejeté. Selon la Figure 4.9, nous constatons que les temps moyens lors de l'utilisation du manuel et du FARO® sont différents. Le temps d'assemblage avec la méthode FARO® est plus court que le temps d'assemblage avec la méthode manuelle, car la méthode manuelle nécessite des activités supplémentaires de mesurage pour la mise en place des pièces.

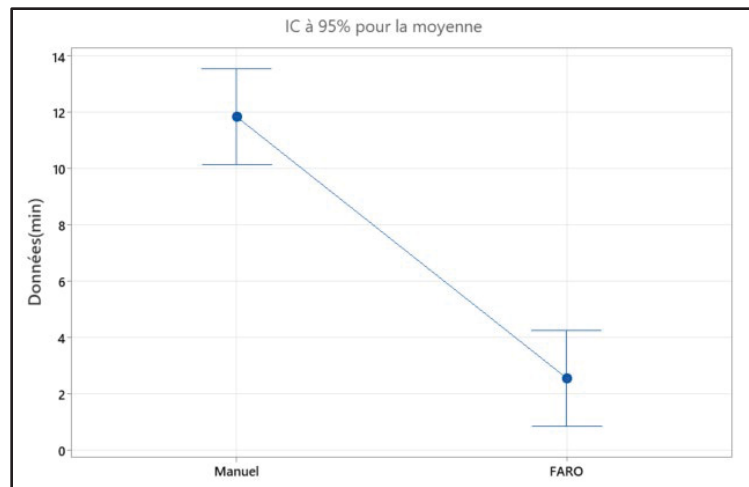


Figure 4.9 Graphique des intervalles des temps d'assemblage de la méthode manuelle vs la méthode FARO®

4.4 Résultats NASA TLX

4.4.1 Données NASA TLX - méthode manuelle

Les résultats des scores pondérés et non pondérés dans le Tableau 4.1 montrent que, pendant les travaux avec la méthode manuelle, les participants ressentent principalement de la fatigue mentale, physique et temporelle. Cela s'explique, car pendant l'expérimentation avec la méthode manuelle, les participants sont debout pendant environ 2h et doivent prendre diverses mesures avec un mètre à mesurer en vue de positionner les pièces dans le cadre des différents assemblages. Par ailleurs, selon la Figure 4.10, individuellement, nous constatons que les résultats au niveau de tous les paramètres varient d'un participant à un autre en raison, entre autres, de la diversité des modes opératoires pour accomplir les tâches d'assemblage. Ces choix ont un impact direct sur la charge de travail perçue et la qualité de l'assemblage.

Plus précisément, les impacts des modes opératoires sont les suivants :

- Sur la charge mentale : certains participants ont adopté des stratégies de mesure compliquées ou peu efficaces (ex. : double vérification, repérage approximatif), ce qui a accru leur effort cognitif.

- Sur la charge physique : les postures adoptées (flexion sagittale, bras en extension) et la répétition des gestes de mesure ont généré une fatigue plus ou moins importante selon les individus.
- Sur la charge temporelle : les participants qui ont utilisé des méthodes de mesure plus lentes ou qui ont hésité dans leur prise de décision ont ressenti une pression temporelle plus forte.
- Sur la frustration : les erreurs de mesure, les repositionnements fréquents ou les difficultés à interpréter les repères ont contribué à une augmentation du niveau de frustration chez certains participants.
- Sur la performance perçue : les participants ayant adopté des stratégies plus méthodiques cependant moins efficaces ont parfois perçu leur performance comme inférieure, malgré une meilleure précision.

Ainsi, le choix du mode opératoire influence directement la perception de la tâche et la qualité du résultat. Cette variabilité interindividuelle met en évidence les limites de la méthode manuelle, qui repose fortement sur les compétences, l'expérience et les préférences personnelles. À l'inverse, une méthode complètement assistée par projection pourrait permettre de standardiser les actions en les guidant, de réduire la charge mentale et de limiter les écarts de performance entre opérateurs.

Tableau 4-1 Résultats globaux NASA-TLX/manuelle

Pondérés		Bruts/non pondérés	
Total	63,21	Total	65,00
Sous-total		Sous-total	
Mental	279,38	Mental	70,63
Physique	74,17	Physique	34,38
Temporel	206,43	Temporel	54,06
Performance	143,13	Performance	40,63
Effort	221,88	Effort	65,63
Frustration	135,00	Frustration	52,50

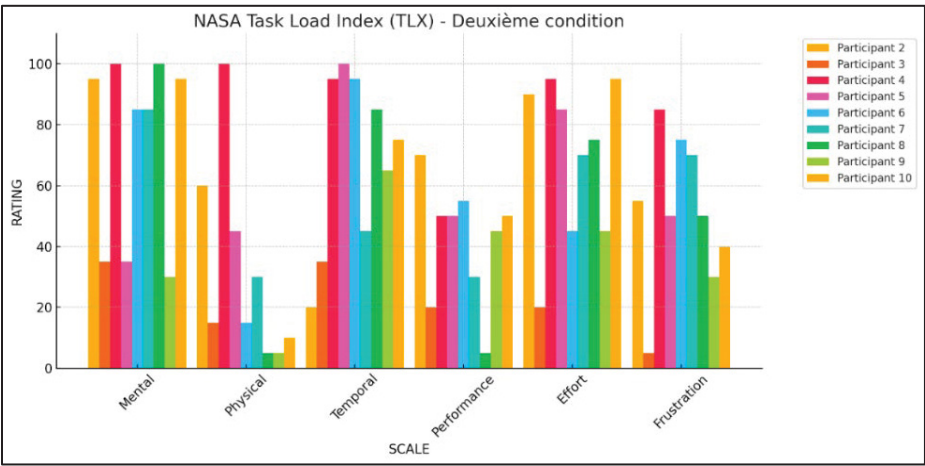


Figure 4.10 NASA TLX participant - méthode manuelle

4.4.2 Données NASA TLX - FARO®

Les résultats des scores pondérés et non pondérés NASA TLX dans le Tableau 4.2 démontrent que pendant les travaux avec la méthode FARO®, les participants ressentent principalement de la fatigue mentale et temporelle. Cela s’explique, car, pendant l’expérimentation avec la méthode FARO®, il y a du travail cognitif pour sélectionner la bonne pièce et l’orienter dans le bon sens. Cependant le temps d’assemblage est réduit du fait que la mise en place sur le plan d’assemblage se fait par « *pick and place* ». Les enjeux les plus importants sont de choisir les bonnes pièces, de les orienter et de les placer dans le bon sens. Par ailleurs, selon la Figure 4.11, individuellement, nous constatons que les résultats peuvent varier d’un participant à un autre. Cela est dû au fait que tous les paramètres interviennent pendant l’assemblage dans une certaine mesure. Par exemple, le constat que nous avons fait pendant l’expérimentation est que le fait de ne pas trouver la bonne pièce créait souvent de la frustration chez certains participants.

Tableau 4-2 Résultats globaux NASA-TLX - FARO®

Pondérés		Bruts/non pondérés	
Total	32,93	Total	10,00
Sous-total		Sous-total	
Mental	231,88	Mental	46,67
Physique	10,00	Physique	8,89

Temporel	108,75	Temporel	25,28
Performance	58,89	Performance	17,22
Effort	70,56	Effort	30,56
Frustration	85,83	Frustration	26,11

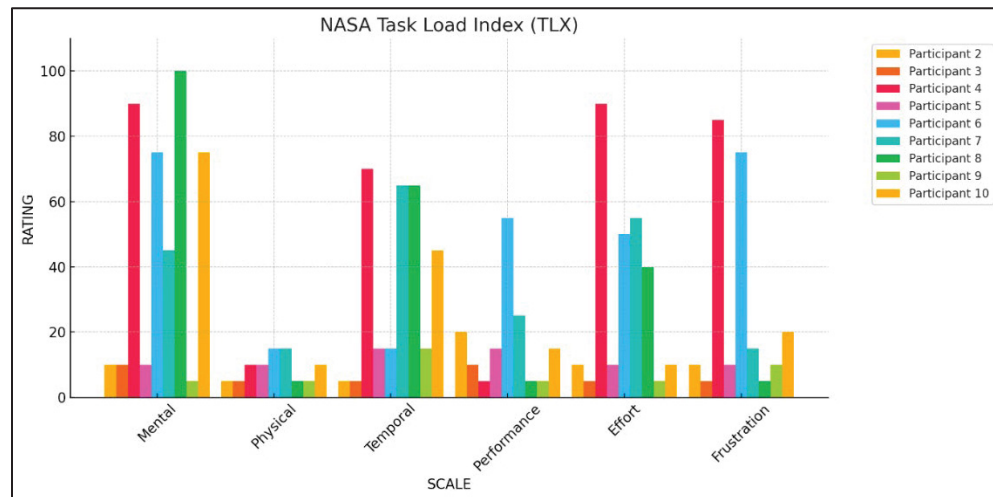


Figure 4.11 NASA TLX participant - FARO®

CHAPITRE 5

Discussion

5.1 Limite du protocole expérimental

Le protocole expérimental dans le cadre du projet comportait plusieurs étapes, en l'occurrence une revue scientifique suivie d'une expérience scientifique pour répondre à la question de recherche : « Dans quelle mesure, une méthode d'assemblage basée sur la projection d'instructions peut-elle améliorer la qualité, le temps d'assemblage et la charge de travail ressentie des utilisateurs lors de tâches d'assemblage ? »

Les limites du protocole expérimental présentées ci-dessous sont les éléments qui peuvent réduire la fiabilité, la validité ou la généralisation des résultats.

5.1.1 Conditions de laboratoire éloignées de la réalité

Pendant les assemblages, le temps d'assemblage par configuration spatiale et par méthode n'était pas fixé. Ce qui faisait que chacun des participants pouvait faire les assemblages tant avec la méthode FARO® et la méthode manuelle à leur rythme. Cela pourrait avoir une incidence sur la précision des résultats. Dans des conditions réelles ou professionnelles, un temps d'assemblage est fixé.

5.1.2 Mesures imprécises ou non fiables

Dans le cadre de la méthode manuelle, les mesurages pour positionner les pièces sur le plan d'assemblage se faisaient avec un mètre à mesurer et un crayon comme marqueur. Ce genre de mesure nécessite une maîtrise rigoureuse du mesurage et peut donc induire des erreurs humaines au moment de la lecture et de la manipulation de l'instrument de mesure (Tang et al. 2025).

5.1.3 Opérations pour mesurer les positions des pièces avec le bras de mesure HEXAGON®

Pour mesurer les positions des pièces sur le plan d'assemblage, nous avons utilisé le bras de mesure HEXAGON®. Ce dispositif offre une précision métrologique au moins dix fois supérieure à celle obtenue avec le système FARO® ou la méthode manuelle, ce qui en fait une référence étalon pour l'analyse des écarts de positionnement.

Avant de lancer les mesures officielles, nous avons réalisé un test à blanc, c'est-à-dire une simulation complète du protocole d'assemblage sans enregistrement de données, dans le but d'identifier les éventuelles sources d'erreur ou de perturbation. Ce test a révélé un problème récurrent : certaines pièces assemblées pouvaient être accidentellement déplacées (heurtées ou glissées) au moment de la manipulation du bras de mesure HEXAGON®, ce qui introduisait des erreurs de positionnement (localisation et orientation) dans les données.

Pour remédier à cette situation, nous avons mis en place une solution simple et efficace : l'utilisation d'un pistolet à colle chaude. Après chaque assemblage réalisé par un participant, les pièces étaient fixées temporairement sur le plan de travail à l'aide d'un pistolet à colle, avant de procéder à la numérisation 3D. Cette méthode a permis de stabiliser les pièces, d'éviter tout déplacement involontaire, et de garantir la fiabilité des mesures enregistrées par le bras HEXAGON®.

Les données affectées par ce problème concernaient principalement :

- La précision de la localisation des pièces (écart en X, Y) ;
- L'orientation angulaire des composants (rotation ou inclinaison involontaire) ;
- La cohérence des mesures entre participants, en cas de déplacement non détecté.

Grâce à cette correction, les mesures finales ont pu être réalisées dans des conditions contrôlées, assurant la validité des comparaisons entre les méthodes d'assemblage.

5.1.4 Manque de répétition

La répétabilité et la reproductibilité sont les deux composantes de précision dans un système de mesures.

Durant l'expérience, nous n'avons pas pu valider la répétabilité et la reproductibilité sur une seule configuration spatiale spécifique. L'expérience n'a eu lieu qu'une seule fois par participant.

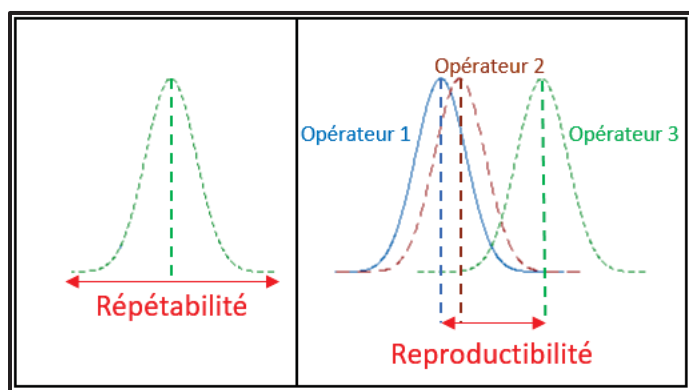


Figure 5.1 Représentation de la répétabilité et la reproductibilité
tirée et adaptée de Measurement Systems Analysis
Manuel (MSA), 4^e édition (2010)

5.1.5 Posture du participant pendant l'assemblage

Dans le cadre de notre expérience, nous avons fait l'hypothèse que le participant adopte une posture ergonomique durant l'assemblage. Ceci a été fait dans le but de réduire le nombre de variables à contrôler. Cependant, une mauvaise posture aura une incidence directe sur la performance de l'assemblage et la charge de travail (Tang et al., 2025).

5.2 Comparaison des résultats avec la littérature

5.2.1 Méthode FARO® et méthode manuelle (éléments surfaciques et localisation)

Lors de l'utilisation avec la méthode FARO® pour les pièces surfaciques, la sélection des pièces se faisait avec un minimum d'erreurs. Cependant, plusieurs erreurs ont été constatées dans la sélection des pièces avec des trous (éléments de localisation). En effet, sur les pièces cylindriques, du fait de l'excitation de l'erreur par des trous de diamètre proches (10 mm, 15 mm et 20 mm), par exemple, les participants P5 et P7 ont commis des erreurs en sélectionnant des pièces surfaciques du bon diamètre, cependant avec des trous ne correspondant pas à la surface projetée. Nous remarquons alors que la projection d'éléments similaires peut induire des erreurs dans la sélection des pièces.

Pour limiter de telles erreurs, les mesures suivantes ont été mises en place:

- Présentation du protocole de recherche aux différents participants lors de la réunion préparatoire avant l'expérimentation;
- Présentation des équipements et des pièces 3D qui seront utilisées lors des assemblages;
- Sensibilisation des participants par rapport aux différences entre les pièces.

En ce qui concerne, la méthode manuelle, le constat qui a été fait est que la précision de l'assemblage est fluctuante, car chacun des participants utilise son mode opératoire pour poser les pièces sur le plan de projection. Nous constatons de grandes fluctuations entre les participants P1 à P10 dans l'utilisation de cette méthode. Certains participants mesuraient à partir du bord de la table, d'autres à partir du centre de celle-ci; certains marquaient les repères avec précision, d'autres approximativement. Ces différences influencent directement la qualité du positionnement et la charge de travail perçue.

En effet, ceci est corroboré par l'étude d'utilisabilité menée par Howard et al. (2023). L'étude examine l'efficacité du casque de réalité augmentée Microsoft Hololens 2 dans le cadre d'une inspection visuelle industrielle en Australie. L'objectif était de déterminer dans quelle mesure cette technologie pouvait améliorer la performance, réduire les erreurs et soutenir les inspecteurs dans leurs tâches. Les principaux résultats montrent que le Hololens 2 en tant que

système d'assistance numérique offre des avantages, comme une réduction de la charge cognitive, un accès mains libres à l'information et un soutien à la formation. Ceci permet de réduire les erreurs humaines d'assemblage. En effet, Hololens 2 est un système d'assistance numérique immersif qui permet aux opérateurs d'accéder à des instructions en temps réel, de manière mains libres, tout en interagissant avec leur environnement physique.

Cependant, dans le cadre de notre expérimentation, nous avons utilisé un autre type de système d'assistance numérique : le projecteur laser FARO®. Contrairement à Hololens 2, le système FARO® projette des instructions fixes sur une surface physique, guidant uniquement le positionnement spatial des pièces sans interaction directe avec l'utilisateur. Il ne permet ni la reconnaissance des pièces ni l'adaptation du contenu projeté en fonction des actions de l'opérateur.

Ainsi, bien que les deux technologies visent à améliorer l'efficacité des tâches d'assemblage, leurs approches diffèrent : Hololens 2 offre une assistance immersive, interactive et adaptative, tandis que FARO® se concentre sur la précision spatiale dans un environnement fixe. Cette distinction souligne les avantages potentiels des systèmes de réalité augmentée pour des tâches complexes ou variables, tout en reconnaissant la robustesse et la simplicité du système de projection dans des contextes industriels standardisés

5.2.2 Qualité dimensionnelle de l'assemblage

Nous constatons que la qualité dimensionnelle des assemblages est meilleure en utilisant la méthode FARO® qu'avec la méthode manuelle. Ce résultat s'explique notamment par le fait que la méthode FARO® élimine les opérations de mesure manuelle à l'aide d'un mètre ruban, ce qui réduit significativement les erreurs de positionnement. Les localisations des pièces étant directement projetées sur le plan de travail, les participants peuvent positionner les composants avec plus de précision et de cohérence.

Cependant, cette méthode ne permet pas toujours de garantir une sélection correcte des pièces, en particulier lorsque celles-ci présentent des caractéristiques géométriques similaires. Dans le cas des pièces cylindriques, la proximité des diamètres de trous (10 mm, 15 mm, 20 mm) et le

manque de détails dans la projection ont conduit à des erreurs de sélection, comme observée chez certains participants.

En ce qui concerne la méthode manuelle, le recours au mesurage constitue une tâche complexe, mobilisant à la fois des ressources physiques et cognitives. Cette complexité affecte directement la qualité de l'assemblage. Les résultats de Hinrichsen et al. (2020) confirment cette observation : leur étude propose un cadre analytique pour classer la complexité cognitive dans les systèmes d'assemblage manuel et structurer les stratégies d'assistance. Ils concluent que la prise en compte explicite de cette complexité est essentielle pour améliorer la performance et réduire les erreurs.

Nos résultats issus du questionnaire NASA-TLX corroborent cette analyse. Les participants ont rapporté une charge cognitive élevée lors des tâches de mesurage manuel, traduite par des scores élevés dans les dimensions « exigence mentale », « effort » et « frustration ». Cette surcharge cognitive augmente les risques d'erreurs, de mauvaise récupération d'erreurs, et entraîne une baisse de productivité.

Ces constats sont également soutenus par d'autres travaux en ergonomie cognitive. Par exemple, Torres Medina (2022) a montré que dans les environnements d'assemblage manuel complexe, la surcharge cognitive est un facteur contributif majeur à l'erreur humaine.

Ainsi, la réduction de la charge cognitive par la simplification des tâches, l'assistance visuelle ou la standardisation des procédures constitue un levier essentiel pour améliorer la qualité des assemblages et la sécurité des opérateurs.

5.2.3 Temps d'assemblage

Pendant l'assemblage avec la méthode FARO®, il faut choisir la pièce parmi plusieurs, la prendre, l'orienter correctement et la placer sur l'empreinte sur le plan d'assemblage « *pick and place* ». Nous constatons alors que nous n'avons pas d'opérations de mesurage à faire. Ceci fait que le temps d'assemblage est plus court que lors de l'assemblage avec la méthode manuelle qui nécessite des opérations supplémentaires, dont le mesurage pour le positionnement des pièces sur le plan d'assemblage. Ceci est conforme à l'étude effectuée par Bartuska et Teischinger (B. Barstuka & Teischinger 2022) qui a permis d'évaluer deux

méthodes d'assemblage, l'une avec « lecture de plans » et l'autre avec un système de réalité augmentée (projection réalité augmentée). L'étude constate que, les tâches qui présentent des différences de temps assez importantes sont du fait des travaux de marquage manuel à faire pour les clous et trous avec la méthode « lecture de plans ». Ceci corrobore ce que nous avons constaté pendant notre expérimentation.

5.2.4 Ressenti pendant l'assemblage

Pour notre projet, nous avons utilisé l'indice de charge de travail NASA Task Load Index pour mesurer le ressenti et la charge de travail, en reconnaissant l'importance de la charge mentale dans l'impact sur la performance des participants. Des études antérieures comme (Lagomarsino et al.2021 ; Sweller et al., 2019 ; Wittenber ; Stahn et al.2021) montrent qu'une augmentation de la demande mentale peut affecter l'efficacité des travailleurs et induire du stress.

5.2.4.1 NASA TLX - méthode manuelle

La discussion des résultats de l'interprétation des scores pondérés et non pondérés se présente comme suit :

- **Résultats non pondérés :**

1. **Exigence mentale : 70,63**

Ce score indique une charge mentale élevée par rapport à l'expérience avec l'utilisation de la méthode FARO®, suggérant que l'ensemble de l'expérience a nécessité un effort cognitif important ou une concentration mentale importante.

2. **Exigence physique : 34,68**

Ce score indique une charge physique modérée, ce qui implique que l'expérience comprenait une quantité raisonnable d'efforts ou d'activités physiques.

3. **Exigence temporelle : 54,06**

Ce score suggère un niveau modéré de pression temporelle pendant l'ensemble de l'expérience indiquant que les participants avaient le sentiment de devoir travailler à un rythme soutenu, mais raisonnable

4. **Performance** : 40,63

Ce score suggère que les participants ont perçu leur performance comme insatisfaisante et pas réussie à la fin de l'expérience.

5. **Effort** : 65,63

Ce score indique un niveau élevé d'effort fourni par les participants pour accomplir l'ensemble de l'expérience

6. **Niveau de frustration** : 52,50

Ce score suggère un niveau de frustration ou d'insatisfaction modérée ressentie par les participants pendant toute l'expérience

• **Résultats pondérés :**

1. **Exigence mentale** : 279,38

Ce score indique une charge mentale élevée, suggérant que l'ensemble de l'expérience a nécessité un effort cognitif important ou une concentration mentale importante

2. **Exigence physique** : 74,17

Ce score indique une charge physique modérée, ce qui implique que l'expérience comprenait une quantité raisonnable d'efforts ou d'activités physiques.

3. **Exigence temporelle** : 206,43

Ce score suggère un niveau élevé de pression temporelle pendant l'ensemble de l'expérience indiquant que les participants avaient le sentiment de devoir travailler à un rythme soutenu, mais raisonnable

4. **Performance** : 143,13

Ce score suggère que les participants ont perçu leur performance comme insatisfaisante et pas réussie à la fin de l'expérience.

5. **Effort** : 221,88

Ce score indique un niveau élevé d'effort fourni par les participants pour accomplir l'ensemble de l'expérience

6. **Niveau de frustration** : 135

Ce score suggère un niveau de frustration ou d'insatisfaction élevé ressenti par les participants pendant toute l'expérience

Les scores non pondérés indiquent une exigence mentale élevée, une exigence physique modérée, ainsi qu'une demande temporelle modérée. Par ailleurs, les participants ont perçu leur performance comme non satisfaisante et pas réussie, ont rapporté un niveau d'effort élevé et une frustration modérée tout au long de l'expérience.

Cependant, lorsqu'on considère les scores pondérés, on constate que l'exigence mentale, l'exigence temporelle, la performance, l'effort et la frustration ont été perçus comme plus élevés. Cela suggère que la charge de travail et les contraintes de l'expérimentation ont été plus importantes pendant l'assemblage avec la méthode manuelle lorsqu'on tient compte de l'importance relative de chaque dimension et de leur impact sur l'expérience des participants. La méthode manuelle implique d'induire des tâches complexes de mesures, ce qui augmente la charge mentale (Hinrichsen et al, 2020).

5.2.4.2 NASA TLX - méthode FARO®

La discussion des résultats de l'interprétation des scores pondérés et non pondérés :

- **Résultats non pondérés :**

7. **Exigence mentale : 46,67**

Ce score indique une charge mentale modérée par rapport à l'expérience avec l'utilisation de la méthode manuelle, suggérant que l'ensemble de l'expérience a nécessité moins d'effort cognitif.

8. **Exigence physique : 8,89**

Ce score indique une charge physique faible, ce qui implique que l'expérience ne nécessitait pas d'efforts ou d'activités physiques.

9. **Exigence temporelle : 25,28**

Ce score suggère un niveau modéré de pression temporelle pendant l'ensemble de l'expérience indiquant que les participants avaient le sentiment de devoir travailler à un rythme soutenu, mais raisonnable

10. **Performance : 17,33**

Ce score suggère que les participants ont perçu leur performance comme satisfaisante et réussie à la fin de l'expérience

11. Effort : 30,56

Ce score indique un niveau modéré d'effort fourni par les participants pour accomplir l'ensemble de l'expérience

12. Niveau de frustration : 26,11

Ce score suggère un niveau de frustration ou d'insatisfaction plus bas ressenti par les participants pendant toute l'expérience

• **Résultats pondérés :**

7. Exigence mentale : 231,88

Ce score indique une charge mentale élevée, suggérant que l'ensemble de l'expérience a nécessité un effort cognitif important ou une concentration mentale importante

8. Exigence physique : 10,00

Ce score indique une charge physique faible, ce qui implique que l'expérience n'était pas exigeante physiquement.

9. Exigence temporelle : 108,75

Ce score suggère un niveau élevé de pression temporelle pendant l'ensemble de l'expérience indiquant que les participants avaient le sentiment de devoir travailler à un rythme soutenu, mais raisonnable.

10. Performance : 58,89

Ce score suggère que les participants ont perçu leur performance comme satisfaisante et réussie à la fin de l'expérience.

11. Effort : 70,56

Ce score indique un bas niveau d'effort fourni par les participants pour accomplir l'ensemble de l'expérience

12. Niveau de frustration : 85

Ce score suggère un niveau de frustration ou d'insatisfaction modérée ressentie par les participants pendant toute l'expérience

Les scores non pondérés indiquent une exigence mentale modérée, une exigence physique modérée, ainsi qu'une demande temporelle modérée. Par ailleurs, les participants ont perçu leur performance comme satisfaisante et réussie, ont rapporté un niveau d'effort faible et une frustration faible tout au long de l'expérience.

Lorsqu'on considère les scores pondérés, on constate que l'exigence mentale et l'exigence temporelle ont été perçues comme plus élevées. Cela suggère que la charge de travail cognitive a été la plus importante pendant l'assemblage avec la méthode FARO® lorsqu'on tient compte de l'importance relative de chaque dimension et de leur impact sur l'expérience des participants. La méthode FARO® a des limites techniques, comme un champ de projection restreint (Rupprecht, 2022) empêchant de projeter correctement les pièces complexes. Ceci induit du travail cognitif pour reconnaître la pièce qui a été projetée.

5.2.5 Conclusion

De manière générale, les scores NASA-TLX pondérés et non pondérés sont élevés pour les indicateurs, exigence mentale et efforts. Toutefois, les scores individuels montrent des différences d'importantes.

Il est important de noter que l'augmentation de la charge cognitive peut avoir des effets néfastes sur la performance, en provoquant de la fatigue et une baisse de l'attention, ce qui peut résulter en une baisse de la précision et de la performance (Hinrichsen et al, 2020).

Dans notre étude, les impacts de l'ensemble de l'expérience sont plus marqués au niveau de la demande mentale. Cependant, l'exigence physique au niveau de l'expérience est relativement modérée.

Rating Scale Definitions		
Title	Descriptions	Place a mark at the desired point on each scale:
MENTAL DEMAND	How much mental and perceptual activity was required (e.g., thinking, deciding, calculating, remembering, looking, searching, etc.)? Was the task easy or demanding, simple or complex, exacting or forgiving?	MENTAL DEMAND Low High
PHYSICAL DEMAND	How much physical activity was required (e.g., pushing, pulling, turning, controlling, activating, etc.)? Was the task easy or demanding, slow or brisk, slack or strenuous, restful or laborious?	PHYSICAL DEMAND Low High
TEMPORAL DEMAND	How much time pressure did you feel due to the rate or pace at which the tasks or task elements occurred? Was the pace slow and leisurely or rapid and frantic?	TEMPORAL DEMAND Low High
PERFORMANCE	How successful do you think you were in accomplishing the goals of the task set by the experimenter (or yourself)? How satisfied were you with your performance in accomplishing these goals?	PERFORMANCE Good Poor
EFFORT	How hard did you have to work (mentally and physically) to accomplish your level of performance?	EFFORT Low High
FRUSTRATION LEVEL	How insecure, discouraged, irritated, stressed and annoyed versus secure, gratified, content, relaxed and complacent did you feel during the task?	FRUSTRATION Low High

Figure 5.2 Questionnaire NASA-TLX

5.3 Discussion des résultats en fonction des connaissances de base

Nous constatons que la méthode manuelle induit beaucoup plus d'erreurs que la méthode FARO®. Par ailleurs, le temps d'assemblage en utilisant la méthode FARO® permet de faire les assemblages dans un temps plus réduit que la méthode manuelle du fait de l'absence d'opérations de mesurage. En ce qui concerne la précision pendant l'assemblage avec la méthode manuelle, des compétences techniques en géométrie au niveau des participants sont un moyen qui permettrait de réduire le taux d'erreur au moment du positionnement des pièces. Par ailleurs, la méthode FARO® ayant un champ de projection restreint, il est difficile de projeter correctement certaines pièces complexes (pièces 6 à 9 - Tableau 2-2), principalement du fait du positionnement des surfaces à projeter. Ceci engendre des erreurs pour les participants pendant la sélection de la pièce dont l'empreinte a été projetée.

Par ailleurs, en vue de réduire le temps d'assemblage pendant l'assemblage avec la méthode manuelle, il serait judicieux de quadriller le plan de travail permettant de faciliter les opérations de mesurage pour positionner les pièces.

CONCLUSION

Les apports

Notre étude avait pour objectif de comparer, dans un premier temps, deux méthodes d'assemblages qui sont la méthode assistée par projections d'instructions via le FARO® et la méthode manuelle basée sur des mesures dimensionnelles manuelles. Dans un deuxième temps, elle nous a permis d'étudier dans quelle mesure, une méthode d'assemblage basée sur la projection d'instructions peut-elle améliorer la qualité, le temps d'assemblage et la charge de travail ressentie par les utilisateurs lors de tâches d'assemblages.

L'étude expérimentale effectuée au laboratoire de métrologie dans le cadre de ce projet a permis de compléter une comparaison entre la méthode manuelle et la méthode FARO®. Un dispositif expérimental, approuvé sur le plan éthique, impliquant un projecteur FARO®, un bras de mesure HEXAGON® et des pièces imprimées en 3D a été développé et déployé. Par ailleurs, l'expérimentation impliquait 10 participants qui devaient assembler trois configurations spatiales (CAD2, CAD3, CAD6) avec la méthode FARO® et la méthode manuelle. Les temps d'assemblage ont été recueillis avec les caméras GO-PRO® et les déviations géométriques et dimensionnelles avec le bras de mesure HEXAGON®. À la fin de méthode d'assemblage, le participant devait remplir le formulaire NASA TLX, ce qui nous a permis de recueillir son ressenti sur la charge de travail.

Les analyses statistiques ANOVA avec le traitement sur Minitab 2022 ont montré que la qualité des assemblages était meilleure avec la méthode FARO® qu'avec la méthode manuelle. En effet, le constat qui est fait, c'est que le fait de projeter les instructions permettait d'avoir une meilleure précision et une uniformisation au niveau des assemblages dans le cas de la méthode FARO® (Sarah Howard et al, 2022). Cependant, pour les pièces avec des formes complexes (pièces 6 à 9 — Tableau 2-2) ou avec une hauteur importante (>5 cm), la surface sélectionnée dans le modèle CAD pour la projection peut ne pas représenter fidèlement l'ensemble de la pièce. Cette limitation peut entraîner des erreurs lors de l'assemblage,

notamment dans la sélection des pièces, car les participants peuvent avoir du mal à reconnaître correctement la pièce projetée à partir d'une vue partielle ou simplifiée.

Aussi, les analyses statistiques ont montré que l'utilisation du système de projection FARO® permet une réduction significative du temps d'assemblage de **12 minutes en moyenne** avec la méthode manuelle à **3 minutes en moyenne** avec la méthode FARO®. On parle ici d'une réduction de **75 %** du temps d'assemblage lorsqu'on utilise la méthode FARO®. En effet, lors de l'utilisation de la méthode FARO, il s'agissait de sélectionner la bonne pièce, de l'orienter et de la positionner sur le plan de travail en faisant du « *Pick and Place* ». Tandis qu'avec la méthode manuelle, des tâches complexes de mesurage avec un mètre à mesurer étaient nécessaires pour positionner les pièces sur le plan d'assemblage, ce qui engendrait un temps supplémentaire pour l'assemblage.

En ce qui concerne le ressenti, les résultats de NASA-TLX montrent que, pendant les travaux d'assemblage avec la méthode FARO®, nous constatons une réduction de la charge mentale, grâce aux instructions projetées et au guidage visuel en temps réel. Tandis qu'avec la méthode manuelle, les participants ressentent beaucoup de charge mentale, physique et temporelle. Cela s'explique, par le fait que pendant l'assemblage avec la méthode manuelle des tâches complexes de mesurage avec le mètre à mesurer sont nécessaires pour positionner les pièces.

RECOMMANDATIONS

Ces résultats fournissent des informations précieuses sur les considérations pratiques pour la mise en œuvre d'une méthode d'assemblage avec un système de projections d'instructions comme le FARO et proposent des solutions pour améliorer la productivité et l'efficacité des travailleurs. La méthode FARO® offre certes plus précision, cependant avec certaines avec des formes complexes, il est plus difficile de reproduire l'empreinte, ce qui peut engendrer des erreurs pendant les processus d'assemblage. Ces résultats pourraient servir pour de prochaines études permettant ainsi d'approfondir la distinction des pièces favorables pour l'utilisation de la méthode FARO®.

Par ailleurs, la table d'assemblage est adaptée pour l'assemblage debout. Néanmoins, en ne permettant aucun ajustement, elle ne peut pas garantir une posture ergonomique confortable pour 90 à 95 % d'une population de participants (es) nord-américains. De ce fait, plusieurs risques ergonomiques, comme une flexion sagittale du tronc pendant l'assemblage, une sollicitation de la ceinture scapulaire qui n'est maintenue d'aucune façon et un risque de diminution de la précision et de la performance existent. Il serait alors judicieux d'utiliser une table ajustable en hauteur pour la suite des expérimentations.

ANNEXE I

Impact des systèmes d'assistance basés sur la projection pour améliorer la courbe d'apprentissage

La courbe d'apprentissage n'a pas fait l'objet de notre étude. Les participants ont fait l'assemblage une seule fois par méthode d'assemblage.

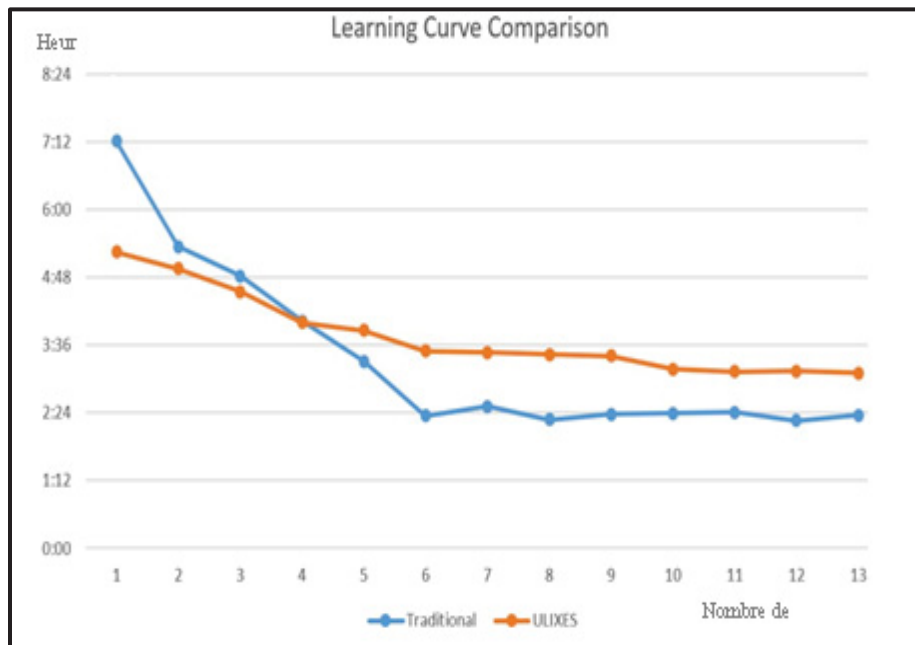


Figure-A I-1 Comparaison des courbes d'apprentissage
Tirée de Mark, B. G., Rauch, E., Matt, D. T., 2020

ANNEXE II

Analyse ergonomique d'un procédé d'assemblage

Analyse ergonomique de l'assemblage d'un produit

Lors d'un assemblage d'un produit, les opérateurs effectuent diverses tâches dans des postures défavorables causant des maladies induites par le travail. Travailler en position à genoux ou bras au-dessus de la tête sont deux postures qui se produisent souvent (Beub et al. 2019). L'analyse ergonomique permet alors une évaluation des risques ergonomiques potentiels lors de l'assemblage et permet de justifier la pertinence d'un système d'assistance numérique. Cette analyse ergonomique peut se faire sur un processus existant ou sur un futur processus de travail par une simulation ergonomique par réalité virtuelle (Beub et al. 2019).

Analyse ergonomique avec processus d'évaluation

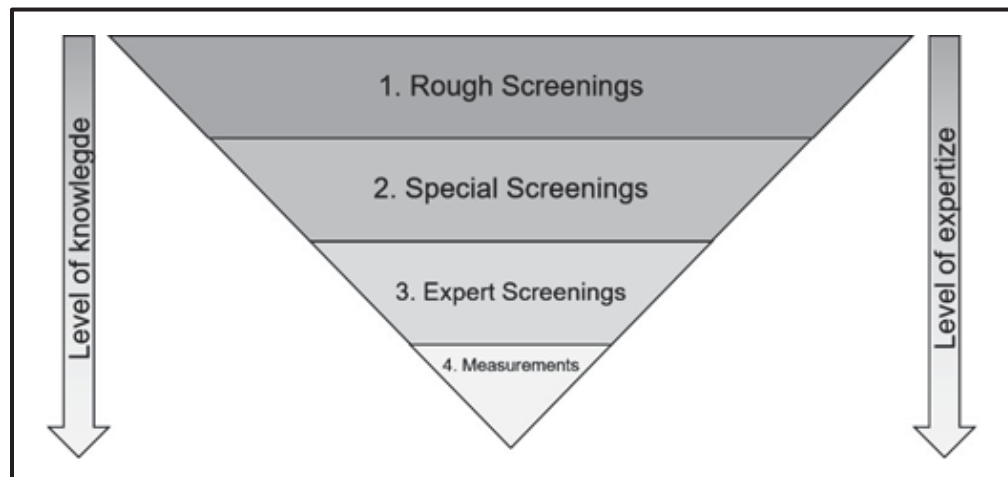


Figure-A II-1 Catégories d'identification et d'évaluation des risques, tirée de Beub et al., 2019

Analyse ergonomique par simulation avec la réalité virtuelle (RV)

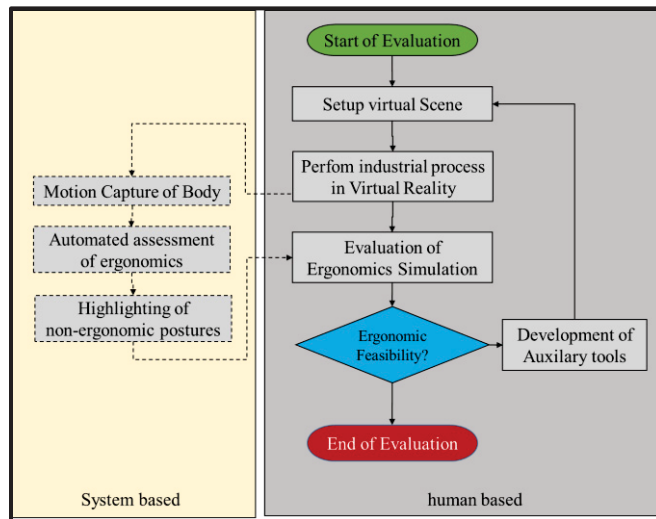


Figure-A II-2 Organigramme de l'approche de modélisation centrée sur l'humain basée sur la réalité virtuelle, tiré de Beub et al. 2019

Les outils de l'internet des objets favorisant le bien-être professionnel

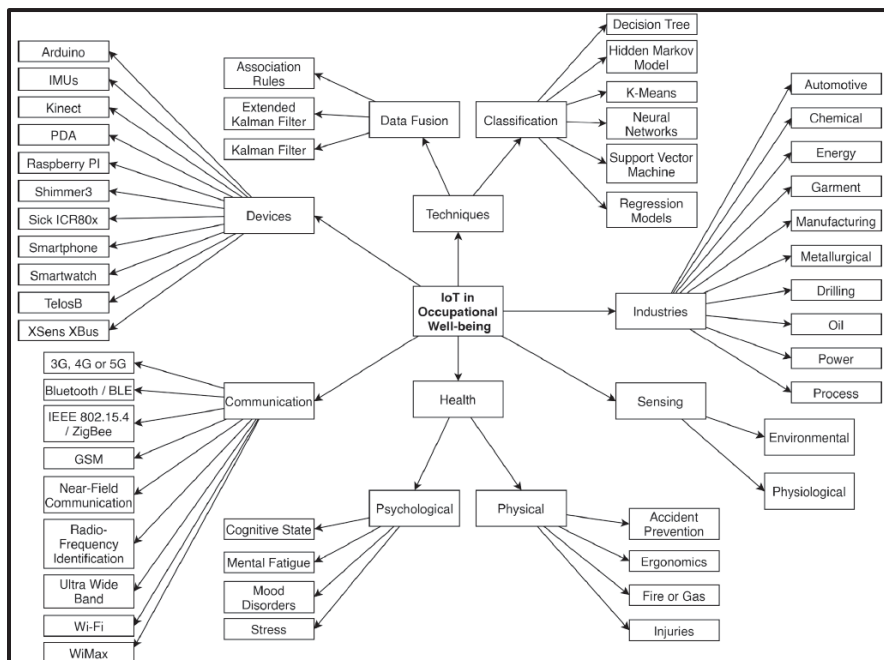


Figure-A II-3 Internet des objets pour le bien-être au travail, tirée de Bavaresco et Al, 2021

ANNEXE III

Systèmes d'assistance numériques pour des personnes ayant des limitations fonctionnelles

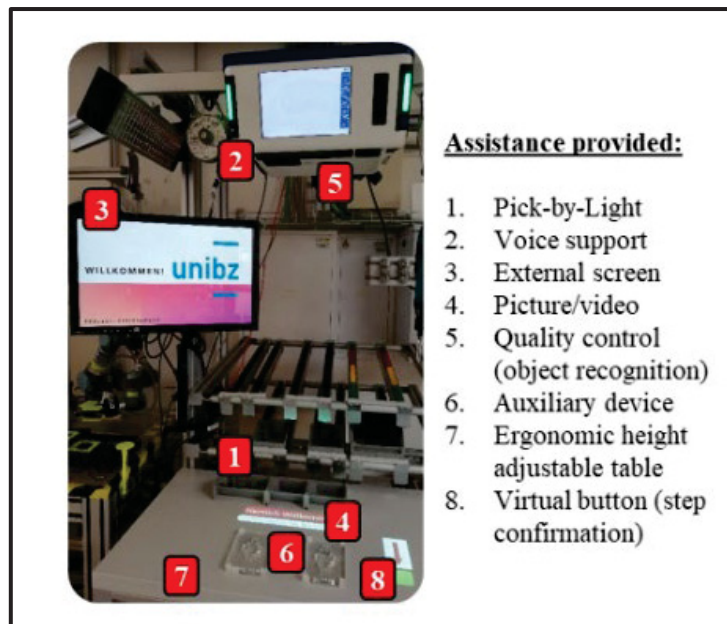


Figure-A III-1 Lieu de travail équipé de systèmes d'assistance, tirée de Mark, B. G., Rauch, E., Matt, D. T. 2021

ANNEXE IV

Relation entre l'opérateur et l'interface du système d'assistance

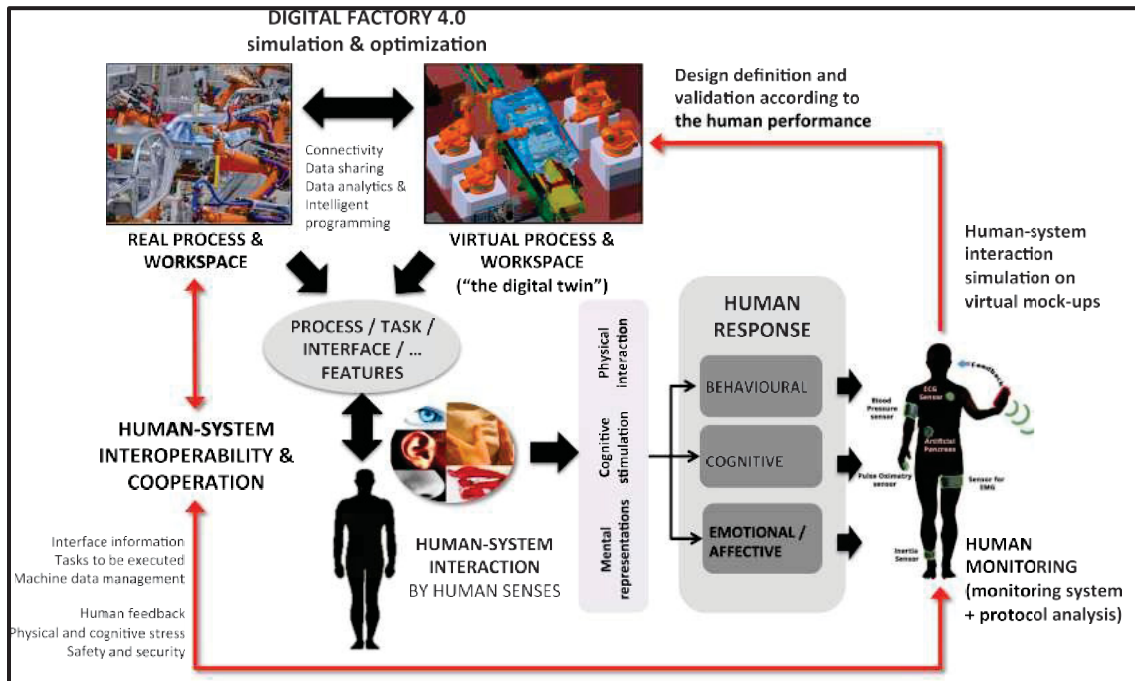


Figure-A IV-1 Cadre général de l'approche opérateur 4.0
Tirée de Peruzzini, Margherita et Fabio Grandi, 2020

ANNEXE V

Systèmes de mesures en métrologie à grande échelle

Technologies assurant la conformité du produit

Aux fins d'assurance qualité et de conformité, des systèmes de métrologie de coordonnées 3D et des procédures de planification des mesures sont intégrés pour fournir une analyse et une rétroaction en temps réel aux concepteurs et aux planificateurs. Pour soutenir ce domaine, de nouveaux processus d'amélioration de la capacité de mesure ont été développés et déployés depuis deux décennies.

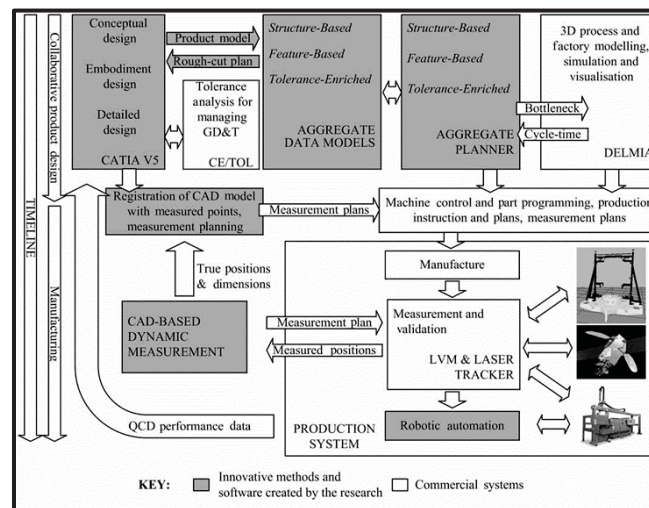


Figure-A V-1 Intégration verticale de systèmes propriétaires avec la technologie de planification des processus agrégés, tirée de Maropoulos et Zhang, 2007

ANNEXE VI

Déviations méthode FARO vs méthode manuelle

Tableau A VI-1 Déviations FARO® vs Manuelle

CAD	Forme	Manuel	FARO	Opérateur
CAD2	Entité géométrique 3	2,032	0,918	P1
CAD2	Entité géométrique 4	11,457	1,89	
CAD2	Entité géométrique 5	19,022	1,284	
CAD2	Entité géométrique 6	10,903	1,078	
CAD2	Entité géométrique 7	8,649	0,708	
CAD2	Entité géométrique 8	*	1,586	
CAD3	Entité géométrique 2	8,802	2,001	
CAD3	Entité géométrique 3	*	1,79	
CAD3	Entité géométrique 4	2,804	1,341	
CAD3	Entité géométrique 5	5,571	4,235	
CAD3	Entité géométrique 7	10,334	*	
CAD3	Entité géométrique 8	*	0,449	
CAD3	Entité géométrique 9	16,837	1,761	
CAD6	Entité géométrique 2	*	1,721	
CAD6	Entité géométrique 3	2,332	0,699	
CAD6	Entité géométrique 4	5,718	2,561	
CAD6	Entité géométrique 5	16,218	1,284	
CAD6	Entité géométrique 6	6,345	0,435	
CAD6	Entité géométrique 7	4,377	0,813	
CAD2	Entité géométrique 3	4,493	0,918	P2
CAD2	Entité géométrique 4	5,904	1,89	
CAD2	Entité géométrique 5	2,336	1,284	
CAD2	Entité géométrique 6	1,096	1,078	
CAD2	Entité géométrique 7	5,044	0,708	
CAD2	Entité géométrique 8	4,515	1,586	
CAD3	Entité géométrique 2	2,574	0,517	
CAD3	Entité géométrique 3	3,825	1,981	
CAD3	Entité géométrique 4	2,21	0,5	
CAD3	Entité géométrique 5	0,658	0,898	
CAD3	Entité géométrique 7	2,32	2,443	
CAD3	Entité géométrique 8	*	1,145	
CAD3	Entité géométrique 9	1,931	0,731	
CAD6	Entité géométrique 2	2,736	2,087	
CAD6	Entité géométrique 3	2,793	1,907	

CAD	Forme	Manuel	FARO	Opérateur
CAD6	Entité géométrique 4	2,476	1,416	
CAD6	Entité géométrique 5	4,308	1,732	
CAD6	Entité géométrique 6	1,584	2,269	
CAD6	Entité géométrique 7	2,127	1,206	
CAD2	Entité géométrique 3	36,37	1,792	P3
CAD2	Entité géométrique 4	*	4,679	
CAD2	Entité géométrique 5	*	1,906	
CAD2	Entité géométrique 6	*	1,426	
CAD2	Entité géométrique 7	*	1,193	
CAD2	Entité géométrique 8	24,786	1,98	
CAD3	Entité géométrique 2	*	2,321	
CAD3	Entité géométrique 3	*	4,182	
CAD3	Entité géométrique 4	*	1,154	
CAD3	Entité géométrique 5	*	4,337	
CAD3	Entité géométrique 7	2,659	2,118	
CAD3	Entité géométrique 8	*	0,437	
CAD3	Entité géométrique 9	16,798	1,206	
CAD6	Entité géométrique 2	8,983	3,214	
CAD6	Entité géométrique 3	0,308	0,774	
CAD6	Entité géométrique 4	4,068	*	
CAD6	Entité géométrique 5	20,055	2,368	
CAD6	Entité géométrique 6	*	2,436	
CAD6	Entité géométrique 7	*	1,829	
CAD2	Entité géométrique 3	*	-1,305	P4
CAD2	Entité géométrique 4	*	4,487	
CAD2	Entité géométrique 5	*	2,857	
CAD2	Entité géométrique 6	*	3,793	
CAD2	Entité géométrique 7	2,167	1,296	
CAD2	Entité géométrique 8	*	*	
CAD3	Entité géométrique 2	2,613	1,599	
CAD3	Entité géométrique 3	7,429	3,293	
CAD3	Entité géométrique 4	13,103	2,068	
CAD3	Entité géométrique 5	9,78	1,305	
CAD3	Entité géométrique 7	3,289	1,625	
CAD3	Entité géométrique 8	3,997	2,262	
CAD3	Entité géométrique 9	2,428	0,775	
CAD6	Entité géométrique 2	*	0,484	
CAD6	Entité géométrique 3	*	3,145	
CAD6	Entité géométrique 4	6,49	2,992	
CAD6	Entité géométrique 5	2,209	2,003	

CAD	Forme	Manuel	FARO	Opérateur
CAD6	Entité géométrique 6	9,557	1,865	
CAD6	Entité géométrique 7	4,477	2,057	
CAD2	Entité géométrique 3	4,051	-2,375	P5
CAD2	Entité géométrique 4	3,868	3,95	
CAD2	Entité géométrique 5	5,112	2,041	
CAD2	Entité géométrique 6	3,191	4,235	
CAD2	Entité géométrique 7	7,349	1,046	
CAD2	Entité géométrique 8	7,746	2,085	
CAD3	Entité géométrique 2	1,036	1,13	
CAD3	Entité géométrique 3	2,259	1,949	
CAD3	Entité géométrique 4	2,469	2,92	
CAD3	Entité géométrique 5	3,09	2,74	
CAD3	Entité géométrique 7	1,344	2,778	
CAD3	Entité géométrique 8	3,128	2,82	
CAD3	Entité géométrique 9	2,212	2,628	
CAD6	Entité géométrique 2	8,501	1,042	
CAD6	Entité géométrique 3	8,443	1,773	
CAD6	Entité géométrique 4	5,719	2,305	
CAD6	Entité géométrique 5	2,404	1,473	
CAD6	Entité géométrique 6	4,591	3,558	
CAD6	Entité géométrique 7	5,117	2,106	
CAD2	Entité géométrique 3	12,843	-1,661	P6
CAD2	Entité géométrique 4	13,192	3,103	
CAD2	Entité géométrique 5	22,171	4,143	
CAD2	Entité géométrique 6	19,991	5,631	
CAD2	Entité géométrique 7	2,954	*	
CAD2	Entité géométrique 8	19,867	*	
CAD3	Entité géométrique 2	7,95	1,58	
CAD3	Entité géométrique 3	13,363	1,379	
CAD3	Entité géométrique 4	6,326	0,279	
CAD3	Entité géométrique 5	5,133	1,44	
CAD3	Entité géométrique 7	2,375	2,417	
CAD3	Entité géométrique 8	16,436	0,933	
CAD3	Entité géométrique 9	2,169	1,75	
CAD6	Entité géométrique 2	7,498	1,842	
CAD6	Entité géométrique 3	7,559	2,009	
CAD6	Entité géométrique 4	14,832	1,401	
CAD6	Entité géométrique 5	11,004	2,901	
CAD6	Entité géométrique 6	23,377	1,963	
CAD6	Entité géométrique 7	11,302	1,243	

CAD	Forme	Manuel	FARO	Opérateur
CAD2	Entité géométrique 3	25,545	-0,769	P7
CAD2	Entité géométrique 4	18,745	5,651	
CAD2	Entité géométrique 5	6,117	1,774	
CAD2	Entité géométrique 6	14,365	2,125	
CAD2	Entité géométrique 7	8,256	1,791	
CAD2	Entité géométrique 8	12,209	2,324	
CAD3	Entité géométrique 2	3,364	1,55	
CAD3	Entité géométrique 3	14,578	2,871	
CAD3	Entité géométrique 4	16,895	0,571	
CAD3	Entité géométrique 5	2,8	0,879	
CAD3	Entité géométrique 7	1,975	2,582	
CAD3	Entité géométrique 8	3,095	2,546	
CAD3	Entité géométrique 9	6,754	*	
CAD6	Entité géométrique 2	12,374	1,335	
CAD6	Entité géométrique 3	7,643	2,152	
CAD6	Entité géométrique 4	17,456	1,914	
CAD6	Entité géométrique 5	12,915	1,873	
CAD6	Entité géométrique 6	13,02	2,99	
CAD6	Entité géométrique 7	11,241	3,089	
CAD2	Entité géométrique 3	12,337	-2,084	P8
CAD2	Entité géométrique 4	6,713	3,165	
CAD2	Entité géométrique 5	14,973	3,609	
CAD2	Entité géométrique 6	6,156	3,383	
CAD2	Entité géométrique 7	0,711	1,38	
CAD2	Entité géométrique 8	2,186	2,032	
CAD3	Entité géométrique 2	4,221	0,999	
CAD3	Entité géométrique 3	8,024	1,2	
CAD3	Entité géométrique 4	3,355	0,699	
CAD3	Entité géométrique 5	2,967	0,608	
CAD3	Entité géométrique 7	1,65	1,938	
CAD3	Entité géométrique 8	3,746	0,731	
CAD3	Entité géométrique 9	13,729	0,721	
CAD6	Entité géométrique 2	0,754	1,817	
CAD6	Entité géométrique 3	1,644	1,477	
CAD6	Entité géométrique 4	7,169	1,653	
CAD6	Entité géométrique 5	2,848	0,974	
CAD6	Entité géométrique 6	6,154	4,876	
CAD6	Entité géométrique 7	5,026	0,952	
CAD2	Entité géométrique 3	38,106	-0,743	P9
CAD2	Entité géométrique 4	1,286	3,867	

CAD	Forme	Manuel	FARO	Opérateur
CAD2	Entité géométrique 5	11,886	1,417	
CAD2	Entité géométrique 6	28,471	2,556	
CAD2	Entité géométrique 7	*	*	
CAD2	Entité géométrique 8	*	*	
CAD3	Entité géométrique 2	11,366	1,191	
CAD3	Entité géométrique 3	7,665	1,662	
CAD3	Entité géométrique 4	8,749	0,792	
CAD3	Entité géométrique 5	*	0,676	
CAD3	Entité géométrique 7	1,741	3,536	
CAD3	Entité géométrique 8	*	6,795	
CAD3	Entité géométrique 9	17,963	*	
CAD6	Entité géométrique 2	8,074	1,415	
CAD6	Entité géométrique 3	8,135	2,242	
CAD6	Entité géométrique 4	9,544	1,892	
CAD6	Entité géométrique 5	7,622	1,167	
CAD6	Entité géométrique 6	7,399	1,263	
CAD6	Entité géométrique 7	5,73	1,263	
CAD2	Entité géométrique 3	34,133	-0,773	P10
CAD2	Entité géométrique 4	*	1,14	
CAD2	Entité géométrique 5	28,278	3,227	
CAD2	Entité géométrique 6	11,413	2,474	
CAD2	Entité géométrique 7	27,695	4,441	
CAD2	Entité géométrique 8	*	1,267	
CAD3	Entité géométrique 2	*	4,724	
CAD3	Entité géométrique 3	*	3,754	
CAD3	Entité géométrique 4	*	1,574	
CAD3	Entité géométrique 5	*	6,017	
CAD3	Entité géométrique 7	11,925	2,467	
CAD3	Entité géométrique 8	*	27,45	
CAD3	Entité géométrique 9	*	*	
CAD6	Entité géométrique 2	-5,023	1,547	
CAD6	Entité géométrique 3	3,173	1,94	
CAD6	Entité géométrique 4	*	2,33	
CAD6	Entité géométrique 5	*	1,22	
CAD6	Entité géométrique 6	*	6,105	
CAD6	Entité géométrique 7	*	2,558	

Tableau A VI-2 Déviations FARO vs Manuel - Éléments de localisation

CAD	Forme	Manuel	FARO	Opérateur
CAD 2	Cylindre 1 : Localisation	*	1,595	P1
	Cylindre 2 : Localisation	2,307	0,491	
	Cylindre 3 : Localisation	12,755	1,509	
	Entité géométrique 1 : Localisation	19,074	2,137	
	Entité géométrique 2 : Localisation	16,684	0,801	
CAD 3	Cylindre 1 : Localisation	7,523	1,868	
	Cylindre 2 : Localisation	*	1,871	
	Cylindre 3 : Localisation	3,554	3,663	
	Entité géométrique 1 : Localisation	9,428	2,247	
CAD 6	Cylindre 1 : Localisation	*	0,984	
	Cylindre 2 : Localisation	*	1,718	
	Cylindre 3 : Localisation	*	3,310	
	Entité géométrique 1 : Localisation	*	0,880	
	Entité géométrique 8 : Localisation	11,163	2,508	
CAD 2	Cylindre 1 : Localisation	4,518	1,595	P2
	Cylindre 2 : Localisation	4,152	0,491	
	Cylindre 3 : Localisation	6,938	1,509	
	Entité géométrique 1 : Localisation	3,478	2,137	
	Entité géométrique 2 : Localisation	15,454	0,801	
CAD 3	Cylindre 1 : Localisation	4,435	1,580	
	Cylindre 2 : Localisation	2,071	2,464	
	Cylindre 3 : Localisation	0,487	0,586	
	Entité géométrique 1 : Localisation	2,432	2,156	
CAD 6	Cylindre 1 : Localisation	2,819	1,856	
	Cylindre 2 : Localisation	*	2,977	
	Cylindre 3 : Localisation	8,306	1,115	
	Entité géométrique 1 : Localisation	*	1,427	
	Entité géométrique 8 : Localisation	8,132	1,098	
CAD 2	Cylindre 1 : Localisation	6,919	1,187	P3

CAD	Forme	Manuel	FARO	Opérateur
	Cylindre 2 : Localisation	*	1,196	
	Cylindre 3 : Localisation	17,184	2,354	
	Entité géométrique 1 : Localisation	*	*	
	Entité géométrique 2 : Localisation	*	*	
CAD 3	Cylindre 1 : Localisation	*	3,513	
	Cylindre 2 : Localisation	4,960	14,699	
	Cylindre 3 : Localisation	*	3,530	
	Entité géométrique 1 : Localisation	*	5,911	
CAD 6	Cylindre 1 : Localisation	*	3,054	
	Cylindre 2 : Localisation	*	3,281	
	Cylindre 3 : Localisation	11,193	1,081	
	Entité géométrique 1 : Localisation	*	3,405	
	Entité géométrique 8 : Localisation	10,981	0,879	
CAD 2	Cylindre 1 : Localisation	8,732	0,606	P4
	Cylindre 2 : Localisation	*	2,656	
	Cylindre 3 : Localisation	10,492	1,259	
	Entité géométrique 1 : Localisation	9,937	2,277	
	Entité géométrique 2 : Localisation	*	*	
CAD 3	Cylindre 1 : Localisation	*	2,890	
	Cylindre 2 : Localisation	13,382	2,514	
	Cylindre 3 : Localisation	*	0,288	
	Entité géométrique 1 : Localisation	13,590	1,917	
CAD 6	Cylindre 1 : Localisation	*	2,165	
	Cylindre 2 : Localisation	2,292	3,882	
	Cylindre 3 : Localisation	*	3,688	
	Entité géométrique 1 : Localisation	1,767	3,311	
	Entité géométrique 8 : Localisation	*	1,719	
CAD 2	Cylindre 1 : Localisation	8,686	1,611	P5
	Cylindre 2 : Localisation	7,436	2,763	
	Cylindre 3 : Localisation	6,757	2,148	

CAD	Forme	Manuel	FARO	Opérateur
	Entité géométrique 1 : Localisation	4,661	2,365	
	Entité géométrique 2 : Localisation	4,409	2,894	
CAD 3	Cylindre 1 : Localisation	1,877	1,857	
	Cylindre 2 : Localisation	2,370	2,452	
	Cylindre 3 : Localisation	3,341	1,714	
	Entité géométrique 1 : Localisation	1,457	2,291	
CAD 6	Cylindre 1 : Localisation	13,660	3,108	
	Cylindre 2 : Localisation	5,916	2,271	
	Cylindre 3 : Localisation	4,689	2,120	
	Entité géométrique 1 : Localisation	5,767	2,044	
	Entité géométrique 8 : Localisation	3,539	1,014	
CAD 2	Cylindre 1 : Localisation	6,472	2,545	P6
	Cylindre 2 : Localisation	8,173	0,978	
	Cylindre 3 : Localisation	18,531	*	
	Entité géométrique 1 : Localisation	2,262	3,074	
	Entité géométrique 2 : Localisation	17,177	0,550	
CAD 3	Cylindre 1 : Localisation	11,143	1,562	
	Cylindre 2 : Localisation	4,479	3,101	
	Cylindre 3 : Localisation	7,866	1,233	
	Entité géométrique 1 : Localisation	4,150	2,117	
CAD 6	Cylindre 1 : Localisation	10,365	1,909	
	Cylindre 2 : Localisation	4,931	1,781	
	Cylindre 3 : Localisation	0,426	1,722	
	Entité géométrique 1 : Localisation	5,003	1,231	
	Entité géométrique 8 : Localisation	1,608	0,967	
CAD 2	Cylindre 1 : Localisation	*	1,358	P7
	Cylindre 2 : Localisation	*	0,861	
	Cylindre 3 : Localisation	10,912	1,771	
	Entité géométrique 1 : Localisation	12,416	1,334	

CAD	Forme	Manuel	FARO	Opérateur
	Entité géométrique 2 : Localisation	5,115	1,177	
CAD 3	Cylindre 1 : Localisation	14,262	2,510	
	Cylindre 2 : Localisation	18,013	2,727	
	Cylindre 3 : Localisation	17,198	0,473	
	Entité géométrique 1 : Localisation	18,745	2,430	
CAD 6	Cylindre 1 : Localisation	11,601	2,080	
	Cylindre 2 : Localisation	18,470	2,144	
	Cylindre 3 : Localisation	*	2,285	
	Entité géométrique 1 : Localisation	18,429	1,451	
	Entité géométrique 8 : Localisation	*	1,250	
CAD 2	Cylindre 1 : Localisation	3,853	1,676	P8
	Cylindre 2 : Localisation	7,731	1,948	
	Cylindre 3 : Localisation	1,001	0,910	
	Entité géométrique 1 : Localisation	19,081	2,638	
	Entité géométrique 2 : Localisation	5,842	1,484	
CAD 3	Cylindre 1 : Localisation	7,023	0,640	
	Cylindre 2 : Localisation	13,164	1,727	
	Cylindre 3 : Localisation	3,778	1,334	
	Entité géométrique 1 : Localisation	13,587	1,308	
CAD 6	Cylindre 1 : Localisation	2,353	1,660	
	Cylindre 2 : Localisation	12,564	1,269	
	Cylindre 3 : Localisation	4,510	2,394	
	Entité géométrique 1 : Localisation	12,488	0,892	
	Entité géométrique 8 : Localisation	4,304	1,696	
CAD 2	Cylindre 1 : Localisation	5,414	0,456	P9
	Cylindre 2 : Localisation	2,722	1,076	
	Cylindre 3 : Localisation	0,094	1,662	
	Entité géométrique 1 : Localisation	11,167	2,225	
	Entité géométrique 2 : Localisation	5,902	1,277	
CAD 3	Cylindre 1 : Localisation	11,707	1,258	

CAD	Forme	Manuel	FARO	Opérateur
	Cylindre 2 : Localisation	9,598	1,716	
	Cylindre 3 : Localisation	*	0,380	
	Entité géométrique 1 : Localisation	9,720	1,971	
CAD 6	Cylindre 1 : Localisation	*	1,496	
	Cylindre 2 : Localisation	6,091	2,184	
	Cylindre 3 : Localisation	11,398	3,559	
	Entité géométrique 1 : Localisation	6,616	1,437	
	Entité géométrique 8 : Localisation	10,920	1,482	
CAD 2	Cylindre 1 : Localisation	*	*	P10
	Cylindre 2 : Localisation	*	2,460	
	Cylindre 3 : Localisation	*	1,740	
	Entité géométrique 1 : Localisation	7,108	3,390	
	Entité géométrique 2 : Localisation	9,944	1,547	
CAD 3	Cylindre 1 : Localisation	*	5,172	
	Cylindre 2 : Localisation	*	2,909	
	Cylindre 3 : Localisation	*	4,111	
	Entité géométrique 1 : Localisation	*	4,135	
CAD 6	Cylindre 1 : Localisation	*	1,721	
	Cylindre 2 : Localisation	*	5,818	
	Cylindre 3 : Localisation	6,089	7,190	
	Entité géométrique 1 : Localisation	*	5,887	
	Entité géométrique 8 : Localisation	10,847	7,206	

¹ Le « * » indique une donnée manquante.

Tableau A VI-3 Temps d'assemblage des configurations spatiales

CAD	Manuel (min)	FARO (min)	Opérateur
CAD 2	11,96	3	P1
CAD 3	7,95	2,23	P1
CAD 6	7,75	1,35	P1
CAD 2	19,88	2,68	P2
CAD 3	12,38	2,48	P2
CAD 6	12,76	1,7	P2
CAD 2	6,13	2,85	P3
CAD 3	4,75	1,66	P3
CAD 6	3,7	1,65	P3
CAD 2	12,95	3,8	P4
CAD 3	7,33	2,35	P4
CAD 6	7,9	2,46	P4
CAD 2	13,35	3,46	P5
CAD 3	9,41	1,6	P5
CAD 6	11,03	1,57	P5
CAD 2	11,97	1,8	P6
CAD 3	11,52	3,63	P6
CAD 6	10,9	1,38	P6
CAD 2	33,1	5,00	P7
CAD 3	8,6	3,78	P7
CAD 6	7,26	2,38	P7
CAD 2	24,09	2,05	P8
CAD 3	12,29	2,08	P8
CAD 6	17,30	1,76	P8
CAD 2	23,26	5,43	P9
CAD 3	15,31	3,1	P9
CAD 6	12,74	2,17	P9
CAD 2	8,17	3,58	P10
CAD 3	4,52	2,25	P10
CAD 6	4,58	1,6	P10

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bartuska, B., Teischinger, A., & Riegler, M. (2022). Effects of spatial augmented reality assistance on the efficiency of prefabricating timber frame walls. *Wood Material Science & Engineering*, 1–10. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2085528>
- Bavaresco, R., Arruda, H., Rocha, E., Barbosa, J., & Li, G.-P. (2021). Internet of Things and occupational well-being in Industry 4.0: A systematic mapping study and taxonomy. *Computers & Industrial Engineering*, 161, 107670. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107670>
- Beuß, F., Sender, J., & Flügge, W. (2019). Ergonomics simulation in aircraft manufacturing – Methods and potentials. *Procedia CIRP*, 81, 742–746. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.187>
- Deng, Z., Li, S., & Huang, X. (2018). A flexible and cost-effective compensation method for leveling using large-scale coordinate measuring machines and its application in aircraft digital assembly. *Measurement Science and Technology*, 29(6), 065904. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aab94c>
- Drouot, A., Zhao, R., Irving, L., Sanderson, D., & Ratchev, S. (2018). Measurement assisted assembly for high accuracy aerospace manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 393–398. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.326>
- Grandjean, E., & Kroemer, K. H. E. (1997). Fitting the task to the human: A textbook of occupational ergonomics (5 th ed.). London, UK : Taylor & Francis.
- Hinrichsen, A., & Bornewasser, T. (2020). Information management strategies in manual assembly. In *IHIET-AI 2020 Conference* (Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 1152).
- Howard, S., Jang, R., O’Keefe, V., Manning, K., Trott, R., Hodacre, A.-L., & Spoehr, J. (2023). Visual inspection with augmented reality head-mounted display: An Australian usability case study. *Human Factors and Ergonomics Research Group*. <https://doi.org/10.1002/hfm.20986>
- Kim, J., & Park, S. (2019). Cognitive load reduction in manual assembly using augmented projection systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(5), 1983–1995. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1412-6>
- Lee, S., Kim, D., & Choi, J. (2020). Ergonomic evaluation of physical jigs in manual assembly tasks. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 76, 102933. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2020.102933>

- Lu, Y., Liu, W., Zhang, Y., Xing, H., Li, J., Liu, S., & Zhang, L. (2020). An accurate calibration method of large-scale reference system. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(9), 6957–6967. <https://doi.org/10.1109/TIM.2020.2978956>
- Mark, B. G., Rauch, E., & Matt, D. T. (2020). Study of the impact of projection-based assistance systems for improving the learning curve in assembly processes. *Procedia CIRP*, 88, 98–103. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.018>
- Mark, B. G., Rauch, E., & Matt, D. T. (2021). The application of digital worker assistance systems to support workers with disabilities in assembly processes. *Procedia CIRP*, 103, 243–249. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.10.039>
- Mark, B. G., Rauch, E., & Matt, D. T. (2021). Worker assistance systems in manufacturing: A review of the state of the art and future directions. *Journal of Manufacturing Systems*, 59, 228–250. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.02.017>
- Maropoulos, P. G., Muelaner, J. E., Summers, M. D., & Martin, O. C. (2014). A new paradigm in large-scale assembly—Research priorities in measurement assisted assembly. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(1–4), 621–633. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5283-4>
- Maropoulos, P. G., Zhang, D., Chapman, P., Bramall, D. G., & Rogers, B. C. (2007). Key digital enterprise technology methods for large volume metrology and assembly integration. *International Journal of Production Research*, 45(7), 1539–1559. <https://doi.org/10.1080/00207540600942326>
- Mattsson, S. (2018). Towards increasing operator wellbeing and performance in complex assembly (Doctoral dissertation, Chalmers University of Technology). Chalmers University of Technology. <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/500035/500035.pdf>
- Müller, T., Schneider, F., & Weber, C. (2021). Laser-guided assembly systems: Performance analysis and industrial application. *Procedia CIRP*, 96, 215–220. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.063>
- Pokorni, B., & Constantinescu, C. (2021). Design and configuration of digital assistance systems in manual assembly of variant-rich products based on customer journey mapping. *Procedia CIRP*, 104, 1777–1782. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.299>
- Rupprecht, P., Kueffner-McCauley, H., Trimmel, M., Hornacek, M., & Schlund, S. (2022). Advanced adaptive spatial augmented reality utilizing dynamic in-situ projection in industrial site assembly. *Procedia CIRP*, 107, 937–942.

- Tang, W., Yan, T., Sun, J., & Li, Y. (2025). Precision assembly error analysis of parts based on multi-constraint surface matching. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 10, 1519646. <https://doi.org/10.3389/fmech.2024.1519646>
- Tilley, A. R. (2002). *The measure of man and woman: Human factors in design*. Revised edition. New York, NY : John Wiley & Sons.
- Zhou, Y., Wang, H., & Liu, J. (2018). Design and application of assembly jigs in mass production environments. *Journal of Manufacturing Systems*, 47, 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.04.002>