

# Analyse de l'erreur du positionnement assisté par la métrologie 3D sans contact

par

Laurent ÉMOND-GIRARD

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

MONTRÉAL, LE 27 AVRIL 2022

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés, Laurent Émond-Girard, 2022

©Tous droits réservés

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

**PRÉSENTATION DU JURY**

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

M. Louis Rivest, président du jury  
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Marc-Antoine Drouin, examinateur externe  
Conseil national de recherches Canada

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

LE 8 AVRIL 2022

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE





*À mon Père*  
*Merci infiniment !*



## **REMERCIEMENTS**

Tout d'abord, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de mémoire, M. Antoine Tahan. Je le remercie pour son encadrement, son support et la confiance qu'il a eue envers moi tout au long de mon projet. Je tiens aussi à remercier M. Joël Grignon, qui m'a fourni un support inestimable au niveau logistique pour effectuer mes différentes manipulations expérimentales.

Tout au long de mon projet, j'ai travaillé chez Innovmetric, une compagnie produisant un logiciel de métrologie, qui m'a notamment aidé financièrement grâce au programme MITACS Accélération. J'aimerais tout d'abord remercier M. Marc Soucy, président de la compagnie Innovmetric, pour son soutien et sa confiance.

J'aimerais aussi adresser un remerciement spécial à M. Éric Roberge, vice-président innovation chez Innovmetric. Il a joué pour moi un rôle important de mentor dans les dernières années et a dans ce sens grandement influencé ma future carrière.

Finalement, j'aimerais exprimer ma plus profonde gratitude envers mon père pour son soutien inconditionnel durant tout mon parcours académique. Sans lui, ce projet n'aurait pas été possible.



# **Analyse de l'erreur du positionnement assisté par la métrologie 3D sans contact**

Laurent ÉMOND-GIRARD

## **RÉSUMÉ**

Ce mémoire présente un travail réalisé sous la thématique de l'assemblage assisté par la métrologie 3D. Aujourd'hui, dans les secteurs manufacturiers liés à l'industrie aéronautique et celle des transports, l'assemblage des divers composants est effectué en grande partie à l'aide de gabarits dédiés uniquement à cette tâche. Avec l'avènement de nouvelles technologies dites « numériques », ces industries connaissent présentement d'importants changements et modernisations. L'accessibilité croissante des systèmes de mesure sans contact et cette révolution industrielle qualifiée « Industrie 4.0 » influencent les processus d'assemblage conventionnels. Il est dorénavant envisageable d'employer des systèmes de métrologie 3D pour assister, en temps réel, les opérations de positionnement et d'orientation durant l'assemblage; il s'agit de l'assemblage assisté par la métrologie.

L'objectif de ce projet est d'estimer les performances métrologiques d'un système de mesure 3D par photogrammétrie associée à des artefacts, et qui est employé dans un tel processus d'assemblage. En effet, comme toute nouvelle technologie, le manque de connaissance et la nouveauté de l'approche présentent leur lot de problématiques. Le travail est basé sur les théories existantes d'évaluation de l'incertitude de mesure que nous adaptons et nous proposons, sous la forme d'une méthodologie, pour identifier les performances métrologiques d'une cellule d'assemblage par mesure 3D. La proposition finale présente une méthodologie expérimentale rigoureuse pour estimer la répétabilité et la reproductibilité du système. Elle présente aussi une approche pour identifier et modéliser le comportement de l'erreur dans le volume de travail.

**Mots clés :** Industrie 4.0, assemblage assisté par la métrologie, métrologie à grande échelle, analyse de système de mesure, répétabilité, reproductibilité



# **Measurement System Analysis of Measurement Assisted Assembly by non-Contact 3D Metrology**

Laurent ÉMOND-GIRARD

## **ABSTRACT**

This thesis presents a work addressing the theme of measurement assisted assembly using optical 3D metrology. Today, in aeronautic and transport manufacturing sectors, component assembly is carried out largely using dedicated jigs. With the advent of new digital technologies, these industries are undergoing significant adaptation and modernization. The increasing accessibility of non-contact measurement systems and the Industry 4.0 revolution both influence conventional assembly processes. It is now possible to use 3D metrology systems to assist, in real time, positioning and orientation operations during assembly; we call this measurement assisted assembly.

The objective of this project is to estimate the metrological performance of a photogrammetry 3D measurement system used in such an assembly process. Like any new technology, the lack of knowledge and the novelty of the approach present their share of problems. This work adapts and redefines existing theories of measurement uncertainty assessment into a methodology to identify the metrological performance of an assembly cell by 3D measurement. The final proposal presents a rigorous experimental methodology to estimate the repeatability and reproducibility of the system. Finally, it presents an approach to identify and model the behavior of error in the workspace.

**Keywords:** Industry 4.0, Measurement Assisted Assembly, Large Scale Metrology, Measurement System Analysis, Repeatability, Reproducibility





## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1    PROBLÉMATIQUE INDUSTRIELLE .....	3
1.1    Présentation de l'industrie automobile.....	3
1.2    Présentation de l'industrie aéronautique.....	4
1.3    Industrie 4.0 .....	5
1.4    Assemblage assisté par la métrologie 3D .....	6
CHAPITRE 2    ÉTAT DE L'ART .....	9
2.1    Principes de bases de l'assemblage assisté par la métrologie.....	9
2.1.1    Assemblage de pièces souples (ou flexibles).....	10
2.1.2    Processus d'inspection .....	11
2.1.3    Processus de suivi de la position.....	11
2.1.4    Processus du gabarit actif.....	12
2.1.5    Processus du contrôle en boucle fermée .....	13
2.1.6    La traçabilité métrologique .....	14
2.2    Technologies de métrologie 3D .....	16
2.2.1    Méthodes sans contact .....	17
2.2.1.1    Scanner (laser & lumière structurée) .....	17
2.2.1.2    Radar laser .....	18
2.2.2    Méthodes avec contact.....	18
2.2.2.1    Traceur laser.....	18
2.2.2.2    iGPS .....	18
2.2.2.3    Appareil de photogrammétrie .....	19
2.2.3    Performances métrologiques des technologies .....	19
2.2.4    Fusion des données en métrologie 3D .....	21
2.2.4.1    Approche compétitive et coopérative .....	22
2.2.5    Principe de projection pour les technologies optiques.....	23
2.2.6    Prise en compte de l'effet de la gravité.....	24
2.3    Analyse de l'incertitude d'un système de mesure.....	25
2.3.1    Définition du système de mesure.....	27
2.3.2    Fonction de mesure .....	28
2.3.3    Incertitudes standards.....	28
2.3.4    Indices de performance du système de mesure.....	29
2.3.4.1    Biais du système .....	30
2.3.4.2    Linéarité du système .....	31
2.3.4.3    Stabilité du système .....	31
2.3.4.4    Répétabilité du système .....	32
2.3.4.5    Reproductibilité du système.....	33
2.3.5    Propagation des incertitudes .....	33
2.3.6    Propagation des incertitudes avec une approximation de série de Taylor .....	34

2.3.7	Propagation des incertitudes avec simulation Monte-Carlo .....	35
2.3.8	Évaluation de l'incertitude combinée par étude expérimentale .....	37
2.3.8.1	Étude empirique de l'incertitude de répétabilité et de biais .....	37
2.3.8.2	Étude empirique de l'incertitude de répétabilité et reproductibilité .....	40
2.3.9	Intervalles de confiance .....	42
2.3.10	Incertitude type de la capacité du système de mesure .....	42
2.3.11	Incertitude type de la performance du système de mesure .....	43
2.3.12	L'incertitude élargie du système de mesure .....	43
2.4	Conclusion du chapitre 2 .....	44
CHAPITRE 3 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE .....		45
3.1	Objectif du projet .....	45
3.2	Objectifs spécifiques .....	45
3.3	Hypothèses de travail .....	46
3.4	Développement d'un système de mesure .....	47
3.4.1	Conception d'artéfacts .....	48
3.4.2	Fonctionnement des artéfacts .....	51
3.4.3	Définition de la fonction de mesure .....	52
3.5	Méthodologie proposée .....	55
3.5.1	Conception d'un assemblage pour les manipulations expérimentales .....	55
3.5.2	Paramètres du système de mesure .....	57
3.5.3	Étude de répétabilité .....	58
3.5.4	Étude de répétabilité et reproductibilité .....	61
3.6	Manipulations expérimentales .....	63
3.6.1	Mesure de la position de référence .....	64
3.6.2	Préparation du système de photogrammétrie .....	65
3.6.3	Acquisition des données .....	66
CHAPITRE 4 EXPÉRIMENTATIONS & ANALYSE DES RÉSULTATS .....		67
4.1	Mesure de la position de référence sur une MMT .....	68
4.2	Analyse de l'effet du temps de chauffe .....	69
4.2.1	Analyse de l'effet du temps de chauffe sur la répétabilité du système .....	70
4.2.2	Analyse de l'effet du temps de chauffe sur le biais .....	73
4.2.3	Conclusion sur l'effet du temps de chauffe .....	75
4.3	Analyse de l'effet de la profondeur de champ et de la position .....	75
4.3.1	Analyse de l'effet de la profondeur de champ et de la position sur la répétabilité .....	76
4.3.2	Analyse de l'effet de la profondeur de champ et de la position sur le biais .....	81
4.3.3	Conclusion sur l'effet de la profondeur de champ et de la position .....	84
4.4	Analyse sur l'utilisation des dimensions réelles d'une pièce .....	84
4.5	Analyse de répétabilité et reproductibilité .....	86
CONCLUSION .....		91

RECOMMANDATIONS .....	93
ANNEXE I      MÉTHODE ALTERNATIVE DE CALCUL DE LA RÉPÉTABILITÉ..	97
ANNEXE II      ÉTUDE EMPIRIQUE DE L'INCERTITUDE DE LINÉARITÉ .....	99
ANNEXE III      FORMULES DÉTAILLÉES POUR L'ÉTUDE R&R .....	101
ANNEXE IV      CERTIFICAT DE CALIBRATION MMT.....	103
ANNEXE V      CERTIFICAT DE CALIBRATION C-TRACK™.....	113
ANNEXE VI      SPÉCIFICATION TECHNIQUES DU C-TRACK™.....	119
ANNEXE VII      DESSINS DE FABRICATIONS DES ARTÉFACTS.....	120
ANNEXE VIII    APPLICATION PERMETTANT L'ANALYSE DES RÉSULTATS ...	133
ANNEXE IX      RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX .....	137
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	169



## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1	Récapitulatif des technologies de métrologie 3D .....20
Tableau 2.2	Méthodes de propagation des incertitudes.....34
Tableau 3.1	Assemblage des artéfacts .....49
Tableau 3.2	Niveaux des facteurs candidats.....59
Tableau 4.1	Position de référence pour le point 1 .....68
Tableau 4.2	Position de référence pour le point 2 .....68
Tableau 4.3	Position de référence pour le point 3 .....69
Tableau 4.4	Position du C-Track™ lors de l'étude sur le temps de chauffe .....69
Tableau 4.5	Modèles de régression entre $EV$ en $X$ , $Y$ et $Z$ et $t$ .....71
Tableau 4.6	Modèle de régression entre le biais moyen en $Y$ et le temps de chauffe $t$ .....74
Tableau 4.7	Récapitulatif des modèles de régression entre $EV$ en $X$ , $Y$ et $Z$ et $P$ .....79
Tableau 4.8	Effet des dimensions réelles sur le point 1.....85
Tableau 4.9	Effet des dimensions réelles sur le point 2.....85
Tableau 4.10	Effet des dimensions réelles sur le point 3.....85
Tableau 4.11	Récapitulatif GR&R, point 1 .....87
Tableau 4.12	Récapitulatif GR&R, point 2 .....87
Tableau 4.13	Récapitulatif GR&R, point 3 .....88
Tableau 4.14	Récapitulatif GR&R, goujon .....88



## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Exemple d'un gabarit d'assemblage aéronautique, avec la permission de Bombardier Aéronautique.....4
Figure 2.1	Technologies de métrologie 3D à grand volume .....16
Figure 2.2	Principe de projection (Kyle et al., 2001) .....23
Figure 2.3	Performances du système de mesure en fonction des spécifications .....26
Figure 2.4	Les sources potentielles de variations d'un système de mesure .....27
Figure 2.5	Indices de performance du système de mesure.....30
Figure 2.6	Représentation schématique de l'erreur du biais .....31
Figure 2.7	Représentation schématique de l'erreur de linéarité.....31
Figure 2.8	Représentation schématique de la stabilité .....32
Figure 2.9	Représentation schématique de la répétabilité .....32
Figure 2.10	Représentation schématique de la reproductibilité .....33
Figure 2.11	Fonction du système de mesure .....33
Figure 2.12	Représentation schématique de la performance.....43
Figure 2.13	Facteurs et étendues de confiance .....44
Figure 3.1	Système de mesure par photogrammétrie, associé à des artefacts.....47
Figure 3.2	Cas types d'utilisation des artefacts .....48
Figure 3.3	Cible rétro-réfléctive double .....50
Figure 3.4	Spécifications techniques des artefacts.....51
Figure 3.5	Fonctionnement des artefacts.....52
Figure 3.6	Schéma de la fonction de mesure primaire .....53
Figure 3.7	Fonction de mesure primaire .....53

Figure 3.8	Schéma de la fonction de mesure secondaire .....	54
Figure 3.9	Assemblage utilisé pour les manipulations expérimentales.....	56
Figure 3.10	Base pour le positionnement de la pièce.....	56
Figure 3.11	Facteurs influençant le système .....	58
Figure 3.12	Schématisation des niveaux des facteurs .....	60
Figure 3.13	Montage expérimental pour l'étude de répétabilité .....	60
Figure 3.14	Montage expérimental de l'étude R&R .....	63
Figure 3.15	Mesure de la position de référence sur la MMT .....	64
Figure 4.1	Évolution de $EV$ en fonction de $t$ .....	70
Figure 4.2	Régression linéaire entre $EV$ en $Y$ et le temps de chauffe $t$ .....	72
Figure 4.3	Régression linéaire entre $EV$ en $Z$ et le temps de chauffe $t$ .....	72
Figure 4.4	Évolution du biais en fonction du temps de chauffe $t$ .....	73
Figure 4.5	Régression linéaire entre le biais moyen en $Y$ et le temps de chauffe $t$ ..	74
Figure 4.6	Évolution de $EV$ en fonction de $P$ à la position (0,0) .....	76
Figure 4.7	Évolution de $EV$ en fonction de $P$ à la position (-400,0).....	76
Figure 4.8	Évolution de $EV$ en fonction de $P$ à la position (400,0) .....	77
Figure 4.9	Évolution de $EV$ en fonction de $P$ à la position (0,-400).....	77
Figure 4.10	Évolution de $EV$ en fonction de $P$ à la position (0,400) .....	78
Figure 4.11	Régression linéaire entre $EV$ en $X$ et $P$ .....	80
Figure 4.12	Régression linéaire entre $EV$ en $Y$ et $P$ .....	80
Figure 4.13	Régression linéaire entre $EV$ en $Z$ et $P$ .....	81
Figure 4.14	Évolution du biais en fonction de $P$ à la position (0,0).....	81
Figure 4.15	Évolution du biais en fonction de $P$ à la position (-400,0) .....	82
Figure 4.16	Évolution du biais en fonction de $P$ à la position (400,0).....	82



Figure 4.17	Évolution du biais en fonction de $P$ à la position (0,-400) .....	83
Figure 4.18	Évolution du biais en fonction de $P$ à la position (0,400).....	83
Figure 4.19	Positionnement des points de l'étude R&R .....	86
Figure 4.20	Rotation autour des axes des cibles .....	94



## LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

MAA	Assemblage assisté par la métrologie ( <i>Measurement Assisted Assembly</i> )
LSM	<i>Large Scale Metrology</i>
KC	Caractéristique clé ( <i>Key Characteristic</i> )
AMM	<i>Assemble Measure Move</i>
MC	Monte-Carlo
SMR	<i>Spherically Mounted Retroreflector</i>
LR	<i>Laser Radar</i>
LT	<i>Laser Tracker</i>
GPS	Système de géo-positionnement par satellite ( <i>Global Positioning System</i> )
GUM	Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure
MSA	Analyse de système de mesure ( <i>Measurement Systems Analysis</i> )
BIPM	Bureau international des poids et mesures
AIAG	<i>Automotive Industry Action Group</i>
R&R	Répétabilité et reproductibilité
X-bar R	Carte de contrôle, méthode des étendues
ANOVA	Analyse de variance
IC	Intervalle de confiance
MMT	Machine de mesure tridimensionnelle
EV	Répétabilité élargie ( <i>Equipment variation</i> )
AV	Reproductibilité élargie ( <i>Appraiser variation</i> )
DRO	<i>Digital Read Out</i>



## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

$m$	Mètre
$mm$	Millimètre
$\mu m$	Micromètre
$U$	Incertitude élargie
$u_{x_i}$	Incertitude type de la variable $x_i$
$\delta$	Déviati on par rapport à la valeur nominale
$Ref$	Valeur de référence
$N(\mu, \sigma)$	Distribution aléatoire normale de moyenne $\mu$ et d'écart-type $\sigma$
$\mu$	Moyenne estimée
$\sigma^2$	Variance estimée
$\sigma$	Écart-type estimée
$n$	Taille d'échantillon
$H_0$	Hypothèse nulle
$H_1$	Hypothèse alternative
$t_\alpha$	Constante de la distribution de <i>Student</i> pour un certain niveau de confiance $\alpha$
$\chi^2_{v,\alpha}$	Constante de la distribution de <i>Khi carré</i> pour un certain niveau de confiance $\alpha$ et un certain nombre de degrés de liberté $v$
$\alpha$	Erreur type I (rejeter $H_0$ quand $H_0$ est vrai)
$K$	Facteur de confiance
$p\_value$	Probabilité d'effectuer une erreur de type I
$t$	Temps de chauffe
$P$	Profondeur de champ



## INTRODUCTION

Aujourd'hui, dans les secteurs manufacturiers liés à l'industrie aéronautique et des transports, l'assemblage de divers composants est effectué, en très grande partie, à l'aide de gabarits dédiés à effectuer cette tâche. Lorsque la configuration du produit doit être changée ou modifiée, les gabarits doivent impérativement subir des modifications et être certifiés de nouveau, dans certains cas, ils doivent être complètement remplacés. Ces situations occasionnent d'importants retards et problèmes au niveau de la productivité des entreprises. Avec l'avènement de l'Industrie 4.0 et le développement accru de nouvelles technologies numériques, il est de plus en plus commun de vouloir déployer ces dernières dans la chaîne de valeur d'une entreprise afin d'en améliorer l'efficacité. Les domaines manufacturiers et de la qualité ne sont pas épargnés par cette évolution numérique. Nous pouvons notamment citer la disponibilité croissante de nouveaux systèmes de métrologie 3D, comme les appareils de photogrammétrie et de suivi au laser. Cette situation nous permet désormais d'envisager l'utilisation de leurs capacités métrologiques tridimensionnelles d'une nouvelle façon. En effet, jusqu'à récemment, ces technologies sont restées campées dans des tâches de contrôle de la qualité. Aujourd'hui, il est dorénavant envisageable de les employer pour assister les opérateurs, en temps réel, lors des opérations de positionnement et d'orientation durant l'assemblage. Cela permettrait de maintenir un très grand niveau de contrôle de qualité et de traçabilité au niveau de la chaîne d'assemblage. Le corollaire positif de cette approche serait d'éliminer une bonne partie des gabarits d'assemblages, de réduire les exigences de calibration après chaque altération ou retouche de ces derniers, contribuant ainsi à améliorer la productivité du secteur industriel.

L'approche de l'assemblage assisté par métrologie 3D (*Measurement Assisted Assembly*, MAA) est donc intéressante, elle offre un potentiel de productivité et de qualité pour l'industrie. Cependant, comme toute nouvelle technologie, le manque de connaissance et la nouveauté de l'approche présentent leur lot de problématiques dont il faut chercher et développer des solutions robustes et applicables industriellement. Le présent mémoire aborde une facette de ces problématiques de R&D. Notre projet tente de quantifier l'erreur du

positionnement de composant dans une approche d'assemblage assisté par métrologie 3D en employant des artéfacts de suivi.

Dans le but de cerner la problématique dans son ensemble ainsi que le contexte du projet, une présentation générale de la problématique industrielle sera effectuée dans le CHAPITRE 1. Les assemblages dans les industries automobile et aéronautique sont présentés afin de saisir le contexte de ces secteurs manufacturiers. L'étude étant effectuée sur l'assemblage assisté par la métrologie 3D, une présentation des concepts de base de ce processus est effectuée afin d'identifier les points importants liés à cette technique. Ensuite, le CHAPITRE 2 présente une revue de littérature succincte entourant les différents aspects liés à l'assemblage assisté par la métrologie 3D. Les principes de bases de la méthodologie ainsi que les différentes technologies de métrologie 3D actuellement disponibles et pouvant être employés lors du processus sont identifiés. Le chapitre se clôt par une présentation des méthodologies existantes permettant d'identifier les performances métrologiques d'un système de mesure. Le CHAPITRE 3 présente quant à lui l'objectif de recherche ainsi que les différents points-jalons qui nous aideront à y parvenir. De plus, la méthodologie expérimentale y est clairement présentée.

Finalement, une conclusion qui récapitule les points essentiels de cette étude, nos principales contributions et des recommandations pour des travaux futurs sont présentées.



## **CHAPITRE 1**

### **PROBLÉMATIQUE INDUSTRIELLE**

Le CHAPITRE 1 présente un portrait des différences majeures entre les industries automobile et aéronautique en matière de méthodologies d'assemblage ainsi qu'au niveau des problématiques qui en découlent. Avec l'avènement massif des technologies numériques, ces deux industries sont en période de profondes mutations. Cette révolution industrielle qualifiée d'Industrie 4.0 est donc présentée pour en faire ressortir l'effet sur ces industries, plus particulièrement, sur les méthodes d'assemblage. Finalement, le concept d'assemblage assisté par la métrologie 3D, étroitement lié au concept d'Industrie 4.0, est introduit ainsi que ses principaux avantages.

#### **1.1 Présentation de l'industrie automobile**

L'industrie automobile est une industrie mature, mais qui commence à connaître des mutations avec l'avènement des voitures électriques. Cependant, ces changements n'affectent que très peu la manière d'assembler les véhicules et par conséquent, la chaîne d'assemblage demeure quasi inchangée. En effet, les principes d'interchangeabilité et l'assemblage autopositionné sont employés dans la grande majorité des assemblages.

La contribution de cette industrie au produit intérieur brut du Canada représente près de 19 milliards de dollars et contribue directement à plus de 125 000 emplois (Government of Canada, 2003). Plus de 2 millions de véhicules sont produits annuellement par des compagnies comme GM et Ford. Aux États-Unis, on parle plutôt de 17.1 millions d'unités produites par année amenant ainsi des retombées économiques de plus de 75 milliards de dollars et la création de 400 000 emplois (SelectUSA, 2018). Cette industrie manufacturière est, sans contredit, une des plus importantes au niveau mondial. Les processus et les chaînes de fabrication de ce secteur sont très bien établis. L'utilisation de robots pour l'assemblage est courante depuis des années et le cycle de vie des produits est clairement défini. La production

de masse de cette industrie a eu pour effet de normaliser bon nombre de processus d'assemblage, et ce parmi l'ensemble des compagnies du secteur.

## 1.2 Présentation de l'industrie aéronautique

Au Canada, l'industrie aéronautique représente 25 milliards de dollars et contribue à plus de 190 000 emplois (Innovation, Sciences et Développement économique Canada & AIAC, 2019). Aux États-Unis, l'industrie aéronautique est plus imposante avec une part de 143 milliards de dollars du produit intérieur brut et la participation à plus de 485 000 emplois directs (SelectUSA, 2019). De plus, ces chiffres ne cessent d'augmenter année après année. Uniquement au Canada, les revenus de cette industrie ont augmenté de 26% entre 2012 et 2017 (Innovation, Sciences et Développement économique Canada & AIAC, 2019). L'importance du secteur aéronautique au niveau mondial est donc indéniable dans l'industrie manufacturière moderne. Contrairement à l'industrie automobile, le secteur manufacturier aéronautique utilise massivement des gabarits d'assemblage comme celui présenté à la Figure 1.1 (Maropoulos, Muelaner, Summers, & Martin, 2014).



Figure 1.1 Exemple d'un gabarit d'assemblage aéronautique, avec la permission de Bombardier Aéronautique

En effet, ceux-ci sont nécessaires afin de positionner et conformer les larges composantes, souvent flexibles, d'un aéronef avant d'effectuer diverses opérations d'assemblage : perçage, rivetage, etc. À cause de la sévérité des exigences dimensionnelles et géométriques, les assemblages sont obtenus ainsi *sur gabarit*, avec comme conséquence, très peu de composants interchangeables. En effet, la combinaison tolérances réduites et grandes pièces flexibles occasionne des ajustements manuels uniques au niveau de l'assemblage rendant l'interchangeabilité des pièces quasi impossible. À noter que les manipulations effectuées lors du processus d'assemblage occasionnent ainsi 40% des coûts totaux de fabrication d'un aéronef (Maropoulos et al., 2014). Le recours à l'outillage spécialisé et dédié était donc incontournable. Des gabarits rigides doivent être utilisés impérativement pour conformer les composants et les localiser à leurs positions nominales. Ces gabarits sont coûteux à fabriquer et à entretenir, et ne répondent qu'à une seule étape du processus d'assemblage. Les modifications associées à ces gabarits engendrent, encore une fois, des coûts et délais importants (approximativement 10% des coûts totaux) (Maropoulos et al., 2014).

### **1.3 Industrie 4.0**

Le secteur manufacturier tel que nous le connaissons est en période de mutation. L'avènement massif des technologies dites « numériques » dans toutes les étapes de la chaîne de valeur des entreprises bouleverse les processus conventionnels. Le terme « Industrie 4.0 » renvoie à cette évolution. Selon plusieurs chercheurs, il s'agit ici d'une quatrième révolution industrielle se caractérisant principalement par une automatisation intelligente et par l'intégration massive de nouvelles technologies numériques à la chaîne de valeur d'une entreprise (Ministère de l'Économie et de l'Innovation, 2020). Cette révolution numérique vient apporter des changements structuraux au niveau des systèmes et processus d'une compagnie, et aussi aux modes de gestion, aux modèles d'affaires et à la main-d'œuvre de celle-ci. Le cœur de ce changement est porté par le besoin de connectivité au niveau des équipements et données d'une entreprise. Dans notre contexte manufacturier spécifique (assemblage), ceci se traduit par la disponibilité en temps réel de données précises de géolocalisation qui permet aux différents intervenants de communiquer les résultats et surtout de prendre des décisions par rapport à la fabrication et l'assemblage de différents produits. La métrologie 3D devient en quelque sorte

un lagunage commun aux différents intervenants d'une usine qui permet de partager l'information relative à la qualité d'un produit entre eux.

#### **1.4 Assemblage assisté par la métrologie 3D**

Avec l'avènement de l'Industrie 4.0, de nombreux chercheurs tentent de répondre aux nouveaux besoins et défis du secteur manufacturier, notamment dans le cadre d'activités d'assemblage d'aéronefs. L'assemblage assisté par la métrologie 3D offre une opportunité pour améliorer la productivité des opérations d'assemblage. Il s'agit d'une approche qui n'a fait son apparition que récemment dans l'industrie manufacturière (Schmitt, Witte, Janßen, & Bertelsmeier, 2014). Au début des années 2000, des applications très ciblées de l'industrie aéronautique comme le jumelage ailes-fuselage sur des aéronefs ont utilisé cette nouvelle méthodologie (Airbus 350 XWB et Boeing 787 (Chen, Du, Tang, & Zhang, 2015), (Drouot, Zhao, Irving, Sanderson, & Ratchev, 2018), (Maropoulos, Zhang, Chapman, Bramall, & Rogers, 2007) ). Ces intégrations ont été effectuées en utilisant des systèmes de métrologie à grande échelle (*Large Scale Metrology*, LSM) (Deng, Li, & Huang, 2018). Il est de plus en plus accessible de mettre en place un tel processus grâce à l'émergence de nouvelles technologies dans le domaine de la métrologie 3D. Cette méthodologie a pour principal objectif d'augmenter l'efficacité (gain de productivité) et la capacité (performances métrologiques) en modernisant les processus d'assemblage. Cette méthodologie offre un potentiel d'applicabilité plus large. Elle peut pallier différents problèmes (ex. gabarits) en plus d'amener de nouvelles options comme l'intégration des opérations d'inspection lors de l'assemblage et l'assemblage adaptatif en fonction de l'état de conformité réel des composants tout en garantissant la traçabilité métrologique.

Dans l'industrie aéronautique, mais pas exclusivement, l'utilisation d'imposants gabarits de fabrication pour le positionnement, l'ajustement et le perçage de composantes est omniprésente. Les tâches reliées à l'utilisation de ces gabarits sont extrêmement fastidieuses et onéreuses à cause du grand volume de ceux-ci et leur coût de conception, de fabrication et de leur maintien. N'importe quelle modification, même mineure, sur ces outils entraîne

d'importants délais et coûts. À noter que deux objectifs sont toujours pertinents dans le cas de cette industrie : la minimisation du poids des véhicules et l'amélioration des performances et rendements énergétiques (ex. obtenir un profil aérodynamique plus précis; la réduction des tolérances permettra d'atteindre une plus grande précision au niveau des profils augmentant ainsi la performance de ceux-ci). Ces différentes contraintes ont amené les spécialistes à identifier trois pistes pour améliorer la compétitivité de cette industrie (Maropoulos et al., 2014), (J. E. Muelaner, Martin, & Maropoulos, 2013) :

- **Augmenter le nombre d'assemblages modulaires du type pièce-sur-pièce (*Part-to-Part Assembly*)** : plusieurs phases de pré assemblage permettant un assemblage simplifié et plus rapide à la fin. Dans ce cas, aucun gabarit n'est nécessaire et les composants s'alignent ensemble via des alésages (ou d'autres dispositifs) de précision;
- **Utiliser des gabarits flexibles et à faible coût** : l'utilisation d'imposants gabarits effectuant une seule tâche doit être remplacée par des gabarits minimalistes, modulaires et standards occupant plusieurs fonctions;
- **Assurer la traçabilité métrologique et du contrôle de la qualité par mesure et par conformité à un gabarit** : advenant l'utilisation de la métrologie 3D à grande échelle, l'aspect de la traçabilité métrologique devient essentiel. En effet, dans le cas de l'utilisation d'un gabarit d'assemblage, la précision et la conformation métrologique de ce dernier fournissaient l'assurance d'obtenir un bon assemblage. Avec la métrologie 3D, il faut un système qui assure que le jour X, avec les composants Y et Z, l'assemblage a permis de positionner ces derniers avec un défaut de  $\delta$  mm et une incertitude de  $\pm U$  à un niveau de confiance de 95%. Pour résumer, il y a nécessité d'avoir un système pour assurer la traçabilité des activités de mesures, l'analyse des tolérances des assemblages et des études de capacités.

Le présent projet de recherche porte notamment sur le dernier point. En effet, l'utilisation d'un système de photogrammétrie dans un contexte d'assemblage assisté par la métrologie n'est pas nouvelle, mais aucune méthodologie standardisée n'existe pour déterminer adéquatement l'incertitude de mesure d'un tel système.



## CHAPITRE 2

### ÉTAT DE L'ART

Le CHAPITRE 2 présente une revue de littérature succincte entourant les différents aspects liés à l'assemblage assisté par la métrologie 3D. Les principes de bases de la méthodologie ainsi que les différentes technologies de métrologie 3D actuellement disponibles et pouvant être employés lors du processus sont identifiés. Finalement, les méthodes permettant d'identifier les performances métrologiques de ce nouveau processus de mesure et d'assemblage sont présentées.

#### 2.1 Principes de bases de l'assemblage assisté par la métrologie

Les nombreux travaux de l'Université de Bath (UK) sont à l'origine du développement de cette approche dans le domaine aéronautique. Ils présentent les principes de base de l'assemblage assisté par la métrologie 3D (*Measurement Assisted Assembly*, MAA), et comment cela pourrait aider à atteindre les objectifs identifiés pour la modernisation du secteur manufacturier (Maropoulos et al., 2014), (Maropoulos et al., 2007), (Mei & Maropoulos, 2014) et (J. Muelaner, Martin, Paul, & Maropoulos, 2011). Le MAA utilise différentes technologies de mesure afin de guider l'assemblage de pièces, souples ou pas, à moyen et grand volume ( $10^0$  à  $10^2$  m). Il est possible de diviser l'assemblage assisté en fonction de quatre sous-processus distincts :

- **Processus d'inspection (1)** : mesurer et estimer le degré de conformité lors de l'assemblage. À ce titre, on peut citer les travaux de Li *et al.* (Li, Qiu, Chen, & Guan, 2014) et ceux de Muralikrishnan *et al.* effectués sur le contexte spécifique d'un laser de poursuite (Muralikrishnan, Phillips, & Sawyer, 2016). L'état de conformité des composantes de ce dernier permet aussi de déterminer l'ordre d'assemblage afin de maximiser l'utilisation de celles-ci (Xia Liu, An, Wang, Tan, & Wang, 2018);
- **Processus de suivi de la position (2)** : processus permettant une prise de mesure, un ajustement, une prise de mesure et ainsi de suite, jusqu'à ce que la pièce soit en

tolérance. Ce processus permet notamment de remplacer l'utilisation de gabarit (Maropoulos et al., 2014), (J. Muelaner et al., 2011);

- **Processus du gabarit actif (3)** : des outils de positionnement (ex. vérins, robots, etc.) peuvent s'ajuster pour donner suite à la prise de mesure. Le MAA fait ainsi office d'encodeur externe (Pfeifer, Montavon, Peterek, & Hughes, 2019);
- **Processus du contrôle en boucle fermée (4)** : utilisation des résultats de mesure pour effectuer un suivi au niveau de l'utilisation de robot par exemple. Il s'agit de la combinaison des processus 1 et 3.

### 2.1.1 Assemblage de pièces souples (ou flexibles)

Comme mentionné dans l'introduction, les cycles de production dans les secteurs aéronautique et transport sont complexes, longs et coûteux. En effet, de nombreuses opérations d'assemblage doivent être effectuées de façon manuelle (calage, ébavurage et perçage) en utilisant d'imposants gabarits de production. Bon nombre d'industries manufacturières comme celle automobile ont su remplacer ces procédés manuels en utilisant des pièces interchangeables. Cependant, il n'est pas toujours envisageable d'utiliser cette méthodologie d'assemblage, notamment lorsque les tolérances sont réduites et les composants plus volumineux et/ou flexibles (J. Muelaner et al., 2011). Ces pièces, qu'on qualifie de souples, sont définies comme des composants dont l'amplitude des déformations, sous l'effet de la gravité et/ou des contraintes résiduelles, est sensiblement plus grande que les tolérances exigées (Abenhaim, Desrochers, Tahan, & Bignon, 2015). Ces dernières sont courantes dans l'industrie aéronautique et celle du transport. Les gabarits contribuent à rigidifier les composantes en les conformant, mais sont très coûteux à maintenir, modifier et requiert une main-d'œuvre extrêmement qualifiée pour les utiliser. L'approche MAA permet de diminuer, voire supprimer l'utilisation de tels gabarits. Cependant, pour être efficace, cette approche doit tenir en compte la déformation élastique. Quelques récentes études ont abordé cette problématique. À titre d'exemple, Liu *et al.*, de l'Université de Beihang (Chine) ont évalué l'effet de la gravité sur la mesure des caractéristiques clés (*Key Characteristic*, KCs) (Xia Liu et al., 2018). Ils proposent un algorithme de calage itératif qui cible les applications dites à



grande échelle (>15 m) et ils démontrent la robustesse de l'approche via une étude de cas (ailes-fuselage). Dans une autre étude, ils proposent une approche qui estime l'ajustement final entre pièces via une simulation par éléments finis (Xueshu Liu et al., 2018). Falgarone *et al.* présentent aussi une étude pour simuler des assemblages réalistes (incluant des défauts) en utilisant un outil d'éléments finis (Falgarone, Thiébaud, Coloos, & Mathieu, 2016). L'assemblage assisté par la métrologie est sans aucun doute un processus pouvant moderniser ce type d'assemblage et les quatre prochains processus permettent d'arriver à cette fin.

### **2.1.2 Processus d'inspection**

L'assemblage est un processus unidirectionnel permettant d'assembler des composantes dans un ordre précis afin d'obtenir un résultat final. Ce résultat est représenté par les tolérances géométriques sur diverses caractéristiques clés obtenues par l'assemblage (ex. position relative de deux pièces, alignement, etc.). Différents équipements de métrologie à grand volume (LSM) permettent ainsi de déterminer la position et l'orientation des différentes composantes pour quantifier les déviations des différentes KCs à l'étude. Ce premier processus d'inspection permet ainsi de représenter la qualité d'un assemblage au même titre qu'un gabarit de mesure. Lorsque l'interchangeabilité des pièces ne peut pas être assurée, des processus de prédiction peuvent permettre de pallier cette problématique (Maropoulos et al., 2014). En effet, en inspectant les pièces en amont du procédé d'assemblage, il est possible de déterminer la manière dont celles-ci vont interagir entre elles, pour ensuite optimiser leur positionnement pour résultat final conforme (Xia Liu et al., 2018). Il est donc possible de définir le processus d'inspection en deux catégories. La première permet de déterminer la conformité finale d'un assemblage et la seconde permet d'analyser les composantes de ce dernier pour optimiser leur positionnement afin d'obtenir un assemblage conforme.

### **2.1.3 Processus de suivi de la position**

Il s'agit du processus dans lequel un composant est positionné approximativement dans un assemblage. La position de cette dernière est mesurée puis déplacée vers sa position nominale en fonction des déviations obtenues. Ce processus peut être répété un certain nombre de fois

avant que la composante soit à la position désirée. Alternativement, des mesures en temps réel peuvent être utilisées pour suivre la composante jusqu'à son emplacement final (J. Muelaner et al., 2011). Ce processus aussi connu sous le nom de *Assemble Measure Move* (AMM) permet ainsi de positionner de façon précise les différentes composantes d'un assemblage sans avoir recours à de l'outillage tels les gabarits de fabrication ou tout simplement pour réduire la complexité de ceux-ci. Cette technique est généralement utilisée lors des phases finales de l'assemblage.

#### **2.1.4 Processus du gabarit actif**

Le processus du gabarit actif réfère à l'automatisation et l'utilisation de gabarits flexibles à faible coût pouvant être divisées en deux parties : l'outillage et l'automatisation (J. E. Muelaner et al., 2013). Au niveau de l'outillage, l'utilisation de gabarits qui offrent la possibilité d'être reconfigurés grâce à l'utilisation de pièces modulaires d'outillage standard a de nombreux avantages. Cela viendrait simplifier le processus de conception et de fabrication des gabarits, permettrait de réduire les coûts en production et donnerait la chance de les réutiliser dans d'autres projets. Présentement, les gabarits servent à la fois à la fabrication (incluant l'assemblage) et à la tâche de contrôle de la qualité (mesure). Bien que l'utilisation de gabarits reconfigurables soit utilisée dans une multitude d'autres industries, son utilisation en aéronautique est rare. Ce type d'outils ne peut garantir la stabilité dans le temps d'un gabarit reconfigurable comparativement à un qui est dédié à une seule tâche. De plus, le processus *Assemble-Measure-Move* ne pourrait pas être utilisé pour contrôler la structure produite à l'extérieur du gabarit, car cela occasionnerait des délais en cas de modifications (la pièce n'étant plus dans le gabarit) et le positionnement des références ne serait plus contrôlé. La nature de ces outils étant dite passive, elle ne permet pas d'obtenir de l'information en temps réel sur leur qualité. L'utilisation de composantes actives permettrait d'identifier des changements dimensionnels et thermiques au niveau des composantes pouvant ensuite être compensées à l'aide d'actuateurs. La précision de ces gabarits reconfigurable pourrait donc être grandement améliorée. Quant à l'automatisation, l'utilisation de robots pourrait aussi être bénéfique. Encore une fois, cela engendrerait une diminution des coûts et une augmentation de

la flexibilité de ceux-ci. La précision des robots industriels standard pourrait dans ce cas être augmentée grâce à des appareils de photogrammétrie effectuant un suivant en temps réel sur le positionnement de ceux-ci (encodeur externe).

### **2.1.5 Processus du contrôle en boucle fermée**

Comme mentionné plus haut, le processus du contrôle en boucle fermée combine les trois précédents processus : l'inspection, le suivi de la position ainsi que le gabarit actif. Historiquement, les appareils de métrologie 3D sont utilisés uniquement afin de mesurer les différentes caractéristiques clés d'une composante à la fin de son processus d'assemblage. Cependant, une nouvelle tendance allant vers l'automatisation de ce processus d'assemblage, notamment pour les composantes à grand volume, est de plus en plus présente dans l'industrie aéronautique. Une étude effectuée par Jamshidi *et al.*(2010) (Jamshidi, Kayani, Iravani, Maropoulos, & Summers, 2010), permet de démontrer que l'utilisation d'appareils de métrologie 3D lors du processus d'assemblage d'ailes d'avion peut servir à bien plus qu'au contrôle final de la qualité. En effet, il est dorénavant possible d'utiliser les résultats de mesure pour effectuer un suivi en temps réel lors de l'utilisation d'un robot par exemple. Le principal objectif étant d'augmenter le niveau de production tout en diminuant le temps d'assemblage requérant une main-d'œuvre hautement qualifiée. Malheureusement, bien que l'utilisation de robots dans l'industrie automobile soit dorénavant monnaie courante, il est plus difficile d'implémenter leur utilisation dans l'industrie aéronautique notamment due aux raisons suivantes :

- Dans une bonne partie des applications, les tolérances aéronautiques sont plus restrictives que celles des robots eux-mêmes;
- Le petit volume de production qui vient affecter le coût des robots;
- La manipulation de composantes imposantes comparativement au secteur automobile;
- La grande complexité des assemblages.

Une méthode, nommée le *contrôle adaptatif*, a donc été développée afin d'augmenter la précision des robots lors des processus d'assemblage. Celle-ci consiste à utiliser un ou plusieurs systèmes de métrologie 3D comme encodeur externe afin de suivre en temps réel la

position d'un robot dans son volume de travail, et si nécessaire, effectuer des corrections au niveau de sa programmation afin d'ajuster sa position. En plus de pouvoir corriger la position d'un robot, Jamshidi *et al.*(2010) ont démontré qu'il était possible d'automatiser l'ensemble du processus d'assemblage en mettant en place les trois processus présentés précédemment. Pour ce faire ils ont utilisé plusieurs appareils de métrologie 3D en fonction de leurs besoins spécifiques, chacun lié à un des trois processus. La mise en place de cette méthodologie de travail a permis de créer un système en boucle fermée requérant un minimum d'interaction humaine. L'étude a permis de démontrer qu'il est possible d'atteindre de meilleur niveau de répétabilité et de qualité en utilisant ce processus de contrôle en boucle fermée tout en réduisant les risques d'erreurs associés à l'interaction humaine. Finalement, les gains de productivité ont grandement été améliorés tout en permettant une modernisation de la chaîne d'assemblage.

### **2.1.6 La traçabilité métrologique**

La traçabilité est une exigence incontournable pour le processus MAA. L'assurance qualité permet de déterminer si un produit répond aux spécifications. Le contrôle qualité correspond à la vérification explicite de spécifications à l'aide de divers systèmes de mesure dont la capacité (performance métrologique) a été démontrée. Cette capacité peut être estimée en s'assurant que les instruments de mesure sont adéquatement employés, étalonnés convenablement et en effectuant une étude de répétabilité et reproductibilité sur ceux-ci (J. E. Muelaner et al., 2013). Cette étude s'assure que le ratio entre l'incertitude attribuable à la mesure et la tolérance exigée sur l'assemblage ne dépasse pas un seuil d'environ 10%. Il est ensuite possible d'affirmer que l'ensemble des pièces hors tolérances seront acceptées ou rejetées selon un indice de confiance.

Pour obtenir cette traçabilité, les mesures, les équipements et leurs incertitudes, les procédures et les opérateurs doivent être consignés tout le long du processus. Lorsqu'un gabarit conventionnel est utilisé, la traçabilité métrologique est assurée par son étalonnage et par des essais de répétabilité pour homologuer son usage. Si une altération est portée, on répète le processus. Dans un contexte de positionnement assisté par la métrologie, la quantification des

incertitudes pour chaque étape est donc incontournable pour assurer la traçabilité, pas seulement sur la position d'un artéfact, mais sur les caractéristiques clés de l'assemblage. Il faut ainsi être capable de prouver que lors de l'assemblage  $x$ , sur la caractéristique fonctionnelle  $y$ , nous avons enregistré un tel résultat avec une telle incertitude. Avec le MAA, les sources d'incertitudes sont multiples : équipements, étalonnage, algorithmique, reproductibilité, etc. Toutes ces incertitudes se combinent et se propagent et il est impératif de les estimer et de les consigner (Maisano & Mastrogiacomio, 2016). L'estimation de l'incertitude de mesure en fonction des capteurs employés, de leurs localisations et de la position relative de l'objet mesuré est un défi de taille et qui continue à alimenter la littérature du domaine (Chen & Du, 2017), (Galetto, Mastrogiacomio, Maisano, & Franceschini, 2016) et (Yang, McWilliam, Popov, & Hussain, 2013). Plusieurs chercheurs travaillent actuellement autour de cette problématique notamment à l'Université de Torino (Italie) où une méthodologie pour évaluer globalement l'erreur de mesure d'un système LSM (Forbes, 2012) fut développée. La solution proposée par les chercheurs est basée sur la paramétrisation de l'ensemble des variables relatif au positionnement et à l'orientation des capteurs/cibles. L'approche utilise la méthode de Monte-Carlo (MC) pour combiner et propager cette incertitude. D'une manière similaire, Yang *et al.* proposent une autre méthode pour combiner 2 systèmes de mesure (*Modified Common Points Method*) (Yang et al., 2013).

Il est possible de constater que plusieurs travaux ont été publiés sur l'estimation de l'incertitude inhérente à une localisation d'un capteur/cible. Cependant, à notre connaissance, aucune étude n'exprime l'incertitude sur le requis fonctionnel exigé; celui-ci représenté par les caractéristiques clés (KCs) de l'assemblage ainsi que l'incertitude de répétabilité et de reproductibilité induite par l'utilisation d'artefacts de localisation dans un environnement industriel. Ces deux incertitudes étant inhérentes au processus de MAA, elles seront étudiées dans le présent projet. Et le point le plus important est que nous avons constaté une absence de recommandations ou de guides qui procurent les grandes lignes pour une certification métrologique d'un ensemble MAA.

## 2.2 Technologies de métrologie 3D

Plusieurs systèmes LSM peuvent être employés dans un contexte d'assemblage assisté par la métrologie. Malheureusement, il n'existe pas une technologie qui surpasse toutes les autres pour être employée dans le MAA. Les technologies comportent chacune ses avantages et ses inconvénients. Par conséquent, il est recommandé d'utiliser un ensemble de systèmes pour que chacun puisse compenser les lacunes des autres. L'ensemble des technologies disponibles pour le MAA sont classées et représentées dans la Figure 2.1 en fonction de leur famille (sans ou avec contact).

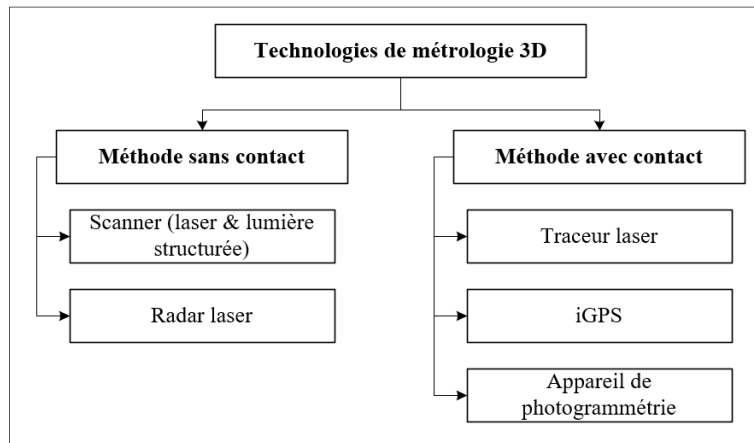


Figure 2.1 Technologies de métrologie 3D à grand volume

En plus des deux familles, il existe deux procédés de mesure, une mesure ponctuelle (un point à la fois) et une mesure simultanée (un ensemble de points à la fois ex. : une ligne de balayage laser). Dans le premier cas, le système enregistre les coordonnées d'un point à la fois. Les coordonnées peuvent être obtenues à l'aide de méthode optique ou mécanique. Par exemple, le centre d'un probe sphérique pour un bras de mesure ou le centre d'une cible rétro réfléchive de type SMR (*Spherically Mounted Retroreflector*) pour un traceur laser. Lorsque la cible ou le probe entre en contact avec la surface à l'étude, l'appareil compense le diamètre de ceux-ci pour ensuite calculer la position du centre par rapport à sa base (zéro machine). Une fois ce point enregistré, il est possible de positionner celui-ci par rapport au système de mesure qui est lui-même positionné par rapport à la pièce à l'étude lors de la phase d'alignement du projet.

Pour ce qui est de la mesure simultanée de points, il s'agit d'une numérisation de la pièce. Une lumière produite par le système de mesure est reflétée par une surface, il est ainsi possible de recueillir un grand nombre de points. Ces points représentent ensuite les déformations et les géométries contenues sur cette surface. L'appareil utilise le principe de triangulation optique afin de déterminer la position des points dans l'espace par rapport à lui-même, puis par rapport à la pièce.

### **2.2.1 Méthodes sans contact**

Cette première famille de système de mesure permet de mesurer les coordonnées d'une caractéristique sans avoir un contact physique avec celle-ci. Cette section présente les appareils et les technologies associées à cette méthode de mesure.

#### **2.2.1.1 Scanner (laser & lumière structurée)**

Deux types de scanners sont disponibles dans l'industrie. La principale différence étant la technologie utilisée pour effectuer l'acquisition des données. La première utilise un laser et fonctionne grâce au principe de la triangulation optique. Un faisceau laser est projeté par l'appareil sur la surface d'intérêt. Une lentille permet de capter la réflexion de ce faisceau sur la surface. La distance et l'angle entre la caméra et le projecteur étant connus, il est possible de déterminer les coordonnées des points reflétés grâce à la triangulation. La seconde technologie utilise une source de lumière structurée. L'appareil projette une séquence de lumière sous forme de franges structurées sur l'objet à numériser. Grâce à une caméra, l'appareil perçoit l'image de ces franges qui sont déformées par le relief de l'objet. Ensuite, le traitement de la séquence d'images captée permet, pour chaque pixel de la caméra, de déterminer la distance du point correspondant de la surface. Un nuage de points de très grande densité peut finalement être calculé. Contrairement au scanner laser, la technologie par lumière structurée permet de numériser plus d'un point à la fois. Il est donc beaucoup plus rapide, mais il est généralement moins performant.

### **2.2.1.2 Radar laser**

Le radar laser (*Laser Radar*, LR) est un appareil développé par Nikon Metrology. Cette technologie permet d'effectuer des mesures sur les surfaces d'un objet, en utilisant un miroir pour déplacer un faisceau laser infrarouge focalisé. En connaissant la position angulaire de ce miroir, il est possible d'effectuer des mesures 3D sur la plupart des surfaces d'une pièce à l'étude (Nikon Metrology, 2021b).

## **2.2.2 Méthodes avec contact**

La seconde famille de système de mesure est celle avec contact. Cette méthode est dite mécanique, car un contact physique entre l'appareil et la pièce à l'étude doit être effectué lors de l'acquisition de données.

### **2.2.2.1 Traceur laser**

Le traceur laser (*Laser Tracker*, LT) est construit autour d'un interféromètre laser (qui mesure les distances) monté avec deux degrés de liberté (deux rotations avec des encodeurs pour mesurer les rotations). Le laser est réfléchi à l'aide d'un miroir au niveau de la tête de l'appareil qui permet d'ajuster la direction du laser afin d'être projeté à l'intérieur de la cible (SMR). Le mouvement de cette cible est détecté automatiquement. La distance parcourue par le laser ainsi que les angles de la tête étant connus, il est possible de déterminer les coordonnées cartésiennes du point à l'étude (Kyle et al., 2001) en calculant les coordonnées sphériques de ce dernier (voir).

### **2.2.2.2 iGPS**

La technologie utilisée par le iGPS est semblable à celle utilisée par un système de géo positionnement par satellite (*Global Positioning System*, GPS) utilisé dans la vie courante. Cette dernière est cependant conçue pour des applications industrielles. Les satellites GPS sont ici remplacés par des émetteurs laser infrarouges iGPS qui déploient un champ de mesure au



niveau d'une pièce ou même d'une usine. Des récepteurs iGPS en contact physique avec une pièce peuvent être suivis par les émetteurs permettant ainsi de connaître et de suivre la position de celle-ci de façon dynamique (Nikon Metrology, 2021a).

### **2.2.2.3 Appareil de photogrammétrie**

Comme pour les scanners laser, cette technologie est aussi basée sur le principe de triangulation optique. Pour positionner un élément, des caméras (au moins deux) permettent d'identifier des cibles sur la pièce à l'étude selon différents points de vue. Ces cibles sont des collants rétro réfléchissants qui reflètent une lumière infrarouge. Les caméras peuvent ensuite capter la position de ces cibles et de les positionner par rapport à la référence du système de mesure. L'utilisation d'un minimum de deux caméras est primordiale afin de pouvoir lire la position dans un environnement 3D. L'angle entre les deux caméras (connu par une opération d'étalonnage) permet de déterminer la profondeur entre les cibles et les caméras. La photogrammétrie est une technologie qui permet notamment de percevoir plusieurs cibles en même temps et de pouvoir déterminer la position de ces dernières de façon dynamique. Cela permet d'effectuer un suivi des cibles en temps réel. Les artéfacts qui seront à l'étude utilisent le principe de la photogrammétrie pour fonctionner.

### **2.2.3 Performances métrologiques des technologies**

Comme il est possible de voir bon nombre de technologies applicables à l'assemblage assisté, par la métrologie existe, chacune proposant des forces et des faiblesses. Il est donc indispensable de cerner les besoins technologiques d'un projet avant de choisir un ou des appareils. Le Tableau 2.1 présente un récapitulatif des technologies de métrologie 3D applicable à l'assemblage assisté par la métrologie. Les performances typiques avec niveau de confiance à 95% sont tirées des quatre plus importants manufacturiers (Hexagon, Faro, Nikon et Creaform) de systèmes de mesure (Hexagon AB, 2021), (FARO, 2021), (Creaform, 2021a), (Creaform, 2021b), (Nikon Metrology, 2021a), (Nikon Metrology, 2021b).

Tableau 2.1 Récapitulatif des technologies de métrologie 3D

Technologies de métrologie 3D	Performance typique ( $\mu\text{m}$ )	Portée typique (m)	Avantages	Faiblesses
Scanner	20 + 40 $\mu\text{m}/\text{m}$	$\approx 300 \text{ mm}$	Mesure sans contact, faible poids, vitesse de numérisation rapide, coût accessible	Ligne de vue, portée, grand nombre de points
Photogrammétrie	75	1,5 – 4,2	Suivi dynamique, faible poids, coût accessible	Mesure avec contact, budget d'incertitude de mesure complexe
Radar laser	20 + 5 $\mu\text{m}/\text{m}$	0,5 – 50	Mesure sans contact, automatisation facile, mesure de points sur surface	Ligne de vue, coûteux, temps de chauffe long
Traceur laser	16 + 0.8 $\mu\text{m}/\text{m}$	0 – 80	Faible poids, coût accessible, installation rapide	Mesure avec contact, ligne de vue, mesure de points au centre d'un réflecteur
iGPS	200 + 10 $\mu\text{m}/\text{m}$	2 – 55	Suivi dynamique, pas besoin de ligne de vue	Mesure avec contact, coûteux

Dans de nombreux cas, la performance est l'une des principales conditions à remplir. En effet, un appareil de mesure doit être plus précis que les caractéristiques à l'étude. De plus, il est important de considérer la portée des appareils. S'il est impossible pour un système de mesurer l'ensemble des caractéristiques d'une pièce en restant au même endroit, un mouvement de l'appareil « *Leap Frog* » doit être effectué et cela vient influencer la performance globale de ce dernier. Au niveau des avantages de la photogrammétrie, le système permet d'effectuer un suivi dynamique, ce qui est nécessaire dans un contexte de MAA. En ce qui a trait aux désavantages, il n'existe pas de façon définitive permettant d'évaluer sa performance. En effet, le système peut être utilisé dans une multitude de situations et configurations ce qui rend l'évaluation de son incertitude de mesure très difficile. De plus, aucune norme n'existe, à notre connaissance, comparativement aux autres technologies.

#### 2.2.4 Fusion des données en métrologie 3D

Comme présenté plus haut, de nombreux appareils de métrologie 3D sont présentement disponibles sur le marché. Chaque appareil possède ses points forts et ses faiblesses (étendue de mesure, interférence avec des objets, etc.). Dans un contexte industriel, il est donc plus que probable de devoir utiliser des appareils de différentes natures afin de pouvoir mesurer l'ensemble des KCs d'un produit, et ce à l'intérieur d'un moyen à grand volume. Il existe actuellement un consensus parmi les chercheurs sur le fait qu'il n'existe pas une seule technologie qui permet de couvrir l'étendue et la précision nécessaires pour déployer le MAA à travers une usine. L'utilisation de plusieurs capteurs permet donc de pallier les limitations de chaque système (Zhao, Zhang, & Xiao, 2018), (Zhuang, Li, Cao, & Gao, 2018), d'augmenter la précision du processus (Maisano & Mastrogiacomio, 2016), de réduire l'erreur de mesure du système (W. L. Liu & Li, 2017), (Martin et al., 2016), (Muralikrishnan et al., 2016) et d'augmenter simplement l'accessibilité (Lin et al., 2020). Dès 2009, Weckenmann *et al.* ont souligné l'importance du développement de méthode pour la consolidation (fusion) des données issues de différentes technologies (Weckenmann et al., 2009). L'intégration de plusieurs technologies (optique, électromagnétisme, acoustique, etc.) est donc incontournable. Elle est une des étapes clefs pour la mise en place d'un système MAA efficace (Wang, Leach, & Jiang, 2015). On réfère le lecteur aux études suivantes qui ont toutes abordé cette problématique sur des équipements différents : Chen *et al.* (iGPS et scanneur) (Chen & Du, 2017), Deng *et al.* (LT et LR) (Deng et al., 2018), Durot *et al.* (MMT et LR) (Drouot et al., 2018), Li *et al.* (MMT et LT) (Li et al., 2014), Lin *et al.* (Lin et al., 2020), Mitchell *et al.* (Mitchell, Spence, Hoang, & Free, 2004) (plusieurs LT) et Zhehan *et al.* (iGPS et scanneur) (Chen & Du, 2017). Dans cet ordre d'idée, on souligne qu'il est essentiel de définir une méthode permettant d'évaluer les coordonnées d'un point ayant été mesuré par plusieurs capteurs. Deux types d'approches peuvent ainsi être utilisées : la méthode *compétitive* ou la méthode *coopérative* (Galetto et al., 2016), (Galetto, Mastrogiacomio, Maisano, & Franceschini, 2015).

#### 2.2.4.1 Approche compétitive et coopérative

Le positionnement dans un volume tridimensionnel d'une pièce à grande échelle est généralement possible en mesurant plusieurs séries de points non colinéaires. Ces points permettent d'identifier des distances et/ou angles sur les points d'intérêts de la pièce à l'étude (ex. référentiels ou encore surfaces fonctionnelles) pour ensuite déterminer sa position et son orientation. Au moment de combiner ces points caractérisés par des capteurs technologiquement différents (en fonction des systèmes de mesure utilisés), deux types de méthodes peuvent être utilisées : la méthode compétitive ou la méthode coopérative. La méthode la plus utilisée dans l'industrie est celle dite compétitive. Celle-ci consiste à effectuer une moyenne pondérée des positions et orientations pour chacun des points à l'étude, ceux-ci pouvant être déterminés par les différents systèmes de métrologie 3D. La seconde méthode, dite coopérative, permet de combiner ces différentes positions et orientations pour ensuite déterminer le positionnement 3D d'un point d'intérêt. Les deux méthodes seront ici présentées en effectuant une comparaison entre celles-ci. Une étude de Franceschini *et al.* (2016) (Franceschini, Galetto, Maisano, & Mastrogiacomo, 2016) présente une nouvelle approche coopérative qui tient compte de l'incertitude dans la mesure des distances et angles d'un point en fonction de la nature des capteurs utilisés. Les auteurs comparent ensuite cette approche à la méthode compétitive classique. La fusion de l'information issue des capteurs peut être définie comme étant la combinaison des données obtenues par différentes sources (systèmes de mesure) afin d'obtenir de meilleurs (plus précis, plus complet, plus fiable, etc.) résultats qu'en utilisant seulement un ensemble de données. Pour résumer les deux concepts :

**Méthode compétitive :** Chacun des systèmes effectue une mesure indépendante d'une coordonnée 3D d'un point à analyser. Ensuite, ces coordonnées sont fusionnées entre elles en effectuant une moyenne pondérée. Le principal objectif de cette méthode est d'augmenter la précision en réduisant les risques d'erreurs.

**Méthode coopérative :** Dans cette situation, l'information récoltée par les deux capteurs (pouvant différer de famille technologique) permet d'obtenir la position d'un point. Sans

l'information d'un des deux capteurs, l'obtention de cette position serait impossible individuellement. De cette façon, les capteurs partagent leurs mesures de positionnement pour obtenir une position unique d'un point. Par exemple, un capteur mesure l'orientation angulaire du point et un autre mesure sa distance pour finalement déterminer son positionnement dans le volume.

### 2.2.5 Principe de projection pour les technologies optiques

Un aspect très critique pour la plupart des appareils utilisant des capteurs optiques est celui de la projection. En effet, pour une erreur de positionnement angulaire donnée, l'erreur spatiale résultante augmente en fonction de la distance entre la cible et l'appareil (Kyle et al., 2001). La Figure 2.2 illustre ce concept.

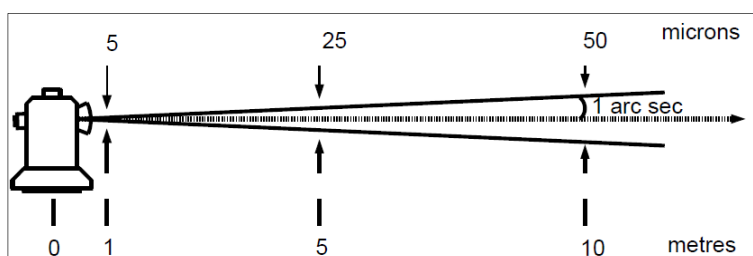


Figure 2.2 Principe de projection (Kyle et al., 2001)

Il est possible de constater que, plus le point à l'étude est loin de l'appareil de mesure, plus les coordonnées de celui-ci auront une erreur grandissante. En d'autres mots, l'incertitude de mesure ne peut être confondue avec une valeur constante, elle dépend de la position des objets par rapport au système utilisé pour faire l'acquisition des données. Il est donc indispensable de porter une attention particulière à la calibration et l'installation des appareils de métrologie utilisant des capteurs optiques. De plus, une vérification constante durant le processus de mesure communément appelé « *Drift Check* » est de mise afin de voir si l'appareil de mesure s'est déplacé à l'intérieur du volume lors des manipulations.

### 2.2.6 Prise en compte de l'effet de la gravité

Comme mentionné dans les sections précédentes, le processus d'assemblage assisté par la métrologie 3D est habituellement effectué dans le cadre d'opération de positionnement et d'orientation de grandes composantes flexibles (ex.: l'assemblage des ailes sur le fuselage d'un avion). De façon générale, la position et l'orientation des composantes sont calculées en évaluant les coordonnées de différents points (cibles) mesurés sur les surfaces fonctionnelles d'une pièce à l'étude (ou encore sur des référentiels d'assemblage). Des chercheurs de l'Université de Beihang en Chine ont tenté d'évaluer l'effet de la gravité sur la mesure de ces points. En effet, lors de la mesure de pièces imposantes et possédant un poids non négligeable, il est important de pouvoir prendre en compte l'effet de la gravité sur celle-ci. Dans cette étude, Chen *et al.* (2018) (Chen, Du, & Tang, 2018) proposent un nouvel algorithme basé une méthode de calage déterministe pour estimer cette position et orientation. La méthode présentée cible les applications dites à grande échelle caractérisées par une influence non négligeable de la gravité sur l'orientation des pièces à l'étude. Les auteurs évaluent l'influence de celle-ci sur les déformations structurelles d'une pièce pour ensuite les introduire dans un nouvel algorithme de calage. Ils démontrent ensuite l'efficacité et la robustesse de leur algorithme à l'aide d'une étude de cas d'un assemblage ailes-fuselage d'un avion de ligne.

De façon générale, l'utilisation des algorithmes usuels de calage (ex. ICP) ne tiens pas compte de la déformation des grands objets. Ainsi, ces méthodes supposent que le corps est parfaitement rigide et qu'il n'y a donc aucune variation dans la distance euclidienne entre deux points d'un corps lors de l'assemblage. Dans le cas des pièces souples (flexibles, non rigide), ce postulat de conservation ne tient plus, et c'est plutôt la distance curviligne qui est conservée (transformation isométrique). Les causes de ses déformations sont dues aux éléments suivants : l'effet de la gravité sur des composants à faible rigidité structurale, l'effet des contraintes résiduelles induites par les procédés de fabrication et les efforts induits lors des opérations d'assemblage comme tel. Ces trois effets combinés engendrent des erreurs au niveau du positionnement et de l'orientation du système de coordonnées local et de celui des points clés (déviation entre la valeur nominale et réelle). Leur étude de cas permet donc de démontrer que

la nouvelle méthodologie est très efficace dans le cas des grandes pièces. En effet, l'effet de la gravité (qui est signifiante selon l'axe Z de l'assemblage) est significativement diminué par rapport à la méthode de calcul traditionnel. Cela permet donc de placer l'assemblage au bon endroit malgré le fait que le corps subisse une déformation importante.

### 2.3 Analyse de l'incertitude d'un système de mesure

Cette section est utile à un lecteur qui possède des connaissances sommaires en métrologie. Nous dirigeons ce dernier au Chapitre 3 si celui-ci connaît bien le domaine. L'opération d'inspection consiste à mesurer des caractéristiques (ex. KC) pour déterminer son amplitude et sa conformité par rapport à ses spécifications techniques telles qu'imposées par le cahier de charges (tolérances). Lors de cette inspection, la prise de mesure n'est jamais exacte. Une multitude de sources de variation viennent affecter l'exactitude de cette dernière amenant ainsi une incertitude sur la mesure. Ces incertitudes peuvent être de deux natures distinctes : systématique (ex. le biais) ou aléatoire (ex. répétabilité). Une incertitude systématique (erreur de justesse) peut être quantifiée par une opération d'étalonnage et corrigée par un ajustement. Une incertitude aléatoire (erreur de fidélité) peut être estimée par une analyse statistique. Sur une base périodique, les intervenants en qualité dans l'industrie manufacturière doivent déterminer la *performance des systèmes de mesure* qui seront utilisés dans un contexte de production. En effet, pour contrôler des KCs (dimensions, positions, orientations) sur une pièce spécifique avec un appareil de mesure, il est primordial de déterminer si le système de mesure est adéquat pour identifier avec efficacité l'amplitude des déviations sur les caractéristiques clés. La Figure 2.3 présente cette interaction entre la performance d'un système (en **bleu**) de mesure et les données mesurées ( $x_i$ ) liées au procédé manufacturier (en **vert**) et les spécifications imposées par le cahier de charges (en **rouge**).

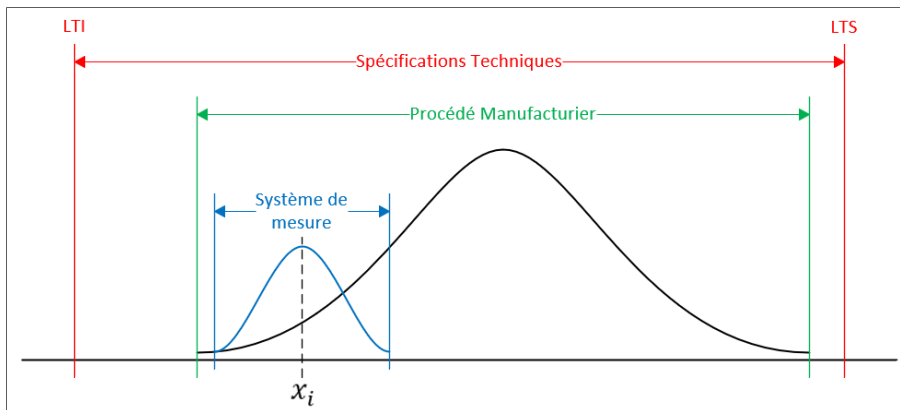


Figure 2.3 Performances du système de mesure en fonction des spécifications

Différents guides et normes procurent les lignes directrices qui permettent d'analyser la performance d'un système de mesure. Deux documents sont principalement utilisés : le *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM)* (Bureau International des poids et mesures, 2008a) et le *Measurement Systems Analysis (MSA)* (Automotive Industry Action Group, 2010). Le premier document présente les bases théoriques relatives à l'expression de l'incertitude et est produit par le *bureau international des poids et mesures (BIPM)*. Le second est un document produit spécialement par et pour le secteur manufacturier en Amérique du Nord par l'« *Automotive Industry Action Group* » (*AIAG*) (mais qui, depuis la globalisation des marchés, connaît une plus large diffusion internationale). Ces lignes directrices peuvent être séparées selon les étapes suivantes :

- Identification des KCs à inspecter;
- Définition du système de mesure (section 2.3.1);
- Formulation de la fonction de mesure (section 2.3.2);
- Identification des incertitudes standards (section 2.3.3);
- Calcul des indices de performance (section 2.3.4);
- Sélection d'une méthode de propagation des incertitudes (section 2.3.5);
  - a. Propagation avec Série de Taylor (section 2.3.6);
  - b. Propagation avec simulation Monte-Carlo (section 2.3.7);
  - c. Évaluation de l'incertitude combinée par étude expérimentale (section 2.3.8);





### 2.3.2 Fonction de mesure

En ayant identifié ce qui compose le système de mesure, il est possible dans certains cas de déterminer une fonction de mesure représentant le système. Une mesure directe consiste à évaluer une quantité ( $Y$ ) à l'aide d'un appareil qui fournit directement la valeur physique. Pour ce qui est d'une mesure indirecte, l'appareil ne peut fournir directement la quantité ( $Y$ ), celui-ci doit tenir compte de plusieurs ( $n$ ) quantités physiques ( $X_i$ ). Une fonction de mesure  $f$  s'exprime donc sous la forme générale suivante :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2.1)$$

Cette fonction représente ainsi la relation entre l'ensemble des mesures effectuées à la quantité physique à évaluer. Comme mentionné plus haut, la prise de mesure n'est jamais exacte. Ainsi, l'ensemble des quantités physiques ( $X_i$ ) doivent être mesurées, donc estimées ( $x_i$ ), pour calculer la quantité finale ( $y$ ). Ces quantités sont affectées par une incertitude de mesure ( $u_{x_i}$ ). La formule 2.1 peut ainsi être représentée sous la forme suivante où  $y$  est l'estimation de  $Y$  :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.2)$$

### 2.3.3 Incertitudes standards

Dans le GUM (Bureau International des poids et mesures, 2008a), on recommande de décomposer les incertitudes ( $u_{x_i}$ ) de chacune des quantités physiques ( $x_i$ ) d'une fonction de mesure en quatre incertitudes standards qui sont définies de la façon suivante :

1. **Incertitude de la référence de mesure ( $\sigma_c$ )** : Incertitude liée à la valeur de référence (étalon) utilisée dans le processus d'évaluation de la conformité métrologique (étalonnage);
2. **Incertitude de l'erreur de l'équipement de mesure ( $\sigma_m$ )** : Incertitude due aux composantes physiques en conditions d'opération idéales (ex. laboratoire). Généralement, cette valeur est communiquée par le fabricant de l'équipement;

3. **Incertitude de l'indicateur ( $\sigma_i$ )** : Incertitude associée à l'affichage de l'indicateur (résolution effective). Sachant que  $\delta$  correspond à la plus petite division effective de cet indicateur, il est admis que l'incertitude de l'indicateur est égale à  $\sigma_i = \sqrt{\frac{\delta^2}{12}}$ ;
4. **Incertitude de répétabilité et reproductibilité ( $\sigma_{R\&R}$ )** : La répétabilité correspond à l'évaluation quantitative de la capacité d'un système de mesure à prendre les mêmes résultats, dans les mêmes conditions, avec les mêmes opérateurs et avec les mêmes pièces (non pas dans un laboratoire, mais dans des conditions *in situ*). Pour ce qui est de la reproductibilité, elle modélise l'influence des variations induites par les différents opérateurs. Ces deux types d'incertitudes sont identifiées empiriquement.

Les incertitudes standards de chaque  $x_i$  sont considérées comme indépendantes. Par conséquent, elles se combinent comme :

$$u_{xi}^2 = \sigma_c^2 + \sigma_m^2 + \sigma_i^2 + \sigma_{R\&R}^2 \quad (2.3)$$

Comme mentionné précédemment, les erreurs systémiques peuvent être corrigées, une fois la source de celles-ci identifiée et quantifiée. Il est cependant plus difficile de corriger les erreurs aléatoires. Ces erreurs correspondent à la dispersion des variations influençant un système de mesure, cette dernière est définie, sur une base statistique, par un écart type (on parle d'incertitude type).

#### 2.3.4 Indices de performance du système de mesure

En fonction des types d'erreurs de mesure (systématique ou aléatoire), il est possible de définir certains indices de performance du système. Ces derniers sont présentés à la Figure 2.5.

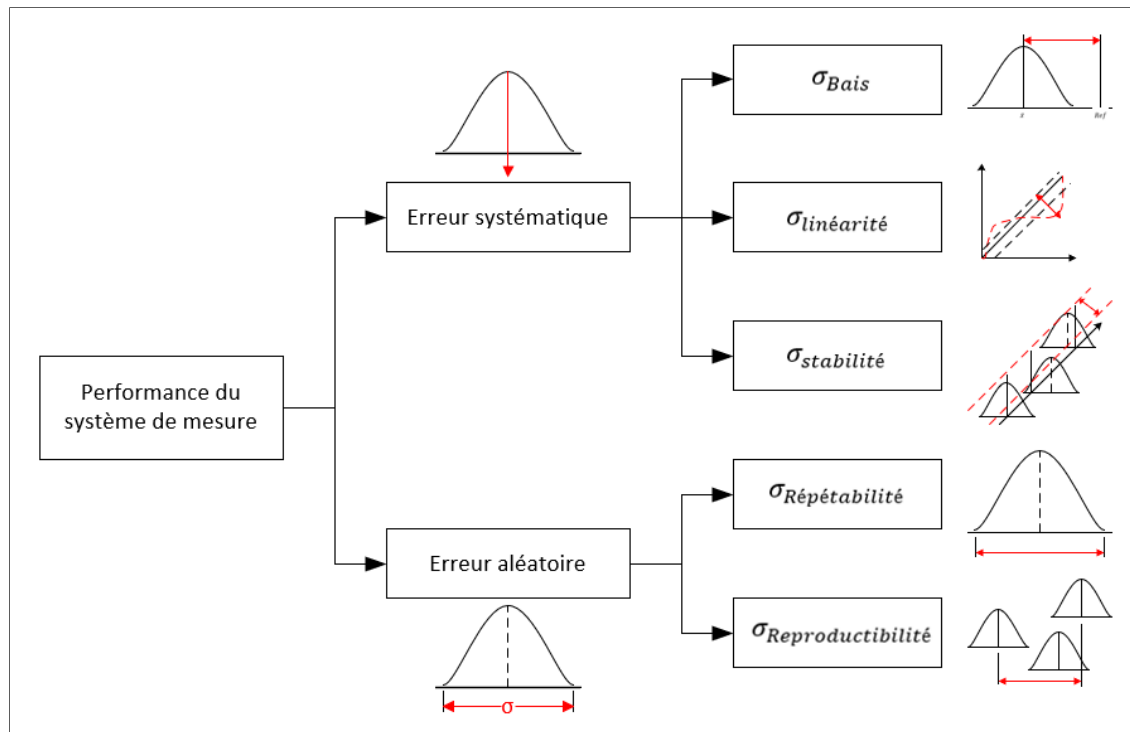


Figure 2.5 Indices de performance du système de mesure

### 2.3.4.1 Biais du système

Le biais représente l'exactitude liée à l'écart entre la moyenne d'un ou plusieurs résultats mesurés ( $\bar{x}$ ) et une valeur de référence ( $Ref$ ). Mathématiquement, le biais est estimé par la différence entre la valeur vraie (valeur de référence) et la moyenne observée des mesures sur la même caractéristique sur la même pièce. C'est la contribution à l'erreur totale constituée des effets combinés de toutes les sources de variation, connues ou inconnues, dont les contributions à l'erreur totale ont tendance à compenser de manière cohérente et prévisible tous les résultats des applications répétées du même processus de mesure au moment de la prise de mesure. Cette source de variation est représentée à la Figure 2.6.

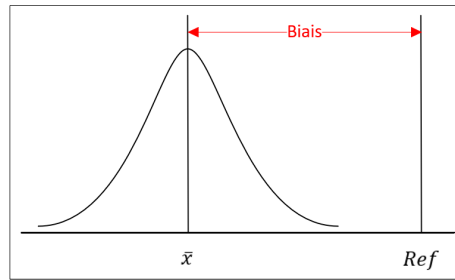


Figure 2.6 Représentation schématique de l'erreur du biais

#### 2.3.4.2 Linéarité du système

La linéarité indique la concordance des données obtenues tout au long de l'étendue de mesure d'un instrument avec la valeur de référence. En d'autres termes, il s'agit de la différence de biais sur toute la plage de fonctionnement (mesure) prévue de l'équipement est appelée linéarité. La linéarité peut être considérée comme un changement du biais par rapport dans l'étendue de la mesure. La Figure 2.7 présente la linéarité.

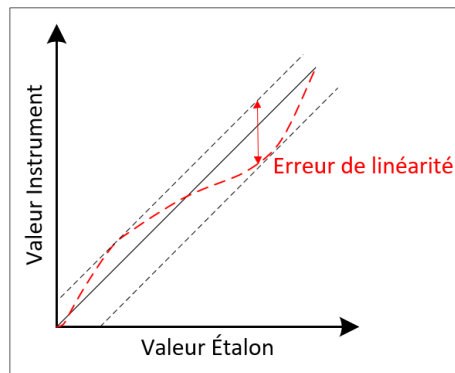


Figure 2.7 Représentation schématique de l'erreur de linéarité

#### 2.3.4.3 Stabilité du système

La stabilité d'un système est la capacité de ce dernier à maintenir sa capacité métrologique dans le temps. Elle représente la variation totale des mesures effectuées par un système de mesure, sur une même pièce, une même caractéristique au cours d'une certaine période de

temps (généralement cette période est fixée entre deux opérations d'étalonnage du système). Elle représente ainsi la variation du biais en fonction du temps tel que présenté à la Figure 2.8.

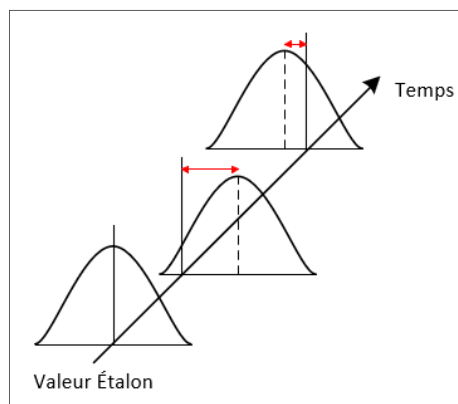


Figure 2.8 Représentation schématique de la stabilité

#### 2.3.4.4 Répétabilité du système

La répétabilité d'un système de mesure représente l'étendue (dispersion) des mesures obtenues avec un ensemble de conditions très restreintes. Il s'agit ici de la capacité à obtenir la même mesure, avec le même équipement, la même pièce, le même gabarit et les mêmes conditions environnementales. La répétabilité peut ainsi être représentée schématiquement par la Figure 2.9.

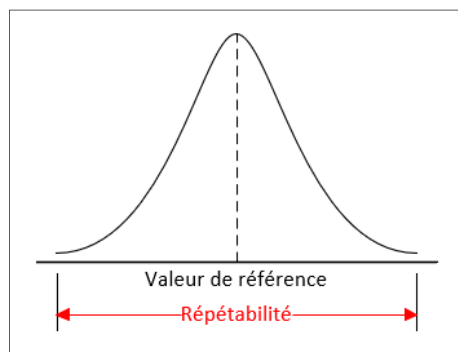


Figure 2.9 Représentation schématique de la répétabilité

### 2.3.4.5 Reproductibilité du système

La reproductibilité représente la variation entre les mesures effectuées par de différents opérateurs, avec le même équipement et dans les mêmes conditions. Mathématiquement, il s'agit de la variation de la moyenne des lectures prises par chacun des opérateurs. La Figure 2.10 présente schématiquement la reproductibilité.

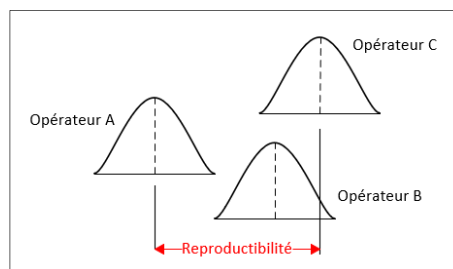


Figure 2.10 Représentation schématique de la reproductibilité

### 2.3.5 Propagation des incertitudes

Le principe de propagation des incertitudes est le suivant. L'équation 2.3 présente que l'estimation d'une quantité physique ( $y$ ) est dépendante de l'ensemble des quantités physiques ( $x_i$ ) devant être considérées pour son estimation. Chacune des variables ( $x_i$ ) possède une incertitude de mesure ( $u_{x_i}$ ) spécifique. Ce principe est représenté à la Figure 2.11.

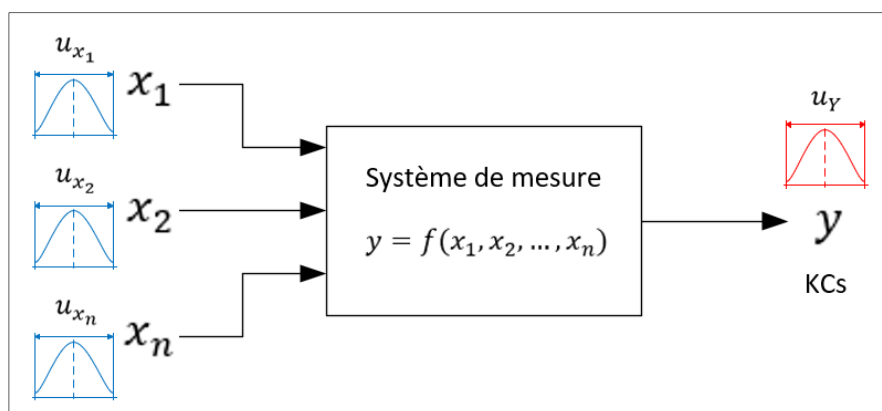


Figure 2.11 Fonction du système de mesure

L'incertitude totale ( $u_y$ ) sur la quantité ( $y$ ) est ainsi directement liée aux incertitudes ( $u_{x_i}$ ) de chacune des quantités qui composent la fonction de mesure. La formulation explicite de la fonction de mesure devient pratiquement impossible dans certains cas à cause de la complexité du traitement mathématique. Il reste cependant primordial de déterminer l'incertitude totale ( $u_y$ ) sur la quantité ( $y$ ). Le principe de propagation des incertitudes permet de déterminer cette dernière en fonction des informations disponibles lors de l'évaluation. Il existe trois principales stratégies, présentées au Tableau 2.2, employées afin de propager les incertitudes.

Tableau 2.2 Méthodes de propagation des incertitudes

Méthodes de Propagation	Formulation de la fonction de mesure		
	Explicite et dérivable, incertitudes $u_{x_i}$ connues	Explicite et non dérivable, incertitudes $u_{x_i}$ connues	Non-explicite et complexe, incertitudes $u_{x_i}$ inconnues
Avec série de Taylor (section 2.3.6)	✓		
Avec simulation Monte-Carlo (section 2.3.7)	✓	✓	
Empirique (section 2.3.8)	✓	✓	✓

### 2.3.6 Propagation des incertitudes avec une approximation de série de Taylor

Dans la majorité des cas, le plus grand défi est de déterminer la fonction de mesure associée à notre système. En effet, l'équation 2.3 peut être linéarisée par un développement de série de Taylor. Il est ensuite possible d'étudier l'incertitude type ( $u_y$ ) de la fonction  $f$ . Pour ce faire, l'équation peut être simplifiée en négligeant les termes d'ordre  $\geq 2$  sauf pour les termes du couplage entre les variables corrélées afin de pouvoir inclure les effets de dépendance statistique entre celles-ci. L'équation de l'incertitude type ( $u_y$ ) peut donc, s'écrire de la façon suivante :



$$u_y^2 \approx \sum_{i=1}^n p_i^2 u_{xi}^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j>1}^n p_{xi} p_{xj} \rho_{ij} u_{xi} u_{xj} \quad (2.4)$$

Où,  $p_i$  correspond au poids de la composante  $x_i$ ,  $p_j$  correspond au poids de la composante  $x_j$ ,  $u_{xi}$  correspond à l'incertitude standard totale de la composante  $x_i$ ,  $u_{xj}$  correspond à l'incertitude standard totale de la composante  $x_j$  et  $\rho_{ij}$  correspond au coefficient de corrélation de Pearson entre la composante  $x_i$  et  $x_j$ .

Pour utiliser la méthodologie de propagation des incertitudes avec série de Taylor présentée dans le GUM (Bureau International des poids et mesures, 2008a), certaines conditions doivent être prises en compte pour assurer une estimation cohérente de l'incertitude type ( $u_y$ ) (Bureau International des poids et mesures, 2009). Ces dernières sont les suivantes :

- La fonction de mesure  $f$  doit être explicite, dérivable et continue;
- Les incertitudes ( $u_{x_i}$ ) représentent l'écart type d'une distribution symétrique (coefficient d'asymétrie =0);
- La distribution de l'incertitude de la quantité ( $y$ ) est asymptotiquement gaussienne (dans les analyses elle est considérée comme une distribution de *Student*).

### 2.3.7 Propagation des incertitudes avec simulation Monte-Carlo

Lorsque les conditions énumérées à la section 2.3.6 ne peuvent être atteintes, une simulation de Monte-Carlo peut être utilisée pour déterminer l'incertitude type ( $u_y$ ) du système de mesure (Bureau International des poids et mesures, 2008b). Une simulation numérique la propagation des incertitudes ( $u_{x_i}$ ) peut être employée pour identifier  $u_y$ . Selon les travaux du « *Joint Committee for Guides in Metrology* » cette méthode de simulation permet de palier principalement aux deux situations suivantes :

- La linéarisation de la fonction de mesure  $f$  est difficile ou pas possible (pas dérivable, implicite);

- La fonction de densité (PDF) représentant l'incertitude de la quantité ( $y$ ) n'est pas asymptotiquement gaussienne (dans les analyses elle est considérée comme une distribution de *Student*).

L'approche de propagation avec simulation Monte-Carlo présente donc de nombreux avantages par rapport à l'approche conventionnelle utilisant la série de Taylor (Papadopoulos & Yeung, 2001). En particulier, lorsque le système de mesure est plus complexe. Cette méthode de calcul a gagné en popularité au fil du temps avec la puissance grandissante des ordinateurs, et fait dorénavant partie intégrante de l'industrie manufacturière. Cette approche permet ainsi de résoudre des problèmes complexes en simulant un grand nombre d'expérimentations ayant des résultats aléatoires. Une étude de Galetto *et al.* (Galetto, Mastrogiacomo, Maisano, & Franceschini, 2016) présente ainsi comment il est possible d'évaluer globalement l'erreur de mesure d'un système de métrologie à grand volume. Dans le cas spécifique (mais pas exclusif) de la MAA, lors de la prise de mesure avec des instruments de métrologie à grande échelle, plusieurs capteurs doivent être utilisés afin de couvrir l'ensemble du volume de travail. L'estimation de l'incertitude de mesure en fonction de la localisation de ces différents capteurs et de la position relative de l'objet mesuré par rapport à ces capteurs peut être un défi de taille et une formulation explicite de tous les termes de l'équation 2.4 est très difficile à obtenir. La solution proposée par Galetto *et al.* est basée sur le calcul de l'ensemble des paramètres relatifs au positionnement et à l'orientation des capteurs de la cellule de mesure. Cette étude démontre notamment que lorsque les incertitudes liées aux paramètres des capteurs sont faibles, l'incertitude de mesure sur un point peut être estimée à l'aide de la loi sur la propagation des incertitudes (section 2.3.6). Cependant, lorsque celles-ci sont plus importantes, la méthode Monte-Carlo devient incontournable. La simulation Monte-Carlo apporte de nombreux avantages :

- La méthodologie peut être appliquée à n'importe quel système de métrologie;
- Elle tient compte de l'incertitude de mesure spécifique à chaque capteur;
- Des facteurs externes comme les vibrations, la lumière et la température peuvent être ajoutés à la simulation;

- La méthode peut être utilisée lors de phase de conception du système de mesure afin d'estimer la précision requise de celui-ci aussi bien que lors de son utilisation;
- Le temps de calcul est performant (de l'ordre de quelques secondes).

### **2.3.8 Évaluation de l'incertitude combinée par étude expérimentale**

Comme mentionné plus haut, lorsqu'un système de mesure complexe est employé, il est parfois impossible de formuler explicitement la fonction de mesure associée. Le bilan des incertitudes ne peut donc pas être réalisé sur une base déterministe. Néanmoins, il est possible de déterminer de façon expérimentale (empirique) cette incertitude. En collectant des données sur le résultat  $y$  avec différentes configurations et essais, il est possible d'estimer statistiquement ces variations. Le comportement aléatoire de  $y$  peut par la suite, être assimilé et modélisé par une distribution statistique paramétrique (ex. Weibull, normale, etc.). Pour des tolérances dimensionnelles bilatérales (coordonnées  $x, y, z$ ), cette modélisation correspond habituellement à une distribution normale  $N(\mu, \sigma)$  de moyenne  $\mu$  et d'écart-type  $\sigma$ .

#### **2.3.8.1 Étude empirique de l'incertitude de répétabilité et de biais**

L'étude de répétabilité et de biais peut être utilisée lors de l'évaluation initiale d'un système de mesure pour comprendre et optimiser les différentes configurations de ce dernier. En effet, en analysant seulement le système de mesure, sans tenir compte des opérateurs ou des pièces à mesurer, il est possible d'identifier les performances inhérentes à ce dernier (les paramètres du logiciel de mesure, le gabarit de vérification, etc.). Lors de l'étude, une pièce est mesurée à multiples reprises (généralement entre 30 et 50 itérations) avec le même équipement de mesure, par le même opérateur et dans les mêmes conditions. Si un gabarit est utilisé, la pièce doit être déplacée et replacée entre chacune des itérations. La variation issue du système de mesure (répétabilité) peut être estimée en évaluant l'écart type des mesures en utilisant la formule suivante :

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2.5)$$

Où,  $\sigma_r$  correspond à la répétabilité du système de mesure,  $x_i$  correspond à la  $i^e$  valeur de l'échantillon,  $\bar{x}$  correspond à la moyenne de l'échantillon,  $n$  correspond à la taille de l'échantillon. Une méthode alternative pour calculer la répétabilité de l'équipement en utilisant les techniques de contrôle statistique de procédé (Automotive Industry Action Group, 2010) est aussi présentée en ANNEXE I. Une fois la répétabilité du système estimée, il est possible d'évaluer l'erreur du biais et de s'assurer si elle est significative ou pas. On utilise le test d'hypothèse suivant :

$$H_0: \text{biais} = 0$$

$$H_1: \text{biais} \neq 0$$

Certaines étapes préparatoires doivent être effectuées au préalable afin de pouvoir conclure de la présence significative de biais lors de l'utilisation d'un système de mesure. Ces dernières sont les suivantes :

- Une valeur de référence (*Ref*) doit être établie;
- Collecter un minimum de  $n \geq 10$  mesures pour l'ensemble de KCs, préférablement  $n \geq 30$  mesures;
- Un seul opérateur doit effectuer les mesures;
- Une seule pièce doit être utilisée;
- Les conditions environnementales doivent être constantes.

Une fois les résultats sont collectés et jugés comme cohérents (absence de valeurs aberrantes), le biais pour chacune des KCs peut être calculé en utilisant la formule suivante :

$$\text{biais}_i = x_i - \text{Ref} \quad (2.6)$$

Où,  $x_i$  correspond à la  $i^e$  valeur de l'échantillon. Un histogramme peut être utilisé pour déterminer visuellement s'il n'y a pas présence de valeurs aberrantes. Ensuite, le biais moyen ( $biais_m$ ) est calculé.

$$biais_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n biais_i \quad (2.7)$$

Pour déterminer si un biais est significatif (ou pas) dans l'échantillon. Le test de *Student* permet de comparer la moyenne de l'échantillon à la valeur de référence. Le test d'hypothèse se présente de la façon suivante. Afin de réfuter (ou pas) l'hypothèse de départ  $H_0$ , on calcule la statistique  $t$  :

$$t = \frac{|biais_m|}{\frac{\sigma_r}{\sqrt{n}}} \quad (2.8)$$

La  $p\_value$  permet ensuite de prendre une décision. Si  $p\_value \leq 0,05$  alors  $H_0$  est rejetée et on conclue qu'il y existe une différence statistiquement significative entre la moyenne des données récoltées et la valeur de référence (un biais est présent). Sinon,  $H_0$  ne peut être rejetée.

$$p\_value = 2 \Pr(t_{n-1} \geq |t|) \quad (2.9)$$

Où,  $p\_value$  correspond à la probabilité de commettre une erreur en rejetant l'hypothèse nulle  $H_0$ ,  $t$  correspond à la statistique de *Student* calculée précédemment,  $t_{n-1}$  correspond à une constante de la distribution de *Student*,  $n$  correspond à la taille de l'échantillon. Il est à noter que l'étude de répétabilité ne peut pas être utilisée pour la validation finale du système de mesure; elles n'analysent que la répétabilité de ce dernier. D'autres techniques avancées comme les études de répétabilité et reproductibilité (section 2.3.8.2) doivent suivre. Il est aussi possible de déterminer s'il y a présence d'un biais significatif sur l'étendue de mesure d'un système en analysant la linéarité de ce dernier. La méthodologie expérimentale est présentée en ANNEXE II.

### 2.3.8.2 Étude empirique de l'incertitude de répétabilité et reproductibilité

Plusieurs méthodes empiriques existent dans la littérature pour estimer l'incertitude due à la répétabilité et la reproductibilité (R&R) d'un système de mesure. Les deux méthodes les plus communes sont la méthode des étendues de mesure (X-bar R) et l'analyse de variance (ANOVA). Dans les deux cas, certaines règles doivent être suivies lors de la collecte de donnée :

- **Nombre d'opérateurs** : L'étude doit minimalement comporter 3 opérateurs. Ceux-ci sont généralement sélectionnés de façon à ce que les opérateurs qui se serviront du système de mesure soient dans un contexte de production;
- **Nombre de répétitions** : Chaque opérateur doit mesurer l'ensemble des pièces avec quelques répétitions (ex. 2 à 3 répétitions);
- **Nombre de pièces** : La variation liée au procédé de fabrication peut être estimée à partir de données historiques ou bien en utilisant les pièces à l'étude. Lorsque la dernière option est sélectionnée, un minimum de 10 pièces représentatives au comportement aléatoire du procédé doit être sélectionné, plus le nombre de pièces est grand, meilleure est l'estimation. Dans ce cas, un nombre >40 est visé;
- **Sélection des pièces** : La sélection des pièces pour l'étude doit représenter idéalement l'étendue complète du procédé. Si ce n'est pas le cas, il est à noter que la variation estimée dans ce cas entre les pièces ne représente pas la variation du procédé de fabrication;
- **Ordre aléatoire pour les mesures** : Afin de s'assurer que l'ordre de mesure n'influence pas les résultats, chaque opérateur doit mesurer toutes les pièces à l'étude de manière aléatoire, et ce pour chaque répétition.

La principale différence entre les deux méthodologies (X-bar R et ANOVA) se situe au niveau de l'analyse des résultats. En effet, la méthode des étendues est une approche qui permet de quantifier la répétabilité et la reproductibilité. Le guide MSA présente en détail la méthodologie (Automotive Industry Action Group, 2010). L'analyse R&R avec la méthodologie ANOVA permet d'obtenir plus d'information et est par conséquent plus

complète. L'analyse de variance est une analyse statistique qui permet de décomposer les sources de variations d'un système de mesure de la façon suivante :

- **Pièce** : Variation provenant des pièces à l'étude;
- **Opérateur** : Variation provenant des opérateurs;
- **Interaction pièce/opérateur** : Variation provenant de l'interaction entre les opérateurs et les pièces (lorsqu'un opérateur mesure différemment différentes pièces);
- **Répétabilité** : Variation provenant du système de mesure qui n'est pas attribuable aux autres sources de variation.

Peu importe la méthode employée, on considère les sources de variation comme indépendantes statistiquement. Par conséquent, elles seront assemblées sur base aléatoire (somme des variances) pour exprimer l'incertitude totale. Pour commencer, il faut déterminer si la variation provenant de l'interaction entre les pièces et les opérateurs est significative. Si oui, elle doit être prise en compte dans la reproductibilité totale du système ( $\sigma_{reproductibilité}$ ) comme présenté à l'équation 2.10.

$$\sigma_{reproductibilité} = \sqrt{\sigma_{opérateur}^2 + \sigma_{interaction}^2} \quad (2.10)$$

La répétabilité ( $\sigma_{répétabilité}$ ) étant directement identifiée lors par l'étude, il est finalement possible de déterminer la répétabilité et la reproductibilité du système de mesure grâce à l'équation 2.11.

$$\sigma_{R\&R} = \sqrt{\sigma_{reproductibilité}^2 + \sigma_{répétabilité}^2} \quad (2.11)$$

L'ANNEXE III présente les formules détaillées de l'étude de répétabilité et reproductibilité selon la méthodologie ANOVA.

### 2.3.9 Intervalles de confiance

Dans la section précédente, différents calculs permettent d'estimer de façon ponctuelle les paramètres ( $\bar{x}$  et  $\sigma$ ) de la population à l'étude à l'aide des données d'un échantillon. Une fois les paramètres estimés, il est primordial de déterminer la marge d'erreur ou l'intervalle de confiance (IC) associé à l'estimation de ces paramètres. En d'autres mots, cette dernière indique la précision de l'estimation. Pour le paramètre de moyenne  $\bar{x}$ , l'équation suivante est utilisée pour calculer l'IC :

$$IC_{\bar{x}} = \bar{x} \pm t_{n-1, \frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.12)$$

Où,  $\bar{x}$  correspond à la moyenne estimée de l'échantillon,  $t_{\alpha}$  correspond à une constante de la distribution de *Student* pour un certain niveau de confiance,  $\alpha$  correspond au niveau toléré de l'erreur de type I (habituellement 5%),  $n$  correspond à la taille de l'échantillon et  $\sigma$  correspond à l'écart type estimé de l'échantillon. Pour ce qui est du paramètre de l'écart type  $\sigma$ , la formule suivante est utilisée :

$$IC_{\sigma} = \pm \sqrt{\frac{n-1}{\chi_{n-1, \alpha}^2}} \sigma \quad (2.13)$$

Où,  $\chi_{\alpha}^2$  correspond à une constante de la distribution de *Khi carré*,  $\alpha$  correspond au niveau toléré de l'erreur de type I (habituellement 5%),  $n$  correspond à la taille de l'échantillon et  $\sigma$  correspond à l'écart type estimé de l'échantillon.

### 2.3.10 Incertitude type de la capacité du système de mesure

L'incertitude type de la '*capabilité*' d'un système de mesure peut être estimée en combinant l'ensemble des incertitudes que ce soit celles systémiques ou aléatoires. La capacité du système représente ainsi le doute associé à une mesure dans des conditions connues. Cette erreur correspond à l'incertitude standard totale ( $\sigma_{capabilité}$ ). Cette dernière se calcule en



effectuant la somme des incertitudes standards au carré. L'incertitude ainsi obtenue peut être calculée par :

$$\sigma_{capabilité} = \sqrt{\sigma_{Biais (linearité)}^2 + \sigma_{R\&R}^2} \quad (2.14)$$

### 2.3.11 Incertitude type de la performance du système de mesure

La performance d'un système de mesure tient compte des sources de variations systémiques et aléatoires, mais elle tient aussi compte des sources de dérives qui peuvent survenir au fil du temps, voir la Figure 2.12. Le principe de stabilité est pris en compte dans l'équation 2.15.

$$\sigma_{performance} = \sqrt{\sigma_{capabilité}^2 + \sigma_{stabilité}^2} \quad (2.15)$$

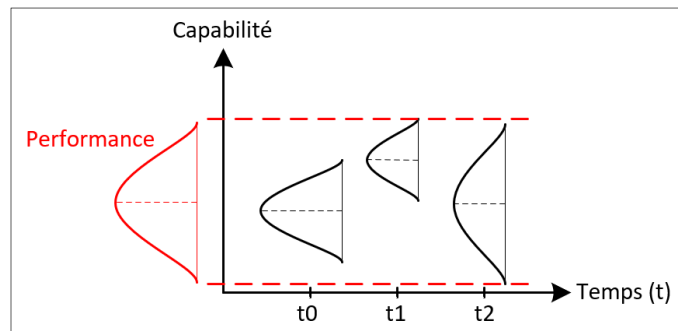


Figure 2.12 Représentation schématique de la performance

### 2.3.12 L'incertitude élargie du système de mesure

Pour un niveau de confiance déterminé *a priori*, l'incertitude de mesure représente l'étendue à l'intérieur de laquelle la valeur vraie d'une mesure est estimée peut s'y trouver. Elle décrit généralement le doute associé à une valeur mesurée. Cette dernière peut être exprimée de la façon suivante :

$$U = \pm K \sigma_{tot} \quad (2.16)$$

Où  $U$  est l'incertitude élargie,  $K$  le facteur de confiance (par exemple  $K \approx 3$  @99.73% de niveau de confiance) et  $\sigma_{tot}$  est l'incertitude type totale du système de mesure. Les facteurs de confiance les plus utilisés lors d'analyse de système de mesure se trouvent à la Figure 2.13.

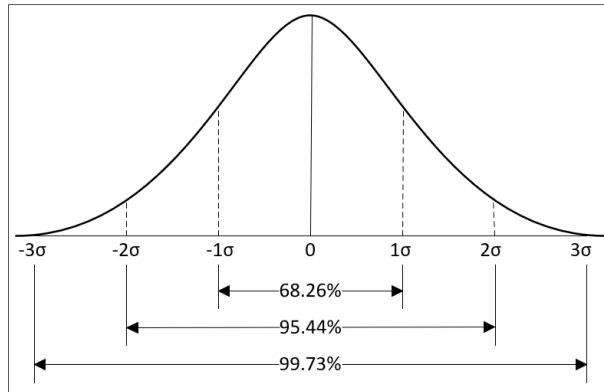


Figure 2.13 Facteurs et étendues de confiance

## 2.4 Conclusion du chapitre 2

Le CHAPITRE 2 présente l'état de l'art lié à la problématique industrielle. La première section présente les principes de bases de l'assemblage assisté par la métrologie. La présentation de ces principaux concepts étant : le processus d'inspection, de suivi de position, de gabarit actif et de contrôle en boucle fermée permet notamment de donner un contexte au projet de recherche. La seconde section présente les technologies de métrologie 3D disponibles pour effectuer un de tels processus. Chacune des différentes technologies possède des avantages et des inconvénients et bien souvent il faut combiner leurs données afin de pallier les limitations de chaque système et de tirer parti de leurs avantages. Finalement, la dernière section présente le cadre théorique entourant l'analyse de l'incertitude d'un système de mesure permet de présenter les bases permettant l'évaluation des performances d'un système, peu importe le contexte d'utilisation et sa composition. L'analyse des différentes sources bibliographiques a permis d'identifier les avantages, inconvénients et lacunes en information liés à l'assemblage assisté par la métrologie 3D. Cela permet ainsi de mettre en lumière un manque d'information entourant les technologies, leur performance et les méthodes de travail existantes pour permettre la mise en place d'un tel processus, notamment au sein de l'industrie aéronautique.

## CHAPITRE 3

### OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE

À la lumière de l'étude de l'état de l'art, il est possible de discerner le potentiel (les avantages) que la mesure assistée par la métrologie 3D peut apporter au secteur manufacturier. Malheureusement, ce processus de travail est relativement récent. Peu de technologies et méthodes de travail existent pour permettre le déploiement industriel d'un tel processus. Ce chapitre présente l'objectif de recherche ainsi que la façon dont nous allons y parvenir.

#### 3.1 Objectif du projet

L'objectif du présent projet de maîtrise est d'estimer les performances métrologiques d'un système de mesure 3D par photogrammétrie (C-Track™) associé à des artéfacts, et qui est employé pour un assemblage assisté par la mesure 3D. Pour se faire, une méthodologie rigoureuse est développée afin de déterminer l'amplitude de l'incertitude de mesure associée à l'utilisation de ces artéfacts lors du positionnement d'une pièce par rapport à une autre. Nous rappelons au lecteur que cette incertitude doit être  $\leq 10\%$  de la tolérance exigée sur l'assemblage afin de pouvoir utiliser le processus dans un contexte de production industrielle.

#### 3.2 Objectifs spécifiques

Pour mieux répondre à l'objectif de recherche, il est possible de subdiviser ce dernier en objectifs spécifiques qui permettent d'identifier distinctement les points-jalons qui devront être étudiés.

- Développer une méthodologie pour analyser les performances métrologiques d'un système d'assemblage assisté par mesures 3D sans contact. Le but est d'estimer l'erreur de répétabilité d'un tel système. Par '*système de mesure*', on désigne l'ensemble artéfacts – pièce – système de photogrammétrie – conditions de travail – etc.;
- Développer un canevas pour estimer l'erreur de reproductibilité du même système de mesure;

- Proposer une approche pour identifier et modéliser le comportement de l'erreur dans l'espace de travail. Par exemple, déterminer si les dimensions d'une pièce exercent une influence sur la performance du système et caractériser cette influence;
- Finalement, si possible, examiner l'influence de l'hypothèse de considérer les dimensions nominales du composant comparativement à l'utilisation de ses dimensions réelles (tel que fabriqué);
- Rédiger des recommandations pour l'usage futur d'un tel système de mesure lors d'opérations d'assemblage.

### 3.3 Hypothèses de travail

Certaines hypothèses de travail sont retenues :

- La norme ASME Y14.5 (2009) sera utilisée pour la définition et l'interprétation des requis dimensionnels et géométriques;
- Aucune variation dans les conditions de laboratoire (température et humidité) ne sera prise en compte, celles-ci étant peu significatives en considérant les amplitudes des incertitudes du système de mesure;
- L'erreur de fabrication des cibles de type « *vector bar* » est considérée comme négligeable dans le bilan des incertitudes;
- L'erreur de fabrications de composant employé lors de l'assemblage, bien que considéré comme conforme, est considérée comme significative. Il y a donc une différence entre la pièce nominale et la pièce réelle (telle que fabriquée);
- Une calibration fréquente de l'appareil de photogrammétrie permet de minimiser toutes sources de biais sur ce dernier. Lors de nos manipulations, nous avons suivi les recommandations des fournisseurs concernant l'étalonnage du C-Track™ et de la machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) Les certificats de calibration sont disponibles aux ANNEXE IV et ANNEXE V;
- Il est reconnu que l'utilisation de l'appareil de photogrammétrie, tel que le C-Trak, exclusivement autour du centre de son volume de travail permet de négliger l'erreur de

linéarité de ce dernier. Néanmoins, nous avons exploré dans nos expériences toute l'étendue du volume de travail;

- L'ensemble des pièces à l'étude sont considérées comme étant parfaitement rigides.

### 3.4 Développement d'un système de mesure

Comme mentionné plus haut, afin d'atteindre l'objectif de recherche, une méthodologie doit être développée pour identifier les performances métrologiques d'un système de mesure 3D par photogrammétrie, associé à des artéfacts, et qui est employé pour un assemblage assisté par la métrologie notamment dans un le contexte de l'industrie aérospatiale. La Figure 3.1 présente le schéma de fonctionnement d'un tel système.

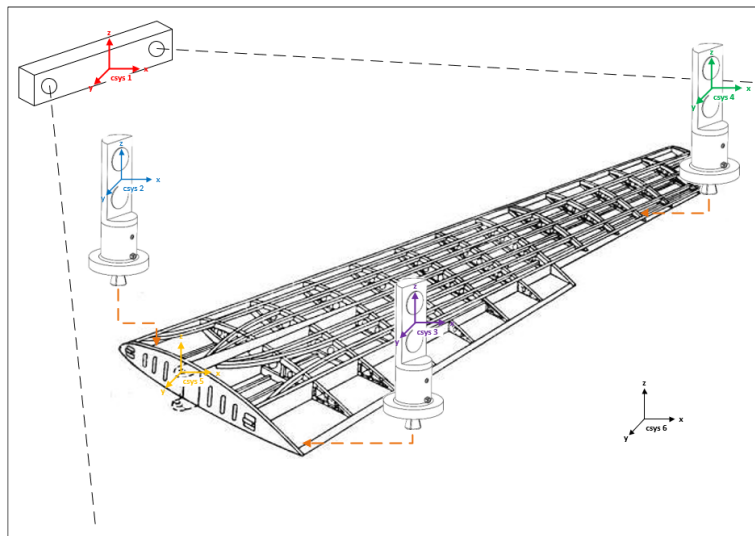


Figure 3.1 Système de mesure par photogrammétrie, associé à des artéfacts

Il est ici possible de constater comment un appareil de photogrammétrie (en **rouge**) perçoit les artéfacts (en **bleu**, **vert** et **mauve**) pour ensuite positionner une aile d'avion (en **jaune**) par rapport à un référentiel global (en **noir**). Ce référentiel global représente par exemple celui de l'avion. Pour déterminer les performances métrologiques d'un tel processus, des artéfacts doivent être conçus, une fonction de mesure doit être déterminée, un système d'acquisition de

données et finalement, l'évaluation de l'incertitude peut être effectuée. Cette section présente ces différentes étapes.

### 3.4.1 Conception d'artéfacts

Pour permettre le positionnement et l'orientation de pièces dans l'espace, il est essentiel d'avoir des artéfacts qui se localisent sur la pièce à l'étude. Ces artéfacts permettent à un dispositif de métrologie 3D de suivre la position et l'orientation de la pièce en temps réel. Deux cas de figure peuvent être présents (Figure 3.2). Le premier présente une situation où la pièce suivie doit être positionnée par rapport à une autre. Le second cas d'utilisation est plus simple, seulement la position et l'orientation de la pièce à l'étude sont importantes.

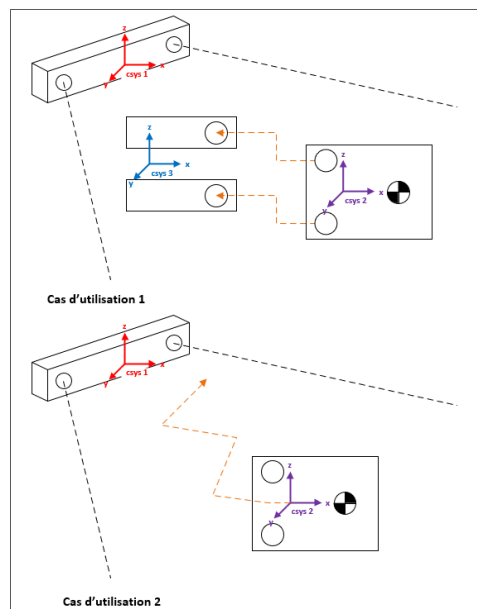
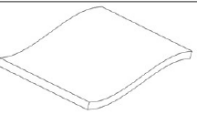

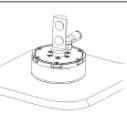


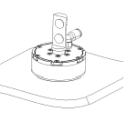
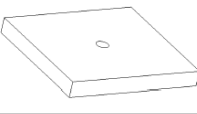

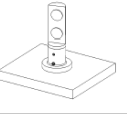
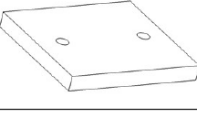
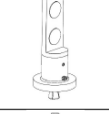
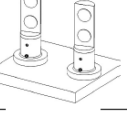

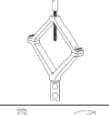
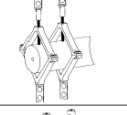

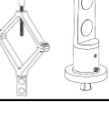
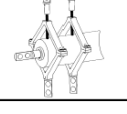


Figure 3.2 Cas types d'utilisation des artéfacts

La conception des artéfacts a fait l'objet d'un projet de fin d'études dont les dessins de fabrication sont disponibles en ANNEXE VII. Le projet a permis de proposer un modèle universel d'artéfacts polyvalents, compatibles avec la plupart des technologies de photogrammétrie et qui utilisent comme ancrage des référentiels (*Datums*) communs associés

aux caractéristiques clés d'une pièce pour se localiser (Figure 3.2). La solution développée propose un ensemble de pièces séparées en trois catégories. La première propose deux, systèmes de vision : des cibles de type « *Vector Bar* » compatible avec les appareils de photogrammétrie et des réceptacles sphériques pouvant accueillir des théodolites « SMR » pour les traceurs laser. La seconde catégorie peut être identifiée comme étant le corps de l'artéfact. Il s'agit d'une pièce servant à assembler et à espacer au besoin la base de l'artéfact pour augmenter le niveau de visibilité de ce dernier. Finalement, trois types de bases ont été développées : une base à pige extensible pour se localiser dans un alésage, un bloc en V pour se localiser sur un arbre et une base vacuum ayant trois points d'appui pour se localiser sur une surface. Chaque artéfact possède un numéro unique relié à ses caractéristiques dimensionnelles servant à évaluer la compensation à appliquer et l'incertitude du montage. Il est ainsi possible d'utiliser un assemblage d'artéfacts en fonction de la caractéristique clé. Les différents assemblages possibles sont présentés au Tableau 3.1.

Tableau 3.1 Assemblage des artéfacts

Datum primaire			Bases		Corps filaire		
Primaire	Secondaire	Tertiaire	Nom	Spécification	Pièce	Artéfact	Résultat final
Surface			Base magnétique et à succion	Poids de la base : 265g			
Surface	Trou		Base magnétique et à succion avec l'ajout d'une pige extensible	Poids de la base : 270g Diamètre des piges : 6, 8, 10, 12mm, 1/4, 3/8, 1/2po			
Plan	Trou		Base pour pige extensible	Poids de la base : 63g Diamètre des piges : 6, 8, 10, 12mm, 1/4, 3/8, 1/2po			
Plan	Trou	Trou	Deux base pour pige extensible	Poids des bases : 125g Diamètre des piges : 6, 8, 10, 12mm, 1/4, 3/8, 1/2po			
Cylindre			Deux base en V ajustable	Poids des bases : 780g Diamètre de l'arbre : 25 à 70mm			
Cylindre	Plan		Deux base en V ajustable avec une base pour pige cylindrique extensible	Poids des bases : 843g Diamètre de l'arbre : 25 à 70mm			

Dans le cadre du projet de recherche, seulement le système de photogrammétrie sera utilisé. En effet, comme présenté à la section 2.2.1, ce genre de technologie permet de percevoir plusieurs points en même temps, et ce dans un relatif grand volume de travail, comparativement à un système de traceur laser qui mesure un point à la fois. Dans un contexte où l'on a besoin de connaître la position de plusieurs artéfacts au même moment pour positionner une pièce en temps réel, la photogrammétrie est donc une technologie potentielle. L'instrument de mesure utilisé pour effectuer le suivi en temps réel de la pièce sera un appareil de photogrammétrie (C-Track™ de Creaform). Un système comportant une cible rétro-réfléctive double de type « *Vector Bar* » sera ainsi employé lors de l'étude, ce dernier est présenté à la Figure 3.3.

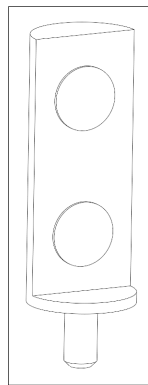


Figure 3.3 Cible rétro-réfléctive double

Les deux cibles rétro-réfléctives permettent de définir un vecteur. Ce vecteur donne l'orientation de l'artéfact par rapport au système de vision, ce qui est essentiel pour positionner la pièce à l'étude dans un système de coordonnées global. Dans un contexte où une extension (corps de l'artéfact) entre, la base et la cible est utilisée, cette dernière vient ajouter une nouvelle source de variation à l'assemblage de l'artéfact. Il peut ainsi y avoir une différence notable entre le vecteur créé par les deux points et le vecteur réel, de la cible jusqu'à la base de l'artéfact. Pour simplifier les sources de variation, aucune extension ou base ne sera utilisée. La cible de type « *Vector Bar* » sera achetée chez le même fabricant qui fournit les différentes cibles à Creaform : *Hubbs Machines* (HUBBS, 2021). Les spécifications techniques du fabricant sont présentées à la Figure 3.4.



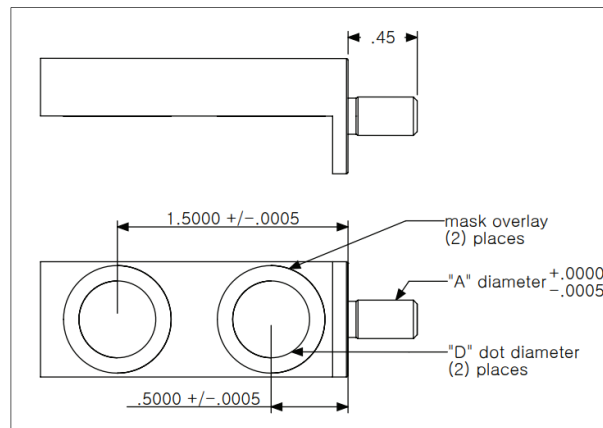


Figure 3.4 Spécifications techniques des artéfacts

Rappelons que l'hypothèse trois est que l'erreur de fabrication des cibles de type « *vector bar* » est considérée comme négligeable dans le bilan des incertitudes. Comme il est présenté à la Figure 3.4, l'erreur de fabrication des cibles ( $\pm 0.0005$  po pour l'ensemble des dimensions, longitudinales et par rapport au pivot) est en effet négligeable comparativement au reste du système de mesure.

### 3.4.2 Fonctionnement des artéfacts

Afin de suivre une pièce en temps réel, le système de mesure doit minimalement connaître la position de trois points sur cette dernière. La position de ces points est obtenue de la façon suivante :

- L'appareil de photogrammétrie perçoit les coordonnées  $(x, y, z)$  pour chaque cible (en **rouge**), voir Figure 3.5, composant l'artéfact.
- Comme l'artéfact est composé de deux cibles, il est possible de créer un vecteur (en **bleu**) à partir de ces dernières.
- En supposant que l'artéfact est parfait, la distance entre la cible 1 et le point d'intersection (en **vert**) est connue et fixe.
- Il est donc possible de déduire les coordonnées de ce point. Ce dernier correspond au point d'intersection entre les artéfacts et la pièce.

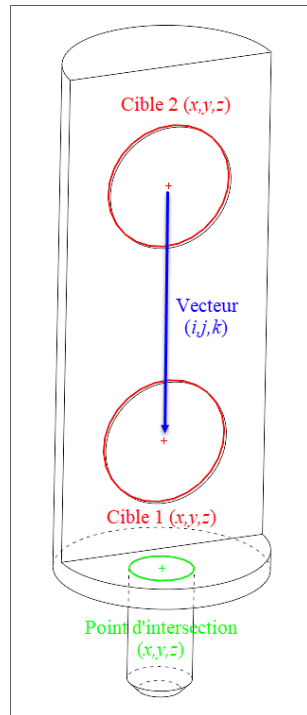


Figure 3.5 Fonctionnement des artéfacts

### 3.4.3 Définition de la fonction de mesure

Dans le cadre de notre projet, le système de mesure (C-Track™ et artéfacts) fournit des coordonnées  $x$ ,  $y$  et  $z$  dans un espace 3D. Ces coordonnées représentent la position des cibles rétro réfléchissantes sur les « *vector bar* » dans l'espace en fonction d'un système de coordonnées préétablis. Comme les artéfacts sont en contact direct avec la pièce à l'étude, il est possible de déduire la position et l'orientation de ce dernier, et ce en analysant certaines caractéristiques clés. Il s'agit ainsi d'une fonction de mesure indirecte. L'influence des paramètres n'est donc pas explicite et linéaire. La Figure 3.6 présente un schéma décrivant ce système de mesure. L'appareil de photogrammétrie (C-Track™, en **vert**) perçoit l'artéfact (en **bleu**). Ce dernier est ensuite positionné dans une géométrie spécifique (en **jaune**) au niveau de la pièce devant être positionnée. En connaissant la position et l'orientation d'un nombre suffisant de géométries au niveau de la pièce en mouvement, il est finalement possible de déduire la position et l'orientation globale de la pièce dans un espace 3D (en **noir**).

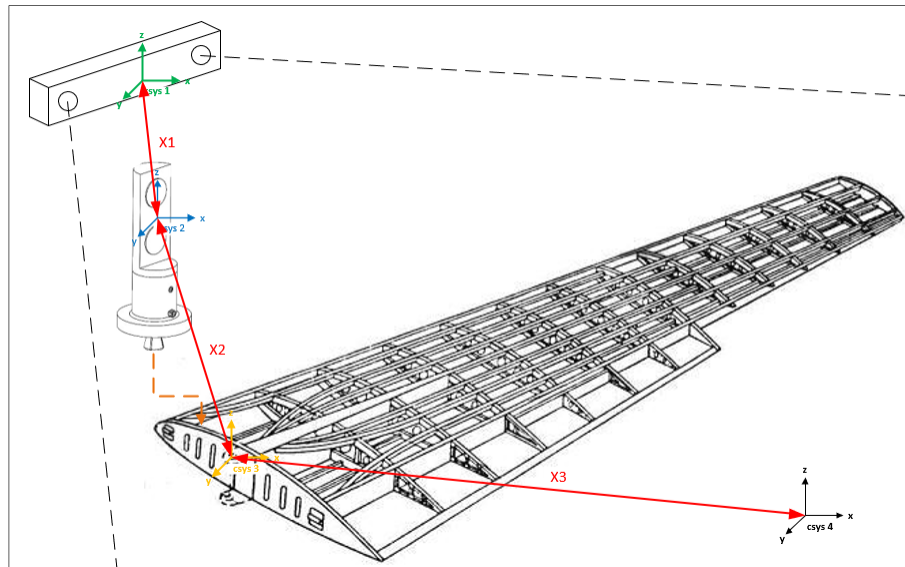


Figure 3.6 Schéma de la fonction de mesure primaire

Pour chaque géométrie à l'étude, une fonction de mesure primaire peut être décomposée en trois fonctions secondaires définissant la position et l'orientation entre :

- Le C-Track™ et l'artéfact (X1);
- L'artéfact et la géométrie de la pièce (X2);
- La géométrie de la pièce et le système global de coordonnées (X3).

Comme présenté à la section 2.3.2, la fonction de mesure primaire est ainsi affectée par trois fonctions de mesure secondaires. Ces dernières doivent aussi être définies afin de pouvoir analyser l'incertitude finale du système de mesure, tel que présenté à la Figure 3.7.

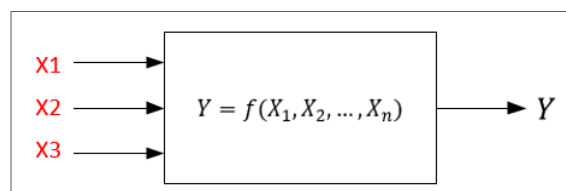


Figure 3.7 Fonction de mesure primaire

Par exemple, analysons la fonction secondaire représentant la position et l'orientation entre l'artéfact et une géométrie spécifique sur la pièce ( $X2$ ). Cette dernière est affectée par les paramètres suivants :

- Paramètre entre les cibles rétro-réfléctives et la base de la cible ( $X2\_1$ );
- Paramètre entre la base de la cible et la base de l'artéfact ( $X2\_2$ );
- Paramètre (point d'intersection) entre la base de l'artéfact et une caractéristique sur la pièce à l'étude ( $X2\_3$ ).

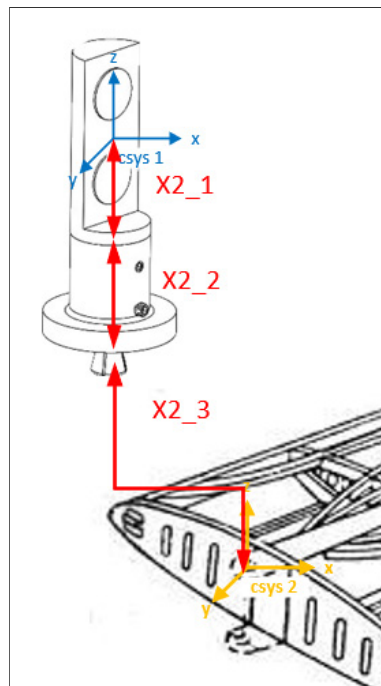


Figure 3.8 Schéma de la fonction de mesure secondaire

Malheureusement, cette fonction de mesure est complexe à déterminer et il en va de même pour les deux autres fonctions de mesure secondaires. Dans ce contexte, comme présenté à la section 2.3.8, une méthodologie empirique permettra de déterminer l'amplitude de l'incertitude de mesure associée à l'utilisation de ces artéfacts lors du positionnement d'une pièce dans un système de coordonnées global. La méthodologie utilisée est inspirée des recommandations du guide MSA mais adaptée à notre contexte (Automotive Industry Action Group, 2010).

### **3.5 Méthodologie proposée**

Le guide MSA (Automotive Industry Action Group, 2010) donne les lignes directrices permettant de déterminer expérimentalement l'incertitude de mesure associée à un système de mesure. La méthodologie proposée s'appuie sur deux jalons. Premièrement, une étude de répétabilité est effectuée pour estimer le biais et la répétabilité propre (inhérente) au système de mesure. Ensuite, une étude exhaustive de répétabilité et reproductibilité est réalisée pour identifier si les manipulations effectuées par les opérateurs ont un effet significatif sur la performance du système de mesure. Cette section présente la méthodologie qui est proposée.

#### **3.5.1 Conception d'un assemblage pour les manipulations expérimentales**

Dans le cadre de nos travaux, la nature de la pièce à l'étude n'est pas tenue en compte. En effet, en industrie, lors d'une analyse de système de mesure, la taille et la géométrie de la pièce à inspecter peuvent influencer les conclusions des analyses. C'est pourquoi lors d'études complètes de répétabilité et reproductibilité un échantillon de  $\geq 10$  pièces est généralement sélectionné spécifiquement pour représenter la variation du procédé de fabrication (voir section 2.3.8.2). Dans notre cas, ce sont plutôt des caractéristiques clés d'une seule pièce qui sont analysées. Il nous est pratiquement impossible de produire une pièce pouvant représenter tous les cas de figure possibles décrits par la norme ASME Y14.5. Cependant, l'analyse de caractéristiques sur cette dernière permet de faire un tour d'horizon assez large pour représenter la réalité. La Figure 3.9 présente l'assemblage utilisé pour effectuer les manipulations expérimentales.

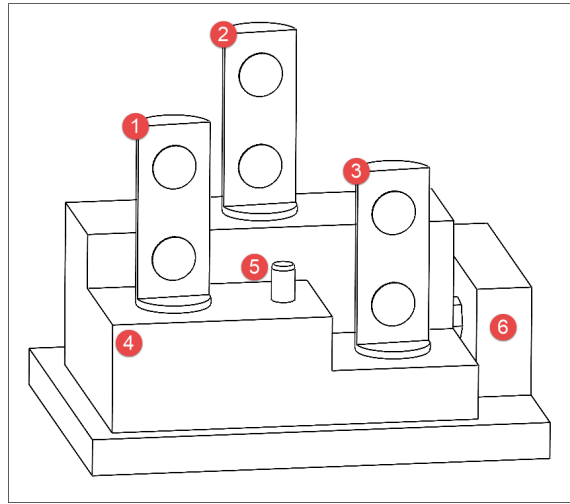


Figure 3.9 Assemblage utilisé pour les manipulations expérimentales

Comme il est possible de voir, les artéfacts (1, 2 et 3) sont directement positionnés à l'intérieur des trois alésages de la pièce (4) et ce pour simplifier au maximum ces derniers (aucune extension ou base n'est utilisée). Cela a pour effet de réduire les possibles sources de variation du système de mesure, dans ce cas, celles causées par les erreurs de fabrication des artéfacts. La position (coordonnées  $x$ ,  $y$  et  $z$ ) des points d'intersection entre les systèmes de vision de type « *vector bar* » et la pièce à l'étude est analysée lors de l'étude de répétabilité. De plus, lors de cette étude, l'assemblage pièce/artéfacts doit être utilisé avec une base (6). Cette dernière permet de positionner la pièce au même endroit, peu importe les manipulations effectuées par les opérateurs (la reproductibilité n'exerce donc aucune influence sur le système). La Figure 3.10 présente cette composante.

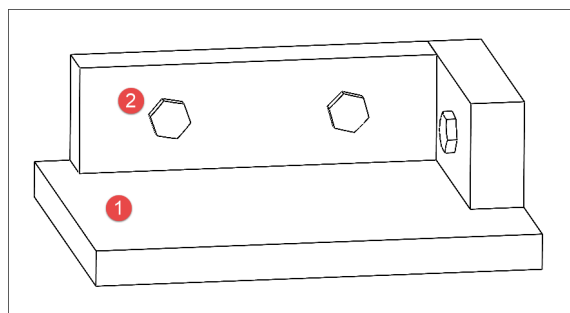


Figure 3.10 Base pour le positionnement de la pièce

La surface plane (1) de la base permet de bloquer les trois premiers degrés de liberté (une translation et deux rotations) de la pièce à l'étude. Ensuite, les trois vis de contact (2) permettent de bloquer les degrés de liberté restants (deux translations et une rotation). Lors de l'étude R&R, les positions des points d'intersection entre les artéfacts et la pièce à l'étude sont utilisées pour bloquer les six degrés de liberté de la pièce afin de positionner cette dernière. Lors de cette deuxième phase, la position (coordonnées  $x$ ,  $y$  et  $z$ ) d'un goujon (caractéristique clé) (5) peut être estimée en fonction de la position et l'orientation générale de la pièce par rapport à un système de coordonnées global.

### 3.5.2 Paramètres du système de mesure

Cette étape permet de définir l'ensemble des paramètres pouvant affecter la performance d'un système de mesure. En effet, les guides MSA (Automotive Industry Action Group, 2010) ou GUM (Bureau International des poids et mesures, 2008a) définissent le système de mesure comme étant l'ensemble des instruments ou de jauges, de normes, d'opérations, de méthodes, de gabarits, de logiciels, de personnel, d'environnement et d'hypothèses utilisés pour fixer la valeur vraie d'une caractéristique clé. Dans le cas du présent projet, les paramètres du système sont définis comme :

- Environnement de travail (Laboratoire de métrologie, ÉTS);
  - a. Température (elle est contrôlée à  $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ );
  - b. Taux d'humidité;
- Système de mesure (appareil de photogrammétrie C-Track™|Elite de Creaform);
  - a. La calibration de l'appareil de photogrammétrie;
  - b. Le temps minimal de chauffe du système qui est fixé à 30 minutes (valeur recommandée par le fabricant de l'équipement);
  - c. Le volume d'utilisation ( $< 16.6 \text{ m}^3$ );
- Logiciel de traitement des données (coordonnées des cibles);
  - a. VXelement™, notamment le module VXtrack™, est utilisé pour recueillir les données, les traiter et les exporter sous la forme d'un nuage de points (format .txt);

- b. PolyWorks|Inspector™ est utilisé pour traiter les données de mesures pour extraire les caractéristiques clés;
- Manipulations : Un guide de manipulation pour l'usage des différents opérateurs est produit pour expliquer les différentes manipulations à effectuer;
  - Nombre d'opérateurs : Trois (3) opérateurs procèdent aux tests;
  - Pièce : Une seule pièce comportant plusieurs caractéristiques clés.

### 3.5.3 Étude de répétabilité

À partir des différents paramètres du système de mesure, il est possible d'identifier certains facteurs ( $x_i$ ) qui ont le potentiel d'influer la réponse ( $Y$ ) de ce dernier. La Figure 3.11 représente ce concept.

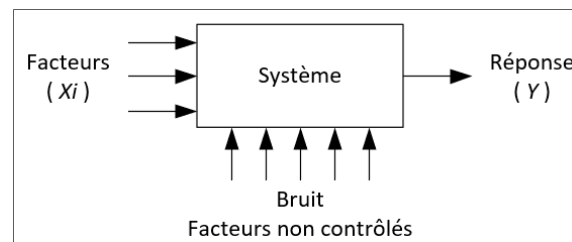


Figure 3.11 Facteurs influençant le système

Ici, le bruit provient des facteurs non contrôlés et fait donc partie intégrante du système sans que l'on puisse le quantifier clairement. Ensuite, certains facteurs sont fixes, par exemple, la calibration du système doit absolument être effectuée avant la prise de mesure, de même que le temps de chauffe minimal du système doit être atteint. Finalement, certains facteurs ( $x_i$ ) peuvent être quant à eux contrôlés et il est ainsi possible de quantifier leur effet sur la réponse du système. La première phase de notre méthodologie est donc de réaliser une étude de répétabilité dans le but de déterminer si ces derniers exercent une influence significative sur le système de mesure. Dans le contexte de l'étude, la réponse ( $Y$ ) est définie comme étant le biais et la répétabilité du système. Quant aux facteurs ( $x_i$ ), ils sont identifiés comme :



- Le temps de chauffe de l'appareil de photogrammétrie, après le temps minimal de chauffe de 30 minutes;
- La profondeur de champ par rapport à l'appareil de photogrammétrie (axe  $z$ , Figure 3.12);
- La position par rapport à l'appareil de photogrammétrie (axes  $x$  et  $y$ , Figure 3.12).

Habituellement, l'influence de ces facteurs peut être obtenue en analysant les spécifications techniques fournies par le fabricant de l'appareil de photogrammétrie, tel que présenté en ANNEXE VI. Cependant, dans le contexte du présent projet, nous ajoutons de nouveaux éléments (artéfacts, logiciel, etc.) au système de mesure et il est primordial de réévaluer les performances métrologiques de ce dernier. Ainsi, dans le but de déterminer les effets des facteurs identifiés plus haut sur la réponse du système, un plan d'expérimentation factoriel complet est déployé. Dans l'ensemble des cas, plus de deux niveaux sont utilisés pour les tests afin d'identifier les effets non linéaires (associé au principe de linéarité tel que présenté en ANNEXE II) de ces derniers (voir Tableau 3.2).

Tableau 3.2 Niveaux des facteurs candidats

Facteurs	Niveaux				
	1	2	3	4	5
Temps de chauffe (min)	0	60	180	300	
Profondeur de champ (z mm)	2000	2500	3000	3750	4000
Position ( $x, y$ mm)	0,0	-400,0	400,0	0,-400	0,400

La Figure 3.12 présente une schématisation 3D des niveaux des facteurs pour la profondeur de champ ainsi que la position. Chaque test est représenté par un point rouge.

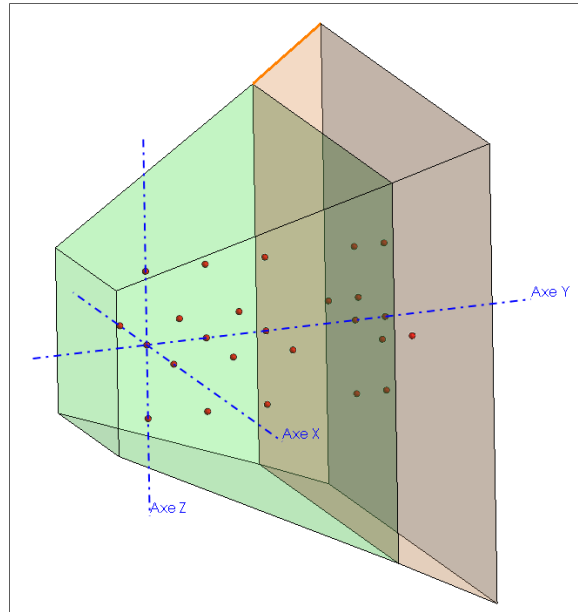


Figure 3.12 Schématisation des niveaux des facteurs

Comme mentionné plus haut, l'assemblage (pièce, base et artéfacts) présenté à la Figure 3.9 est utilisé pour l'étude de répétabilité. La configuration avec la base permet de minimiser les sources de variations pouvant affecter le système (ex. manipulations des opérateurs). De plus, comme la base est fixée sur le tablier d'une MMT, cette dernière peut être utilisée afin de définir des valeurs de référence pour la position des trois alésages sur la pièce. Ces valeurs de référence permettent ensuite d'identifier le biais du système de mesure. La Figure 3.13 présente le montage expérimental utilisé pour l'étude de répétabilité.



Figure 3.13 Montage expérimental pour l'étude de répétabilité

Pour chaque configuration du plan d'expérience, 30 mesures sont prises au niveau de la position (coordonnées  $x$ ,  $y$  et  $z$ ) des points d'intersection entre les artéfacts et la pièce. Les calculs statistiques présentés à la section 2.3.8.1 sont déployés pour estimer la répétabilité et le biais pour chacun des essais, et ce, pour l'ensemble des points (3). Afin de simplifier les expérimentations, le premier facteur, le temps de chauffe, est évalué séparément des deux derniers (profondeur de champ et position). Ainsi, la première étape de l'étude est de déterminer si le temps de chauffe influence la réponse du système mesure. Quatre essais (niveaux) sont effectués à une position fixe à l'avant du volume de travail ( $\approx 2000$  mm) de l'appareil. La seconde étape de l'étude permet quant à elle de déterminer si la position et la profondeur de champ influencent significativement la réponse du système. Celle-ci est composée de 25 essais (5 profondeurs de champ  $\times$  5 positions). Habituellement, l'erreur de linéarité d'un système de mesure peut être incluse dans la calibration de ce dernier. Cependant, comme le biais est calculé à différents endroits sur l'étendue de mesure du système, il est également possible de déterminer la linéarité expérimentalement.

Enfin, nous rappelons au lecteur notre quatrième hypothèse qui stipule que l'erreur de fabrication de la composante est considérée comme significative, il y a donc une différence entre la pièce nominale et la pièce réelle (telle que fabriquée). Afin de déterminer s'il est nécessaire d'utiliser les valeurs mesurées des géométries servant au positionnement, une comparaison entre les valeurs de biais des points d'intersection (biais avec pièce réelle et biais avec pièce nominale) dans les directions  $x$ ,  $y$  et  $z$  sera effectuée.

### **3.5.4 Étude de répétabilité et reproductibilité**

L'étude de répétabilité permet d'identifier et d'optimiser le niveau des facteurs qui influencent la répétabilité et le biais du système de mesure de manière significative. Cependant, pour reporter la performance du système de mesure dans son entièreté, il est impératif de tenir compte de son utilisation dans un contexte réel. Par conséquent, la deuxième phase de notre méthodologie est d'effectuer une étude R&R comme présentée à la section 2.3.8.2. Il est donc possible d'estimer la variation totale en tenant compte simultanément de l'erreur due à l'équipement de mesure, mais aussi de l'influence des opérateurs et des pièces à l'étude. À

noter, selon l'AIAG, une analyse R&R permet d'estimer efficacement si le système de mesure est adéquat pour :

- Détecter les bonnes et les mauvaises pièces;
- Déterminer si le système peut être utilisé pour effectuer un contrôle statistique du procédé de fabrication.

Pour rappel, l'objectif du présent projet de maîtrise étant d'estimer les performances métrologiques d'un système de mesure 3D par photogrammétrie, associé à des artéfacts, dans un contexte d'assemblage assisté par la métrologie. La mise en application reste ainsi très générale et l'amplitude de l'incertitude de mesure associée à l'utilisation de ces artéfacts lors du positionnement d'une pièce par rapport à une autre doit être déterminée dans cet ordre d'idée. Comme le contexte de l'étude diffère d'un contexte de production, il n'est pas utile de déterminer si le système de mesure peut être utilisé pour effectuer le contrôle statistique de procédé, mais bien de déterminer quel est l'ordre de grandeur des tolérances pouvant être contrôlées avec le système. Ainsi, plutôt que d'effectuer l'étude sur plusieurs pièces représentant la variation du procédé de fabrication, cette dernière est effectuée sur une KC et sur la façon de positionner et orienter la composante. Il est important de noter que les sources de variance associées aux pièces et aux interactions pièce  $\times$  opérateur ne sont pas prises en compte dans les calculs présentés en ANNEXE III.

La pièce utilisée correspond à l'item 4 de la Figure 3.9 et la KC à l'étude correspond au goujon (item 5). L'étude de répétabilité est effectuée directement sur les données brutes, coordonnées  $x$ ,  $y$  et  $z$  des points d'intersection entre les artéfacts et la pièce, provenant de l'appareil de photogrammétrie. L'étude R&R quant à elle est effectuée sur la position et l'orientation de la pièce afin de représenter un cas de figure réaliste. Les points d'intersection entre les artéfacts et la pièce sont ici utilisés pour aligner la composante dans le système de coordonnées global. Un algorithme de recalage de type gaussien est utilisé pour minimiser la somme des erreurs au carré des points d'intersection sur la pièce (dans le repère global) vers le modèle de suivi (composé par les artéfacts). La Figure 3.14 présente le montage expérimental.

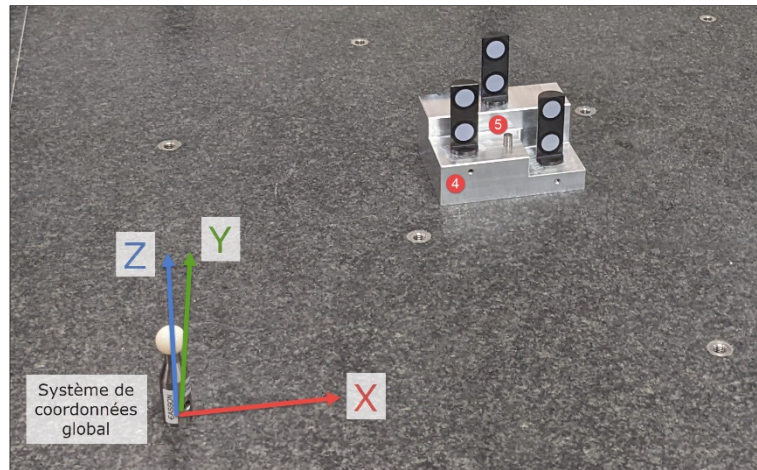


Figure 3.14 Montage expérimental de l'étude R&R

Comme il est possible de le voir, la pièce est positionnée sur le tablier de la MMT. Cela veut donc dire que trois degrés de liberté sont bloqués ( $T_z, R_x, R_y$ ) par le montage expérimental. Il reste ainsi trois degrés de liberté à bloquer ( $T_x, T_y, R_z$ ). Pour ce faire, la position du goujon (coordonnées  $x$  et  $y$ ) est utilisée. Quant à la rotation, il est possible de calculer l'orientation générale de la pièce grâce à l'algorithme de recalage. Afin de réaliser les manipulations, les trois opérateurs ont accès à un « *DRO* » fournissant la position du goujon ainsi que l'orientation de la pièce. En suivant les indications à l'écran, il est possible de positionner la pièce dans le système de coordonnées global selon un seuil d'acceptabilité. Ce dernier est de 0,500 mm ( $\approx 10$  fois la performance du système de photogrammétrie tel que fourni par le fabricant). L'étude R&R représente donc un cas d'utilisation typique de MAA, tout en considérant l'effet des manipulations de trois opérateurs.

### 3.6 Manipulations expérimentales

Pour répondre aux sous-problèmes exposés précédemment, il est primordial de procéder à des manipulations expérimentales de façon structurée. Cette section présente les procédures qui permettent de quantifier la performance du système de mesure à positionner une pièce dans un espace 3D.

### 3.6.1 Mesure de la position de référence

Afin de pouvoir identifier un potentiel biais au niveau du système de mesure, il est primordial de définir des valeurs de références avec lesquelles il est possible de comparer les valeurs obtenues par l'appareil de photogrammétrie. Ces dernières sont obtenues à l'aide d'une MMT (DEA GLOBAL Advantage™). Cet appareil présente les meilleures performances métrologiques possibles au LIPPS (précision d'environ 10  $\mu\text{m}$ ). Comme mentionné plus haut, lors de l'étude de répétabilité, l'utilisation d'une base (item 4 de la Figure 3.9) permet de bloquer l'ensemble des degrés de liberté de la pièce afin de s'assurer qu'elle soit toujours physiquement au même endroit sur le tablier de la MMT, et ce avec une répétabilité minimale. Cette répétabilité est notamment comparée avec celle fournie par le fabricant de l'appareil de photogrammétrie. Elle doit être 10 plus petites que celle de l'équipement afin de s'assurer que le montage expérimental n'induit pas de nouvelles sources de variation dans l'étude. Le montage expérimental permet aussi d'identifier la répétabilité propre au système de mesure en analysant les coordonnées brutes provenant de ce dernier. En théorie, le système devrait toujours percevoir la même position pour les artéfacts, car la pièce est physiquement au même endroit. La Figure 3.15 présente l'assemblage pièce et base une fois fixé sur le tablier de la MMT.

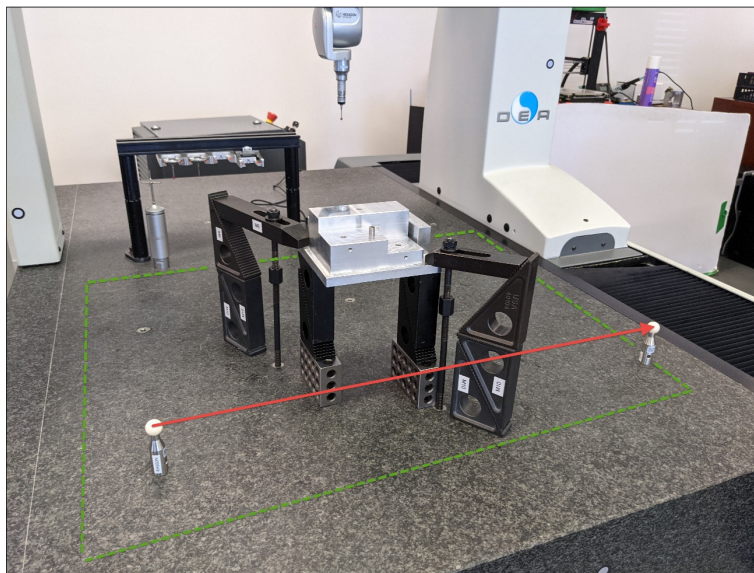


Figure 3.15 Mesure de la position de référence sur la MMT

Une fois la pièce positionnée, il est primordial de créer un système de coordonnées global dans lequel la position des points d'intersection entre les artéfacts et des alésages de la pièce sont reportés. Ce système de coordonnées sera de type plan-ligne-point. Le plan (en **vert**) correspond au tablier de la MMT, la ligne (en **rouge**) est calculée en utilisant le centre des deux sphères d'outillage (en **blanc**) et le point correspond au centre de la sphère d'outillage de gauche. Ces géométries seront aussi utilisées pour positionner le C-Track™ par rapport au même système de coordonnées. Finalement, après la création de cette référence globale, il est possible de venir palper les trois points d'intersection avec la MMT afin de définir les valeurs de référence pour l'étude de répétabilité. Il est à noter que ces valeurs de référence tiennent compte des dimensions telles que fabriquées de la pièce. Elles pourront donc être utilisées pour déterminer si l'utilisation des dimensions réelles d'une pièce exerce une influence sur le positionnement de celle-ci comparativement à l'utilisation de ses dimensions nominales.

### 3.6.2 Préparation du système de photogrammétrie

La préparation du système de photogrammétrie est une étape essentielle au bon fonctionnement du système de mesure. Pour ce faire, les étapes suivantes devront être effectuées :

- **Alignement du C-Trak™|Elite au système de coordonnées global :** À l'aide du HandyPROBE Next™|Elite<sup>1</sup>, dans VXelement™, dans le module VXprobe™, palper le plan et les deux billes d'outillage. Il faut ensuite créer un alignement plan-ligne-point en utilisant les caractéristiques palpées. Le système de photogrammétrie est ainsi aligné au système de coordonnées global;
- **Création de cibles de positionnement du C-Trak™|Elite :** Pour commencer, des cibles rétro réfléchives sont positionnées dans l'environnement de travail du système de photogrammétrie. Dans VXelement™, dans le module VXprobe™, il faut créer un modèle de cibles avec ces dernières. Celles-ci permettront au C-Track™ de garder son alignement en mode dynamique au cours des expérimentations;

---

<sup>1</sup> Le système HandyPROBE™ se connecte directement au C-Track™ et permet d'utiliser ce dernier comme une MMT optique.

- **Création d'un modèle de suivi :** La dernière étape permet de définir un modèle de cibles devant être suivi en temps réel par l'appareil de photogrammétrie. Ces cibles correspondent aux artéfacts (six cibles au total). Dans VXelement™, dans le module VXtrack™, les cibles devront être sélectionnées manuellement et renommées pour correspondre aux artéfacts associés.

Une fois ces trois étapes effectuées, le système de photogrammétrie est en mesure d'obtenir en temps réel les coordonnées  $(x, y, z)$  des six cibles composant les artéfacts, et ce en fonction du système de coordonnées global. Il ne reste plus qu'à analyser ces données pour déterminer la position et l'orientation de la pièce à l'étude.

### 3.6.3 Acquisition des données

Cette dernière étape permet de définir la position et l'orientation de la pièce dans l'espace par rapport au système de coordonnées global. Comme le système de métrologie 3D utilisé (C-Track™) ne communique pas directement avec le logiciel d'analyse PolyWorks|Inspector™. Il a donc fallu développer une application qui permet de faire le lien entre l'appareil et le logiciel de métrologie. Cette application permet d'exporter les coordonnées  $(x, y, z)$  des six cibles faisant partie du modèle de suivi vers le logiciel PolyWorks|Inspector™. L'ensemble des résultats pourront ainsi être analysés à l'aide de cette plateforme. On réfère à l'ANNEXE VIII pour le fonctionnement de l'application. Comme présenté à la section 3.4.2, l'appareil de photogrammétrie perçoit deux cibles par artéfact, pour ensuite déterminer les coordonnées du point d'intersection entre les artéfacts et la pièce à l'étude.



## CHAPITRE 4

### EXPÉRIMENTATIONS & ANALYSE DES RÉSULTATS

Le présent chapitre présente les manipulations expérimentales et une analyse des résultats obtenus. La première partie présente l'étude de répétabilité composée de la mesure de la position de référence de la pièce à l'étude par une MMT, l'analyse de l'effet du temps de chauffe ainsi que l'analyse de l'influence de la profondeur de champ et de la position. Les modèles mathématiques présentés précédemment à la section 2.3 sont déployés :

- Les biais locaux et le biais moyen sont calculés à partir des équations 2.6 et 2.7, et ce dernier est déterminé comme étant statistiquement significatif en utilisant un test de *Student* (équations 2.8 et 2.9);
- L'écart type associé à la répétabilité du système de mesure est estimé à l'aide de l'équation 2.5 et la répétabilité expansée (*EV*) est calculée avec l'équation 2.16;
- Finalement, l'IC (intervalle de confiance) pour le biais moyen est calculé avec l'équation 2.12 comme l'IC pour l'écart type avec l'équation 2.13.

Pour la seconde partie, l'étude de répétabilité et reproductibilité, les formules utilisées sont présentées à l'ANNEXE III. De plus, comme mentionnés à la section 3.3, les certificats de calibration pour la MMT et l'appareil de photogrammétrie sont disponibles à l'ANNEXE IV et à l'ANNEXE V respectivement. Cependant, comme le certificat de la MMT date de 2015, un test supplémentaire est effectué afin de s'assurer de la conformité des résultats. Le test est basé sur la norme ISO 10360-2:2009 (ISO, 2009). Ce test permet de vérifier que les performances d'une MMT utilisée pour les mesures de dimensions linéaires respectent les spécifications de l'appareil et correspondent bien au certificat de calibration.

#### 4.1 Mesure de la position de référence sur une MMT

Pour réaliser l'étude de répétabilité, il est primordial de déterminer une valeur de référence pour la position des trois (3) points représentant l'intersection entre les artéfacts et la pièce à l'étude, et ce dans le système global de coordonnées. Pour ce faire, la moyenne des résultats pour les coordonnées  $x$ ,  $y$  et  $z$  de chaque point d'intersection mesuré sur la MMT, représente la valeur de référence pour l'étude de répétabilité avec le C-Track™. La position mesurée à l'aide du système de mesure à l'étude (artéfacts et C-Track™) devrait correspondre statistiquement à celle mesurée à l'aide de la MMT. Les Tableau 4.1, Tableau 4.2 et Tableau 4.3 présentent un résumé des résultats expérimentaux obtenus lors de la mesure des positions de référence. On réfère à l'ANNEXE IX pour les résultats détaillés.

Tableau 4.1 Position de référence pour le point 1

	Coordonnées $X$			Coordonnées $Y$			Coordonnées $Z$		
	$X$	IC à 95% ( $\mu\text{m}$ )		$Y$	IC à 95% ( $\mu\text{m}$ )		$Z$	IC à 95% ( $\mu\text{m}$ )	
Moyenne (mm)	192,176	$\pm 0,26$		53,7493	$\pm 0,18$		201,375	$\pm 0,29$	
Écart Type ( $\mu\text{m}$ )	0,61	+ 0,21	- 0,12	0,42	+ 0,14	- 0,09	0,66	+ 0,23	- 0,13
$EV$ ( $\mu\text{m}$ )	3,66	+ 1,26	- 0,74	2,52	+ 0,87	- 0,51	3,97	+ 1,37	- 0,81

Tableau 4.2 Position de référence pour le point 2

	Coordonnées $X$			Coordonnées $Y$			Coordonnées $Z$		
	$X$	IC à 95% ( $\mu\text{m}$ )		$Y$	IC à 95% ( $\mu\text{m}$ )		$Z$	IC à 95% ( $\mu\text{m}$ )	
Moyenne (mm)	220,735	$\pm 0,68$		92,3114	$\pm 0,13$		216,476	$\pm 0,26$	
Écart Type ( $\mu\text{m}$ )	1,57	+ 0,54	- 0,32	0,30	+ 0,10	- 0,06	0,61	+ 0,21	- 0,12
$EV$ ( $\mu\text{m}$ )	9,40	+ 3,24	- 1,91	1,83	+ 0,63	- 0,37	3,65	+ 1,26	- 0,74

Tableau 4.3 Position de référence pour le point 3

	Coordonnées X			Coordonnées Y			Coordonnées Z		
	X	IC à 95% (µm)		Y	IC à 95% (µm)		Z	IC à 95% (µm)	
Moyenne (mm)	252,144	± 0,31		55,959	± 0,12		186,418	± 1,06	
Écart Type (µm)	0,72	+ 0,25	- 0,15	0,29	+ 0,10	- 0,06	2,44	+ 0,84	- 0,50
EV (µm)	4,34	+ 1,50	- 0,88	1,73	+ 0,60	- 0,35	14,67	+ 5,05	- 2,99

En examinant les valeurs de la répétabilité du système  $EV^2$ , il est possible de confirmer que les coordonnées obtenus à l'aide de la MMT peuvent être utilisés comme référence pour l'étude de répétabilité avec les artéfacts et le C-Track™. En effet, à la section 3.6.1, un facteur d'environ 10 entre la performance de la MMT et le C-Track™, avait été sélectionné comme critère d'acceptation pour la performance de la MMT par rapport au système de photogrammétrie.

## 4.2 Analyse de l'effet du temps de chauffe

Une fois la position de référence de la pièce à l'étude mesurée, il est possible de débiter l'analyse du système de mesure composé du C-Track™ et des artéfacts. La première étape consiste à déterminer si l'effet du temps de chauffe de l'appareil de photogrammétrie exerce une influence notable sur le biais et la répétabilité du système. Pour ce faire, le C-Track™ est positionné à une distance fixe (Tableau 4.4) de la pièce pour la durée de l'étude.

Tableau 4.4 Position du C-Track™ lors de l'étude sur le temps de chauffe

Coordonnées (mm)		
X	Y	Z
-7,80	10,50	1936,00

---

<sup>2</sup> Exprimée ici selon le niveau de vraisemblance de 99,73% ou  $6\sigma$

La section 3.5.3 présente les différents niveaux qui sont à l'étude pour le facteur temps de chauffe. Les effets sur le biais et sur la répétabilité sont ainsi mesurés, après une chauffe minimale ( $\approx 0$  minute), après 60, 120 et 180 minutes.

#### 4.2.1 Analyse de l'effet du temps de chauffe sur la répétabilité du système

La Figure 4.1 présente l'évolution de la répétabilité ( $EV$ ) en fonction du temps de chauffe ( $t$ ). On réfère à l'ANNEXE IX pour les résultats détaillés.

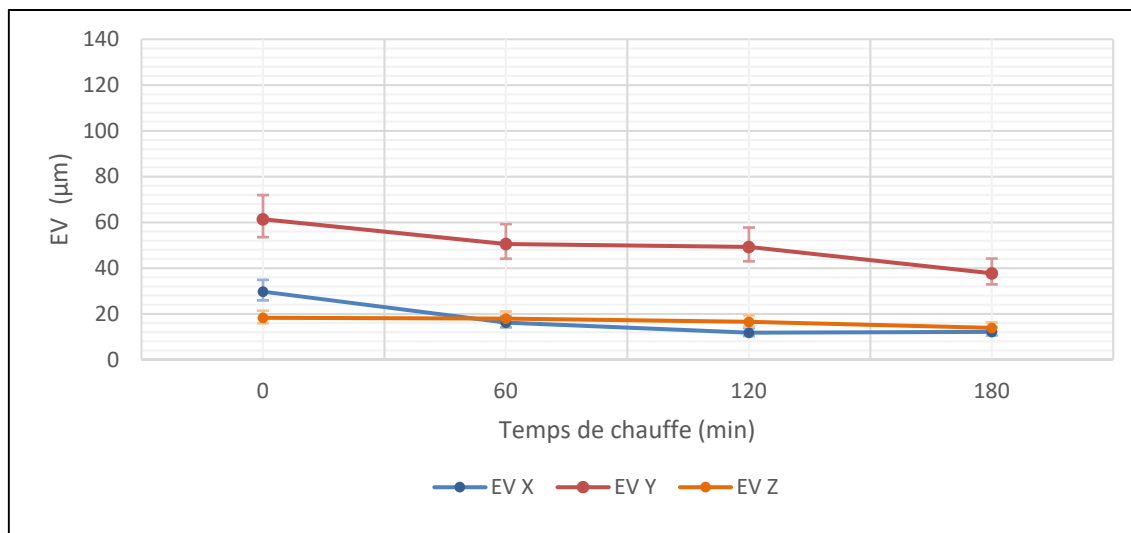


Figure 4.1 Évolution de  $EV$  en fonction de  $t$

En examinant la Figure 4.1, il est possible de constater une tendance pour la répétabilité du système selon l'axe  $X$  et l'axe  $Y$  en fonction du temps de chauffe (diminution de presque de moitié). Cela voudrait ainsi dire que, plus la température du système se stabilise, plus sa répétabilité diminue (l'appareil devient plus performant) pour atteindre une sorte de plateau. Pour confirmer cette hypothèse, une régression linéaire entre la répétabilité en  $Y$  comme réponse et le temps de chauffe comme prédicteur permet de mettre en évidence ce lien. La même méthodologie est effectuée pour l'axe  $X$  et  $Z$ , le Tableau 4.5 présente un récapitulatif des résultats des régressions linéaires.

Tableau 4.5 Modèles de régression entre  $EV$  en  $X$ ,  $Y$  et  $Z$  et  $t$ 

Modèle de régression			Coefficients	
Axe	$R^2(\%)$	Équation	Terme	Valeur de $p$
$X$	76,9	$EV X = 26,04 - 0,0954 t$	Constante	0,024
			Temps $t$	0,123
$Y$	93	$EV Y = 60,55 - 0,1204 t$	Constante	0,002
			Temps $t$	0,036
$Z$	88,1	$EV Z = 18,85 - 0,0242 t$	Constante	0,001
			Temps $t$	0,061

Pour déterminer si le niveau de la répétabilité (selon un axe) est influencé par le temps de chauffe d'une manière significative, il suffit d'examiner si la valeur de  $p^3$  ( $p\_value$ ) est plus petite ou égale au seuil de l'erreur type I qui a été retenu : 0,05 (ou, un niveau de confiance à 95%). Selon les résultats, il n'est pas possible d'affirmer que le temps de réchauffe ( $t$ ) a une quelconque influence sur  $EV$  selon l'axe  $X$ . Cependant, pour les deux autres directions, la  $p\_value$  est plus petite (0,036) ou très proche (0,061) du seuil de signification. Par conséquent, l'association entre la répétabilité du système et le temps de chauffe (selon les axes  $Y$  et  $Z$ ) est significative. Le coefficient de détermination  $R^2$  est élevé (93% et 88,1%). Cela veut donc dire que les modèles de régression sont bien ajustés aux données obtenues expérimentalement. La relation entre  $EV$  en  $Z$  et le temps de chauffe est inattendu, mais probablement attribuable à la manière dont le système de photogrammétrie perçoit les cibles rétro réfléchives sur les artéfacts. En effet, deux cibles sont utilisées par artéfact pour extraire un vecteur orienté selon l'axe  $Z$  du système pour déduire ensuite la position d'un point à l'étude. L'erreur de répétabilité provient fort probablement de ce calcul. Plus le système est chaud, plus la variation de la mesure du vecteur (entre les deux cibles) diminue. En examinant les équations de régression,

---

<sup>3</sup> Probabilité d'effectuer une erreur de type I. Typiquement cette valeur doit être comparée à un seuil toléré, généralement considéré comme égale à 0,05

on peut constater que la pente est négative. Il est donc possible de formuler que plus le temps de chauffe augmente, plus l'erreur de répétabilité de l'équipement diminue selon les axes  $Y$  et  $Z$ . Les Figure 4.2 et Figure 4.3 présentent les résultats des régressions sous forme graphique avec des intervalles de confiance et de prédiction (à 95%).

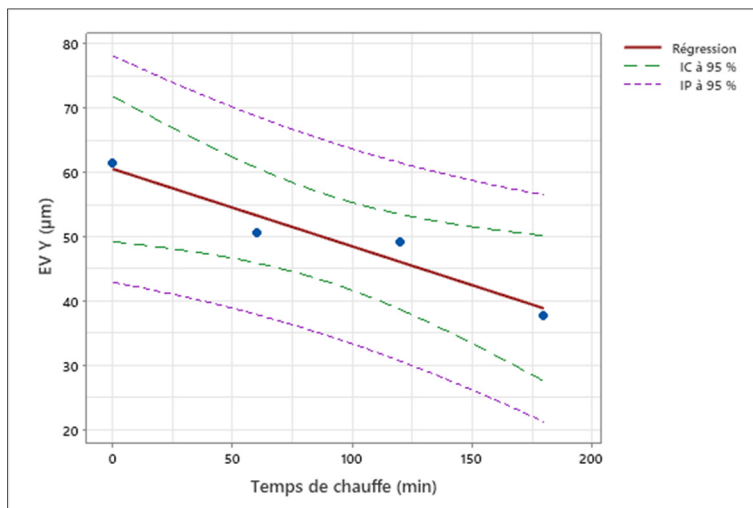


Figure 4.2 Régression linéaire entre  $EV$  en  $Y$  et le temps de chauffe  $t$

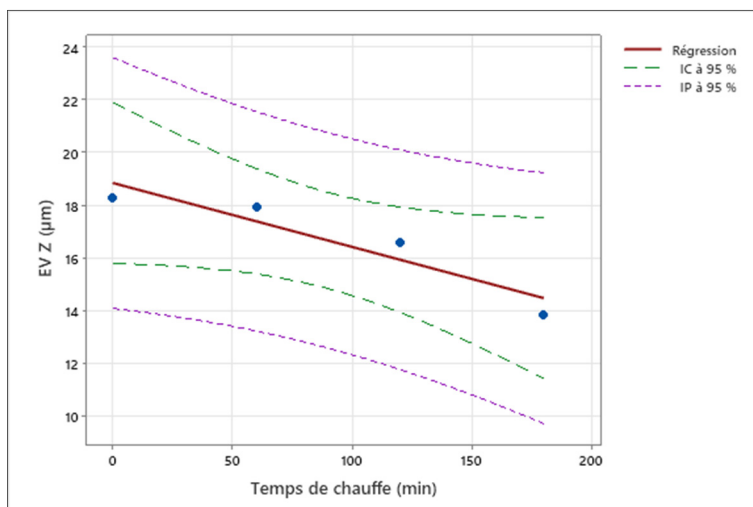


Figure 4.3 Régression linéaire entre  $EV$  en  $Z$  et le temps de chauffe  $t$

### 4.2.2 Analyse de l'effet du temps de chauffe sur le biais

La Figure 4.4 présente l'évolution du biais en fonction du temps de chauffe. On réfère le lecteur à l'ANNEXE IX pour les résultats détaillés.

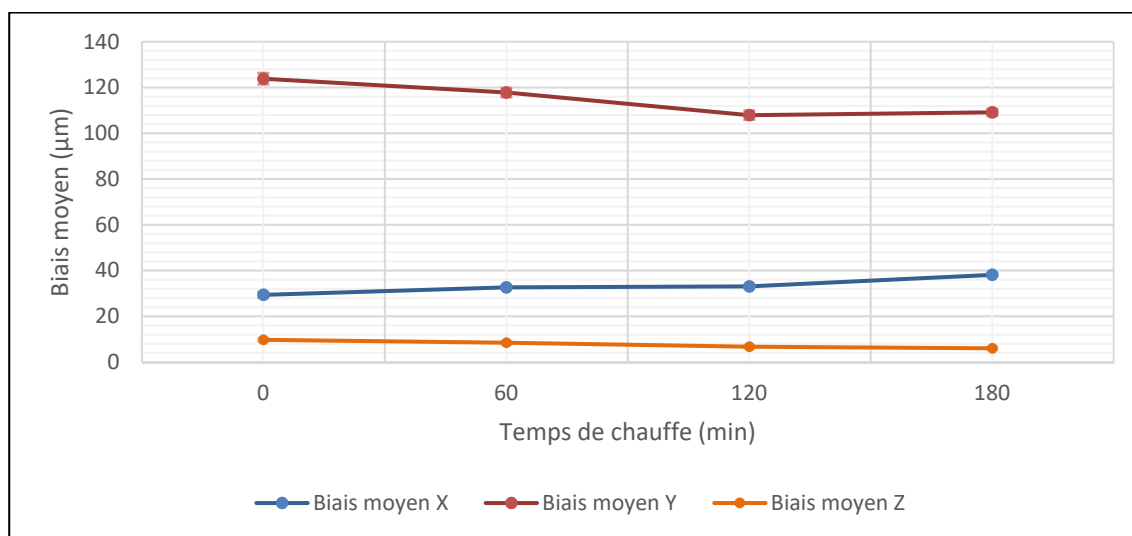


Figure 4.4 Évolution du biais en fonction du temps de chauffe  $t$

En examinant la Figure 4.4, il est possible de constater que le biais moyen selon l'axe  $X$  et  $Z$  est du même ordre de grandeur que la performance volumétrique<sup>4</sup> de l'appareil de photogrammétrie : 50  $\mu\text{m}$  pour le volume de travail de 9.1  $\text{m}^3$  dans lequel l'étude est effectuée. Pour ce qui est du biais moyen dans la direction  $Y$ , il est environ deux fois plus grand que l'erreur de répétabilité. Aussi, il est possible de constater une légère tendance à la baisse pour ce dernier en fonction du temps de chauffe ( $t$ ). Pour confirmer cette hypothèse, une régression linéaire entre le biais moyen en  $Y$  (réponse) et le temps de chauffe comme prédicteur est effectuée. Le Tableau 4.6 présente un récapitulatif.

<sup>4</sup> Telle que communiquées par le fabricant de l'équipement.

Tableau 4.6 Modèle de régression entre le biais moyen en  $Y$  et le temps de chauffe  $t$

Modèle de régression			Coefficients	
Axe	$R^2(\%)$	Équation	Terme	Valeur de $p$
$Y$	85,7	$\text{Biais } Y = 122.8 - 0,09 t$	Constante	0,001
			Temps $t$	0,074

On constate que la  $p\_value$  est proche du seuil retenu de 0,05 (0.074). Cela veut ainsi dire que l'association entre la réponse (biais moyen en  $Y$ ) et le prédicteur (temps de chauffe) est, probablement, statistiquement significative (pour trancher, il faut augmenter le nombre de mesures). Le coefficient de détermination  $R^2$  est jugé comme acceptable (85,7%). Cela signifie que l'ajustement offert par le modèle peut être considéré comme satisfaisant. Finalement, on constate que la pente est négative; plus le temps de chauffe augmente, plus le biais diminue pour se stabiliser (on constate un petit plateau). La Figure 4.5 présente le résultat de la régression avec des intervalles de confiance et de prédiction (à 95%).

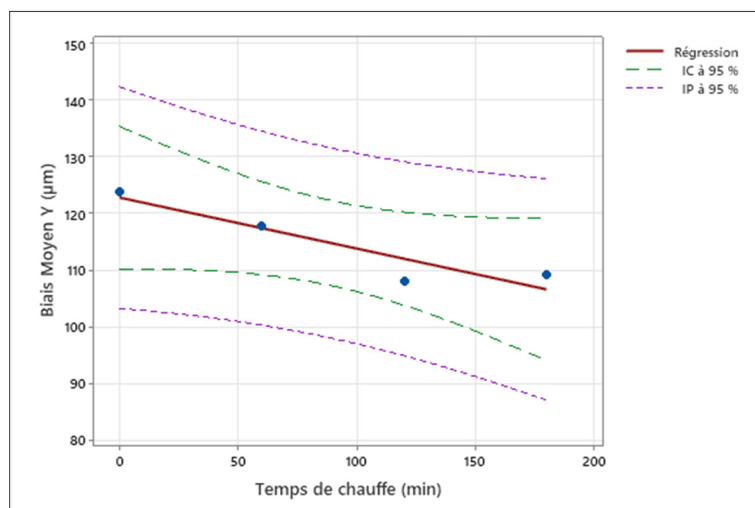


Figure 4.5 Régression linéaire entre le biais moyen en  $Y$  et le temps de chauffe  $t$



### **4.2.3 Conclusion sur l'effet du temps de chauffe**

Les conclusions précédentes confirment ce que nous connaissons du système de mesure par photogrammétrie : la myopie du système (erreur plus grande dans l'axe en profondeur). Une des plus importantes limitations des systèmes de vision utilisant des caméras est leur capacité à percevoir des distances en profondeur. Aussi, le temps de chauffe semble avoir un effet sur la répétabilité du système dans la direction  $Z$ . Ce phénomène provient probablement du fait que les artéfacts utilisent deux cibles orientées selon cet axe afin de déduire la position d'un point. Par conséquent, un temps de chauffe de 24 heures est utilisé pour le reste des manipulations expérimentales. Cela permet au système de mesure, notamment à l'appareil de photogrammétrie, d'acquérir une température stable afin d'optimiser ses performances métrologiques par rapport à ce facteur.

### **4.3 Analyse de l'effet de la profondeur de champ et de la position**

La deuxième étape de l'étude de répétabilité consiste à déterminer si l'effet de la profondeur de champ et la position de l'appareil de photogrammétrie exercent une influence notable sur le biais et la répétabilité du système. La section 3.5.3 présente les différents niveaux qui sont à l'étude pour les facteurs de profondeur et de position. L'effet sur le biais et la répétabilité est ainsi estimé à des profondeurs de 2000, 2500, 3000, 3750 et 4000 mm. Pour ce qui est du facteur position, cinq (5) positions par profondeur sont évaluées. Ces dernières sont représentées par les positions suivantes sur le plan  $(X, Z)$  du système de mesure : (0,0), (-400,0), (400,0), (0,-400) et (0,400).

#### 4.3.1 Analyse de l'effet de la profondeur de champ et de la position sur la répétabilité

Les figures 4.6 à 4.10 présentent l'évolution de la répétabilité ( $EV$ ) en fonction de la profondeur de champ ( $P$ ) et de la position du C-Track™. On réfère à l'ANNEXE IX pour les résultats détaillés.

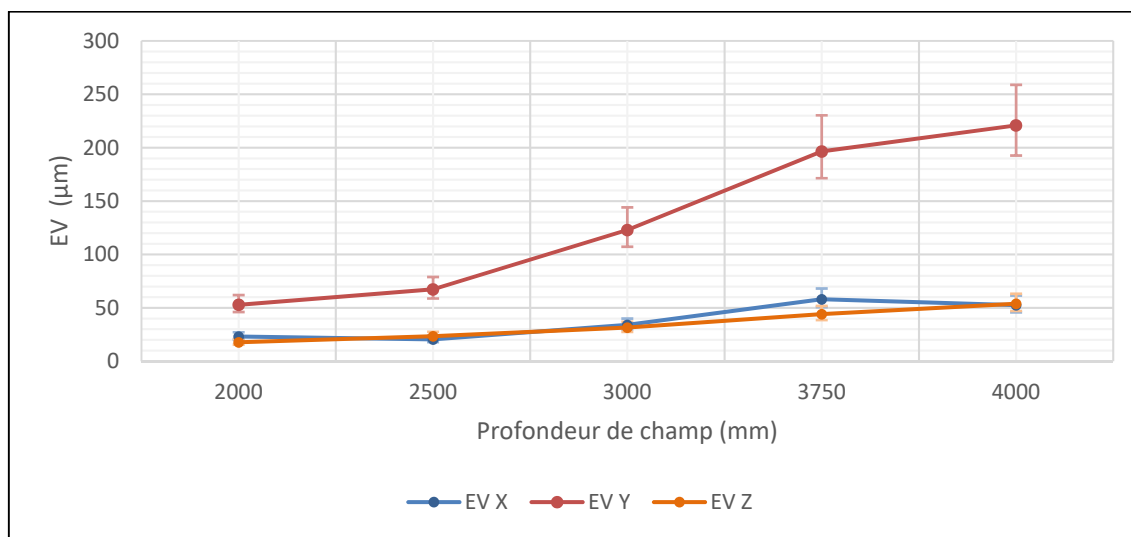


Figure 4.6 Évolution de  $EV$  en fonction de  $P$  à la position (0,0)

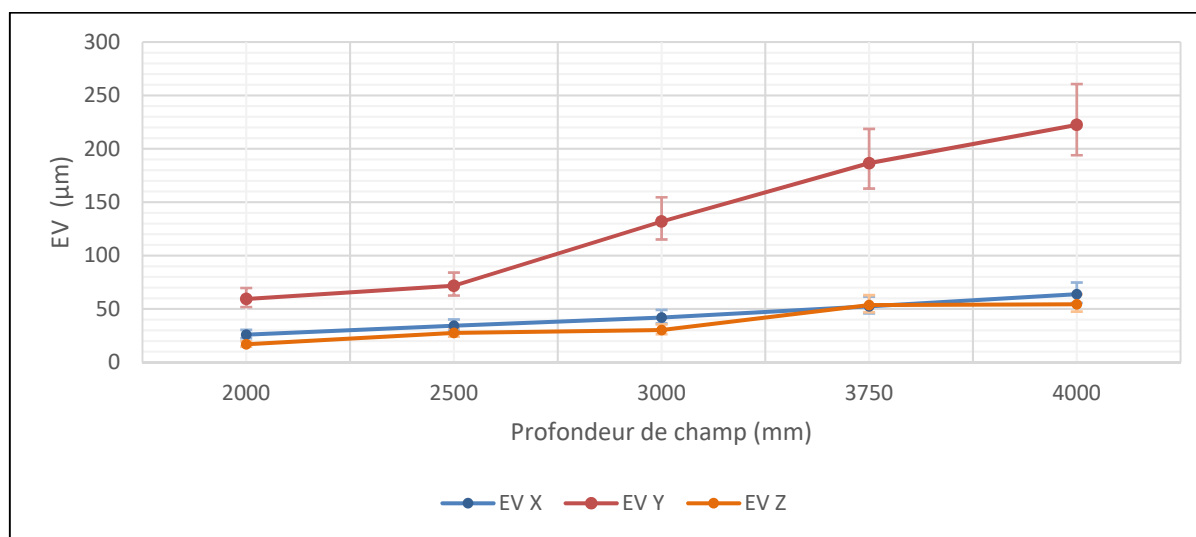


Figure 4.7 Évolution de  $EV$  en fonction de  $P$  à la position (-400,0)

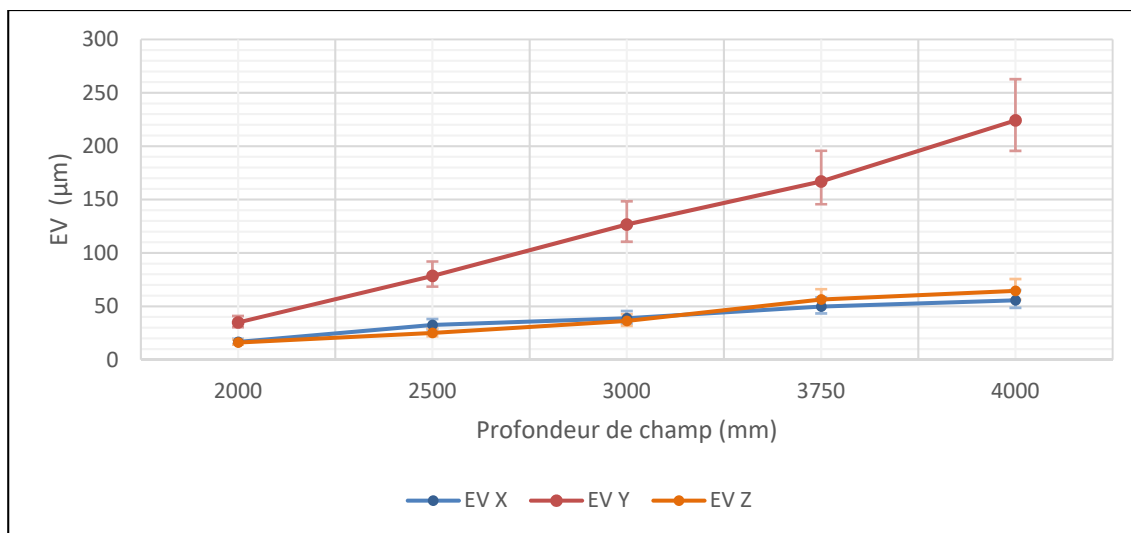


Figure 4.8 Évolution de  $EV$  en fonction de  $P$  à la position (400,0)

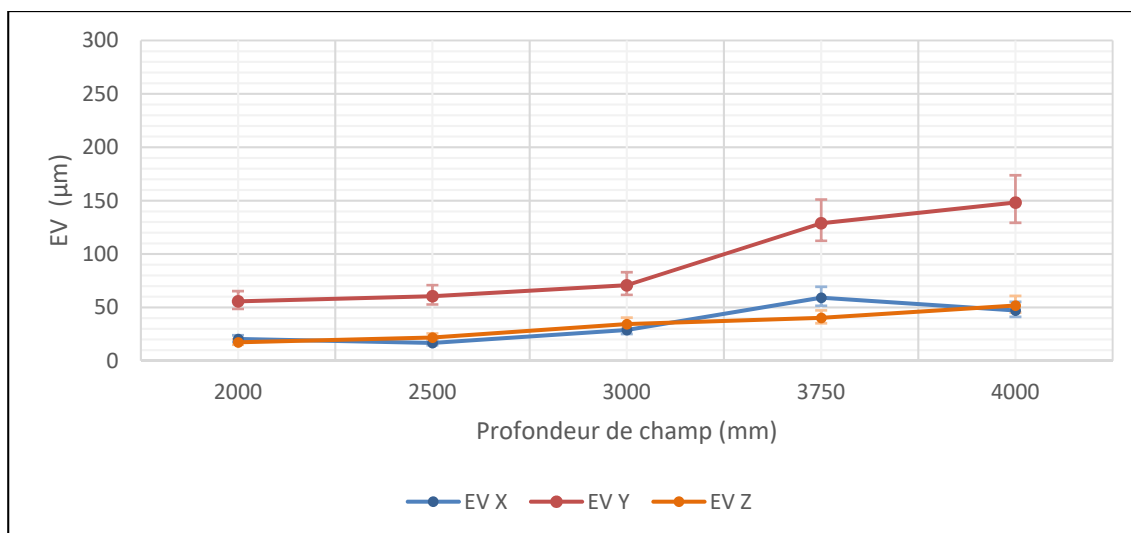


Figure 4.9 Évolution de  $EV$  en fonction de  $P$  à la position (0,-400)

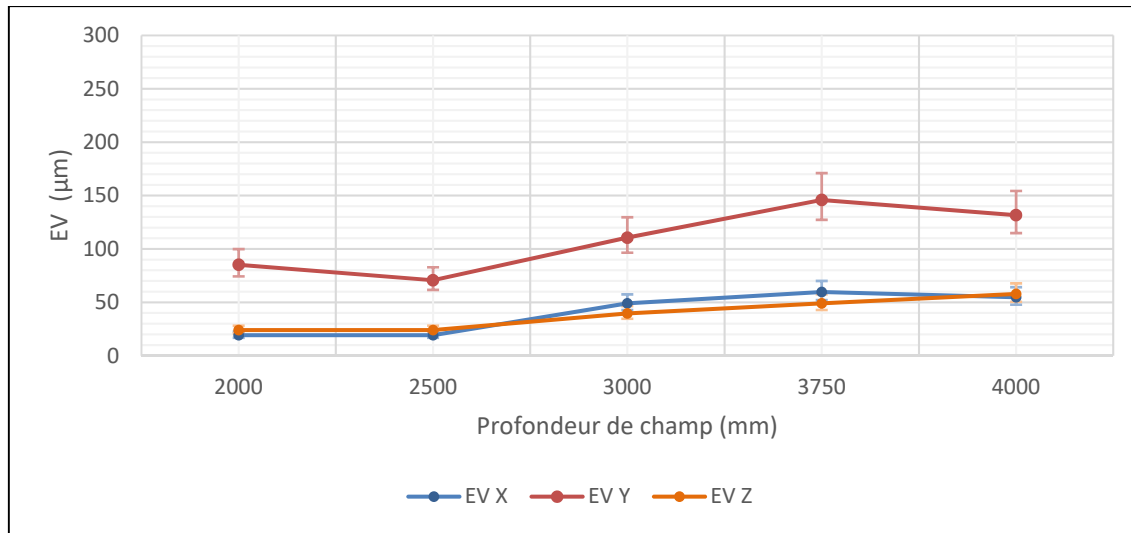


Figure 4.10 Évolution de  $EV$  en fonction de  $P$  à la position (0,400)

En analysant les résultats, il est possible d'identifier une tendance à la hausse de l'erreur de répétabilité, et ce pour chacun des axes. Cette tendance semble similaire pour l'ensemble des positions. Cela voudrait ainsi dire que la position (plan  $X, Y$ ) n'a pas d'influence significative sur la répétabilité du système, mais que la profondeur de champ, oui. Pour confirmer cette hypothèse, une régression linéaire (avec un teste ANOVA) entre la répétabilité (dans chaque direction  $X, Y$  et  $Z$ ) comme réponse et la profondeur de champ ( $P$ ) comme prédicteur permet de mettre en évidence ce lien ou l'invalidier. Le Tableau 4.7 présente un récapitulatif de ces modèles de régression.

Tableau 4.7 Récapitulatif des modèles de régression entre *EV* en *X*, *Y* et *Z* et *P*

Modèle de régression			Coefficients	
Axe	$R^2(\%)$	Équation	Terme	Valeur de $p$
<i>X</i>	84,2	$EV\ X = -19,3 + 0,019\ P$	Constante	0,002
			Profondeur <i>P</i>	0,000
<i>Y</i>	79,5	$EV\ Y = -89,2 + 0,0682\ P$	Constante	0,001
			Profondeur <i>P</i>	0,000
<i>Z</i>	91.9	$EV\ Z = -21.57 + 0,019\ P$	Constante	0,000
			Profondeur <i>P</i>	0,000

Pour les trois modèles, la valeur de  $p$  est  $< 0,05$ . Ainsi, l'association entre *EV* du système et la profondeur de champ est statistiquement significative. De plus, dans les trois cas, les  $R^2$  sont jugés comme satisfaisants (84,2%, 79,5% et 91.9%), l'ajustement offert par les modèles est donc bon<sup>5</sup>.

Finalement, il est possible de constater que, dans les trois cas, la pente est positive. Plus la profondeur de champ augmente, plus *EV* augmente (la performance diminue). C'est en effet ce à quoi on s'attendait, car, comme mentionné précédemment, un système de photogrammétrie est généralement moins performant pour détecter des variations en profondeur. De plus, il est possible de constater que la pente du modèle associé à l'axe *Y* (profondeur de champ) est plus importante par rapport aux autres. La profondeur de champ a donc un effet plus important sur la répétabilité selon cet axe. Les Figure 4.11, Figure 4.12 et Figure 4.13 présentent les résultats des régressions avec des intervalles de confiance et de prédiction (à 95%).

---

<sup>5</sup> Il est à noter que la constante est toujours négative, cependant, comme le domaine du facteur profondeur de champ se trouve entre 1500 et 4200 mm, aucune valeur négative de répétabilité ne pourrait être calculée par le modèle.

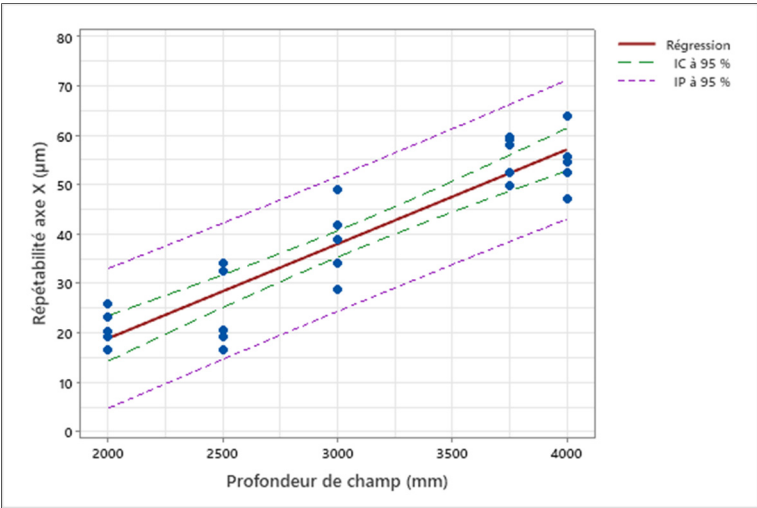


Figure 4.11 Régression linéaire entre *EV* en *X* et *P*

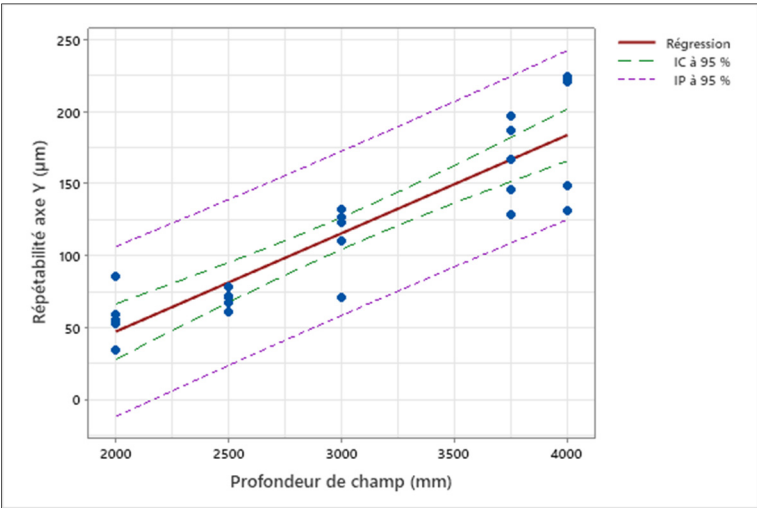


Figure 4.12 Régression linéaire entre *EV* en *Y* et *P*

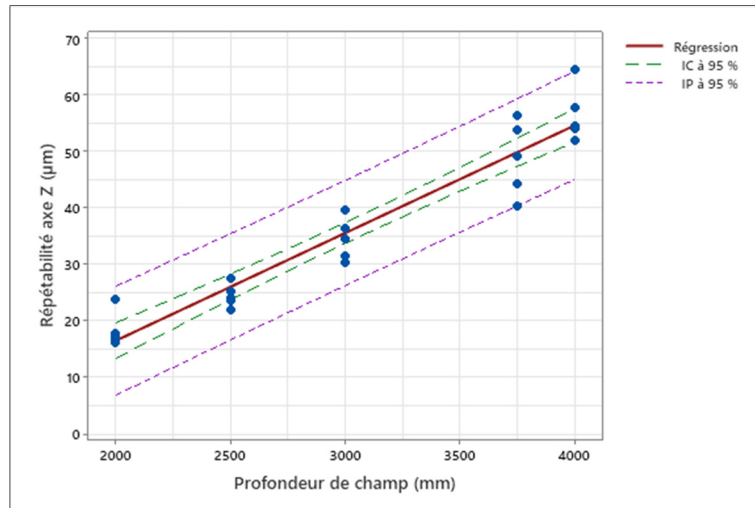


Figure 4.13 Régression linéaire entre  $EV$  en  $Z$  et  $P$

#### 4.3.2 Analyse de l'effet de la profondeur de champ et de la position sur le biais

Les figures 4.14 à 4.18 présentent l'évolution du biais en fonction du temps de chauffe pour chacune des positions à l'étude. On réfère le lecteur à l'ANNEXE IX pour les résultats détaillés.

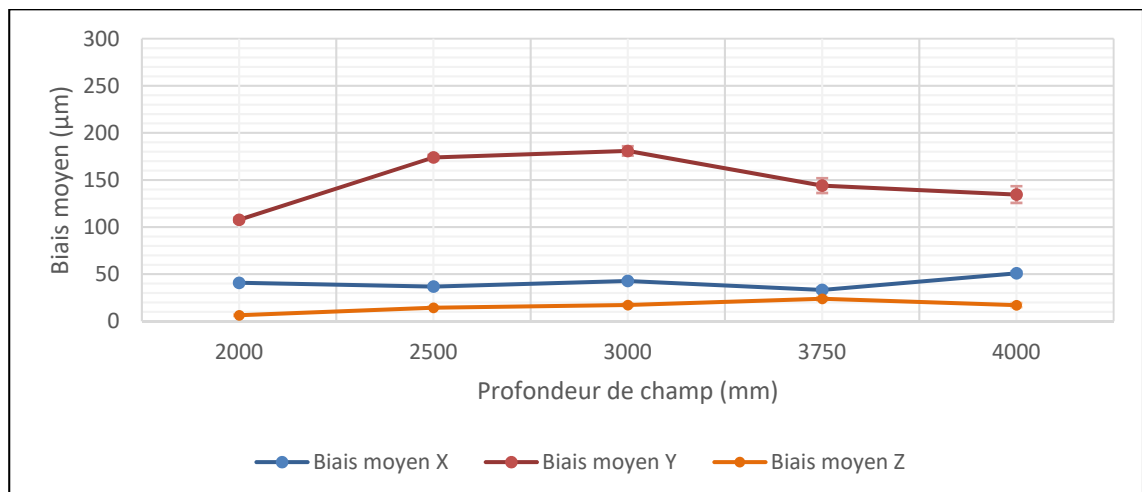


Figure 4.14 Évolution du biais en fonction de  $P$  à la position (0,0)

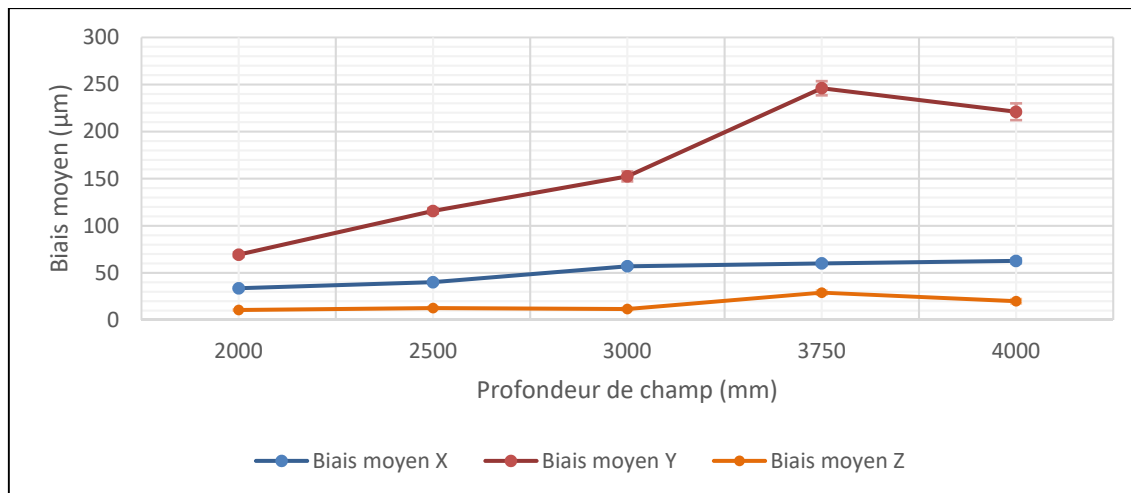


Figure 4.15 Évolution du biais en fonction de  $P$  à la position (-400,0)

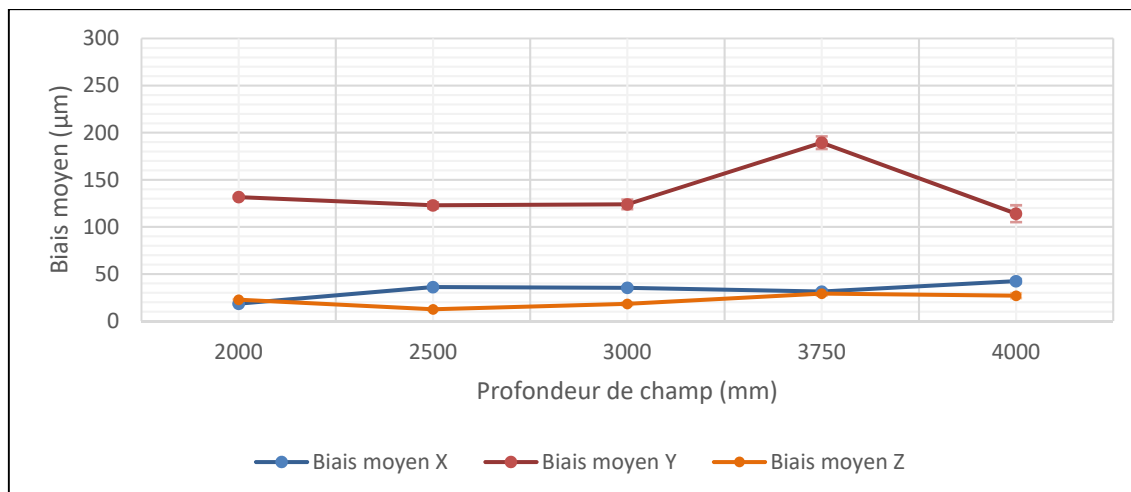


Figure 4.16 Évolution du biais en fonction de  $P$  à la position (400,0)



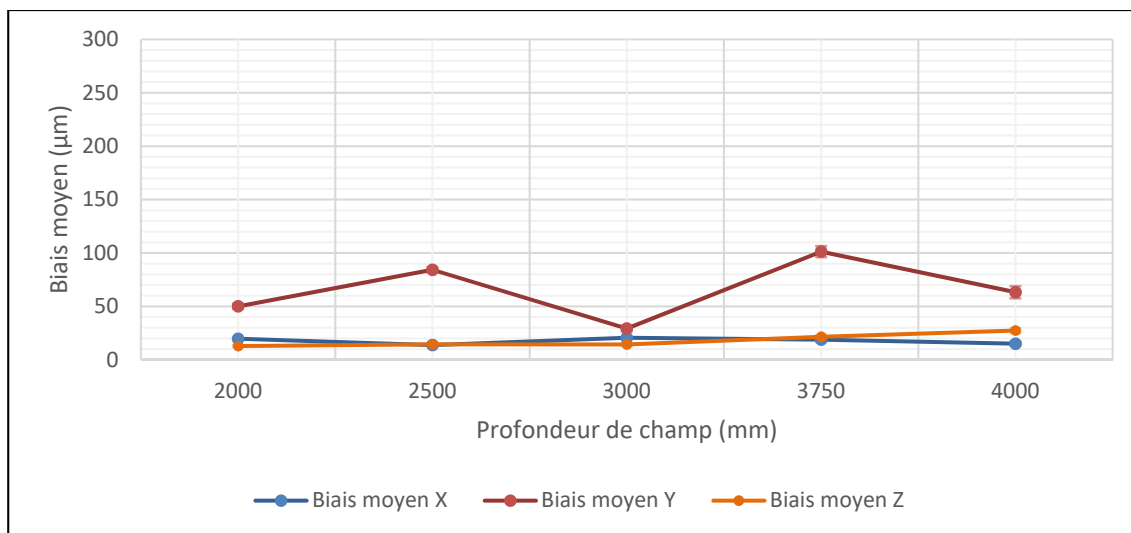


Figure 4.17 Évolution du biais en fonction de  $P$  à la position (0,-400)

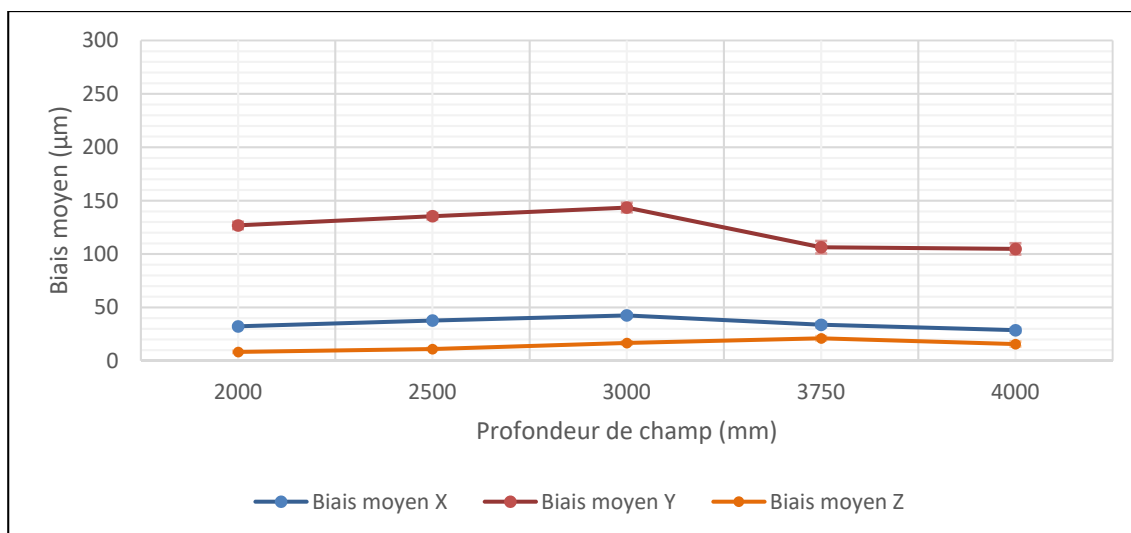


Figure 4.18 Évolution du biais en fonction de  $P$  à la position (0,400)

En examinant les résultats, il est difficile de discerner une quelconque tendance pour l'un ou l'autre des axes du système de mesure. En effet, au niveau des axes  $X$  et  $Z$ , le biais moyen ne dépasse jamais la barre des 60  $\mu\text{m}$ . Cette valeur est plus petite que la performance volumétrique telle qu'indiqué par le fabricant de l'appareil de photogrammétrie<sup>6</sup>. Il n'est donc pas possible

<sup>6</sup> Telles que communiquées par le fabricant de l'équipement.

de conclure sur une présence significative d'un biais. Ensuite, en ce qui a trait au biais moyen selon l'axe  $Y$  du système, il est difficile de discerner une tendance similaire entre chacune des positions. La profondeur de champ ne semble pas non plus affecter de façon significative le biais du système, que ce soit à la hausse ou à la baisse. Cependant, les valeurs moyennes de biais sont généralement plus élevées que selon les autres axes. On note que le biais selon l'axe  $Y$  est généralement plus grand que les performances indiquées par le fabricant.

#### **4.3.3 Conclusion sur l'effet de la profondeur de champ et de la position**

Les conclusions précédentes nous permettent de confirmer que la profondeur de champ et la position de l'appareil de photogrammétrie n'ont aucun effet significatif sur le biais du système selon l'ensemble de ses axes. De plus, la position selon les axes  $X$  et  $Z$  ne semble pas non plus avoir un effet significatif sur la répétabilité du système. En effet, cette dernière reste dans les mêmes ordres de grandeur d'une position à une autre. Cependant, la profondeur de champ ne peut pas être écartée comme un facteur qui a un effet significatif (avec une pente positive) sur la répétabilité.

Par conséquent, une profondeur de champ de 2000 mm et une position de (0,0) mm sont utilisées pour le reste des manipulations expérimentales. Ceci permettra d'optimiser les performances du système de mesure. Ainsi, lors de l'étude de répétabilité et reproductibilité, il est possible d'identifier l'effet des opérateurs (reproductibilité) sur les performances du système dans un contexte d'assemblage assisté par la métrologie.

#### **4.4 Analyse sur l'utilisation des dimensions réelles d'une pièce**

Les valeurs de référence mesurées sur la MMT tiennent compte des dimensions telles que fabriquées de la pièce à l'étude. Il est ainsi possible de déterminer si l'erreur de fabrication de la composante est considérée comme significative. Une comparaison entre les valeurs de biais des points d'intersection (biais avec pièce réelle et biais avec pièce nominale) dans les directions  $x$ ,  $y$  et  $z$  est effectuée. Les données utilisées pour la comparaison sont ceux obtenus à une profondeur de champ de 2000 mm et une position de (0,0) pour minimiser l'effet des

facteurs pouvant influencer le biais du système. Les résultats de la comparaison sont présentés au tableaux 4.8, 4.9 et 4.10.

Tableau 4.8 Effet des dimensions réelles sur le point 1

	Coordonnées (mm)		
	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>
Dimensions nominales	192,227	54,007	201,280
Valeurs de référence mesurées avec CMM	192,154	53,821	201,375
Valeurs réelles mesurées avec C-Track™	192,123	53,830	201,38
Biais p/r aux dimensions nominales	0,104	0,177	0,100
Biais p/r aux valeurs de référence	0,031	0,009	0,006

Tableau 4.9 Effet des dimensions réelles sur le point 2

	Coordonnées (mm)		
	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>
Dimensions nominales	220,790	92,600	216,312
Valeurs de référence mesurées avec CMM	220,698	92,395	216,476
Valeurs réelles mesurées avec C-Track™	220,699	92,419	216,479
Biais p/r aux dimensions nominales	0,090	0,180	0,167
Biais p/r aux valeurs de référence	0,002	0,025	0,004

Tableau 4.10 Effet des dimensions réelles sur le point 3

	Coordonnées (mm)		
	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>
Dimensions nominales	252,192	56,267	186,311
Valeurs de référence mesurées avec CMM	252,121	56,055	186,418
Valeurs réelles mesurées avec C-Track™	252,111	56,094	186,415
Biais p/r aux dimensions nominales	0,0810	0,173	0,103
Biais p/r aux valeurs de référence	0,0100	0,039	0,003

En analysant les résultats, il est possible de voir que pour les trois points d'intersection, le biais calculé par rapport aux dimensions nominales est plus grand que celui calculé par rapport aux références. Il est donc possible de conclure que l'erreur de fabrication de la composante est significative. Cette dernière sera donc prise en compte lors de l'étude de répétabilité et reproductibilité.

#### 4.5 Analyse de répétabilité et reproductibilité

Pour les manipulations expérimentales, un temps de chauffe de 24 heures, une profondeur de champ de 2000 mm et une position de (0,0) mm sont utilisés pour minimiser la variabilité associée à l'appareil de photogrammétrie. Les principes théoriques présentés à la section 2.3.8.2 et les équations qui s'y rattachent sont présentées en ANNEXE III. Ils sont déployés pour réaliser l'étude R&R selon la méthodologie ANOVA (Automotive Industry Action Group, 2010). La position des points d'intersection entre les artéfacts et la pièce à l'étude (points 1, 2 et 3) et celle du goujon sont ici analysées. La Figure 4.19 présente une schématisation des points à l'étude.

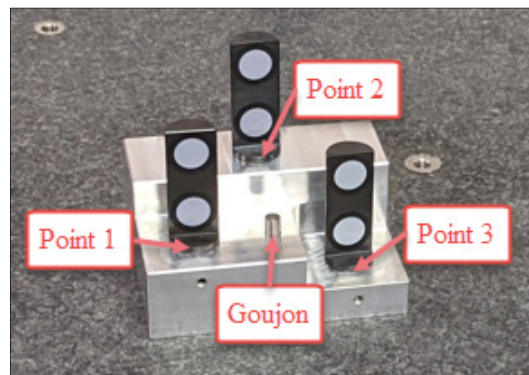


Figure 4.19 Positionnement des points de l'étude R&R

Comme défini dans la méthodologie (section 3.5.4), seuls les coordonnées  $x$  et  $y$  des points sont analysées, car le tablier de la MMT bloque l'axe  $z$  du système. De plus, nous rappelons au lecteur que l'assemblage pièce-artéfacts est positionné en utilisant uniquement les degrés

de liberté ( $T_x, T_y, R_z$ ). Les tableaux 4.11 à 4.14 présentent un récapitulatif des résultats pour les points 1, 2, 3 et le goujon. On réfère le lecteur à l'ANNEXE IX pour les résultats détaillés.

Tableau 4.11 Récapitulatif de l'étude R&R, point 1

KCs		Résultats GR&R (mm)						
Géométries	Axe	Source	$CM^7$	Valeur de $p$	$\sigma^2$	% Contribution	$\sigma$	U
Point 1	X	AV	0,176	0,050	0,012	19,1	0,111	0,667
		EV	0,052	-	0,052	80,9	0,229	1,373
		GR&R	-	-	0,065	100,0	0,254	1,527
	Y	AV	0,581	0,001	0,051	43,8	0,227	1,361
		EV	0,066	-	0,066	56,2	0,257	1,543
		GR&R	-	-	0,118	100,0	0,343	2,057

Tableau 4.12 Récapitulatif de l'étude R&R, point 2

KCs		Résultats GR&R (mm)						
Géométries	Axe	Source	$CM$	Valeur de $p$	$\sigma^2$	% Contribution	$\sigma$	U
Point 2	X	AV	0,757	0,001	0,067	43,9	0,259	1,555
		EV	0,086	-	0,086	56,1	0,293	1,759
		GR&R	-	-	0,153	100,0	0,391	2,347
	Y	AV	0,167	0,059	0,011	17,7	0,107	0,641
		EV	0,053	-	0,053	82,3	0,230	1,380
		GR&R	-	-	0,064	100,0	0,254	1,522

---

<sup>7</sup> Carré moyen de l'erreur

Tableau 4.13 Récapitulatif de l'étude R&amp;R, point 3

KCs		Résultats GR&R (mm)						
Géométries	Axe	Source	CM	Valeur de $p$	$\sigma^2$	% Contribution	$\sigma$	U
Point 3	X	AV	0,176	0,050	0,012	19,1	0,111	0,667
		EV	0,052	-	0,052	80,9	0,229	1,372
		GR&R	-	-	0,065	100,0	0,254	1,525
	Y	AV	0,010	0,855	0,000	0,0	0,000	0,000
		EV	0,064	-	0,064	100,0	0,253	1,517
		GR&R	-	-	0,064	100,0	0,253	1,517

Tableau 4.14 Récapitulatif de l'étude R&amp;R, goujon

KCs		Résultats GR&R (mm)						
Géométries	Axe	Source	CM	Valeur de $p$	$\sigma^2$	% Contribution	$\sigma$	U
Goujon	X	AV	0,176	0,050	0,012	19,1	0,111	0,668
		EV	0,052	-	0,052	80,9	0,229	1,373
		GR&R	-	-	0,065	100,0	0,255	1,527
	Y	AV	0,166	0,058	0,011	17,8	0,107	0,639
		EV	0,052	-	0,052	82,2	0,229	1,372
		GR&R	-	-	0,064	100,0	0,252	1,514

Il est possible de constater que la répétabilité (*EV*) et la reproductibilité (*AV*) associées au système de mesure sont pratiquement constantes entre les quatre points à l'étude. Ceci est très important, car comme nous rappelons au lecteur, seulement la position et l'orientation du goujon sont utilisées afin de positionner la pièce à l'étude. Ceci vient confirmer aussi l'hypothèse que les pièces à l'étude sont considérées comme étant parfaitement rigides.

Ensuite, pour chaque point, la valeur de  $p$  permet de déterminer si la reproductibilité exerce une contribution significative à l'incertitude totale. Dans l'ensemble des cas, excepté pour le point 3 selon l'axe  $y$ , cette valeur est  $<0,05$ . Il est donc possible d'affirmer que l'erreur associée aux manipulations des opérateurs du système est statistiquement significative. Au niveau de

l'erreur de répétabilité du système, cette dernière est, dans l'ensemble des cas, plus importante que celle associée à la reproductibilité. En effet, il est possible de voir que celle-ci est généralement deux fois plus grande. Cela veut ainsi dire que la plus grande source de variation provient du système de mesure et non des manipulations effectuées par les opérateurs.

Il est aussi possible de constater que l'utilisation des artéfacts dans un contexte d'assemblage assisté par la métrologie entraîne une diminution de la performance métrologique générale attendue de l'appareil de mesure. En effet, en admettant que les spécifications techniques du fabricant soient respectées, le système de photogrammétrie devrait offrir une performance volumétrique de 0.075 mm tandis que dans le contexte expérimental, la performance était plutôt de 1.5 mm. De plus, lors de l'étude de répétabilité, l'appareil de photogrammétrie était utilisé avec des artéfacts et la performance du système n'a jamais dépassé un seuil de 0.25 mm. Ceci est probablement dû en partie au fait que le système de mesure n'est pas spécifiquement conçu pour effectuer de l'assemblage assisté par la métrologie 3D. Mais la cause la plus probable de cette différence est que lors des manipulations, les opérateurs devaient positionner la caractéristique critique KC à l'étude avec une tolérance de 0.5 mm. En diminuant cette tolérance, il serait probablement possible d'obtenir de meilleurs résultats. Cependant, plus cette tolérance est diminuée, plus il est difficile pour un opérateur de positionner la pièce à l'étude. Il faudrait donc trouver un juste milieu entre la performance nécessaire et le temps de manipulation désiré.





## CONCLUSION

L'objectif du départ du présent projet de recherche était d'estimer les performances métrologiques d'un système de mesure 3D par photogrammétrie (C-Track™) associé à des artéfacts employés dans un contexte de MAA. Nous estimons avoir répondu aux différents points-jalons (objectifs spécifiques) qui ont permis de répondre à l'objectif de recherche. En effet, la méthodologie développée permet d'analyser la performance métrologique globale d'un système d'assemblage assisté par mesures 3D sans contact. Cette dernière s'appuie notamment sur deux phases expérimentales.

Premièrement, une étude de répétabilité a permis d'estimer le biais et la répétabilité propre (inhérente) au système de mesure en fonction de certains paramètres contrôlés : le temps de chauffe, la position et la profondeur de champ de l'appareil de photogrammétrie. Le canevas développé permet de démontrer que le temps de chauffe exerce une influence statistiquement significative sur le biais et la répétabilité. Nous n'avons pas pu démontrer que la position a une influence sur la performance du système de mesure. Par contre, la profondeur de champ possède un effet uniquement au niveau de la répétabilité du système. Celle-ci étant élevée comparativement au biais, il n'est pas possible de tirer des conclusions significatives à ce niveau. L'approche proposée permet ainsi de modéliser le comportement de l'erreur dans l'espace de travail. Il est donc possible de conclure que la taille et les dimensions d'une pièce exercent une influence sur la performance du système. Finalement, nous avons examiné l'hypothèse de considérer les dimensions nominales du composant comparativement à l'utilisation de ses dimensions réelles (tel que fabriqué). Selon les résultats, on a démontré qu'il est nécessaire de tenir compte des dimensions réelles de la pièce à positionner.

Dans un deuxième temps, le déploiement d'une étude R&R a permis de déterminer l'amplitude de l'incertitude *in situ* du système de mesure. Selon les résultats obtenus, il est possible de constater que les manipulations effectuées par les opérateurs n'ont qu'un effet négligeable par rapport à la variation globale du système de mesure. En effet, la reproductibilité du système est généralement deux fois plus petite que la répétabilité de ce dernier. Il est cependant à noter

que la performance du système de mesure composé de l'appareil de photogrammétrie et des artéfacts est inférieure que celle communiquée par le fabricant pour une utilisation en mode conventionnel (ex. contrôle de la qualité).

En conclusion, ces deux phases expérimentales ont permis d'estimer la performance métrologique d'un système de mesure 3D par photogrammétrie (C-Track™) associée à des artéfacts employés pour un assemblage assisté par la mesure 3D.

## RECOMMANDATIONS

Nous estimons qu'il demeure des pistes d'amélioration pour l'usage futur d'un système MAA. Cette section présente des recommandations en fonction des observations effectuées lors du projet.

- La traçabilité est une exigence incontournable pour tout processus de MAA. L'approche expérimentale permet d'estimer la performance d'un système de mesure, en s'assurant que le ratio entre l'incertitude attribuable à la mesure et la tolérance exigées sur l'assemblage ne dépasse pas un seuil (ex. 10% ou 20%). Malheureusement, l'approche expérimentale ne couvre qu'une configuration spécifique du système de mesure, et ce, dans un contexte spécifique. Pour implémenter une solution réaliste de MAA dans un contexte industriel, il serait préférable d'appliquer une solution comme celle présentée à la section 2.1.6. Il s'agit d'une méthodologie utilisant une technique de propagation numérique des incertitudes avec une simulation *Monte-Carlo* qui permet de couvrir beaucoup plus de cas de figure. Cela permet de pouvoir utiliser plusieurs types d'artéfacts en fonction des besoins spécifiques d'un assemblage sans devoir refaire une étude expérimentale à chaque fois.
- Pour estimer numériquement l'incertitude d'un système de mesure utilisant des appareils optiques, l'algorithme développé devrait tenir en compte le principe de projection tel que présenté à la section 2.2.5. En effet, pour une erreur de positionnement angulaire donnée, l'erreur spatiale résultante augmente en fonction de la distance entre le capteur et l'appareil. L'incertitude de mesure ne peut pas être confondue avec une valeur constante, cette dernière dépend de la position des objets par rapport au système utilisé pour faire l'acquisition des données.
- Encore une fois afin d'obtenir un meilleur modèle numérique pour la simulation *Monte-Carlo*, il serait intéressant de modéliser l'effet de la profondeur de champ sur la répétabilité et le biais du système de façon quadratique. En effet, certaines recherches; (Y. Liu, Pears, L. Rosin, & Huber, 2020) et (Sims-Waterhouse, 2019), présentent que la profondeur de champ a un effet quadratique sur les performances du système plutôt que linéaire tel que présenté dans ce projet.

- Lors de l'étude de répétabilité, l'effet de la position des artéfacts en translation selon les axes du système a été évalué. Il serait aussi intéressant de connaître l'effet de rotation autour des axes des cibles tel que présenté à la figure ci-dessous. En effet, lors des phases expérimentales, les cibles étaient toujours perpendiculaires et parallèles à l'axe entre les deux caméras (« *baseline* ») du système de photogrammétrie.

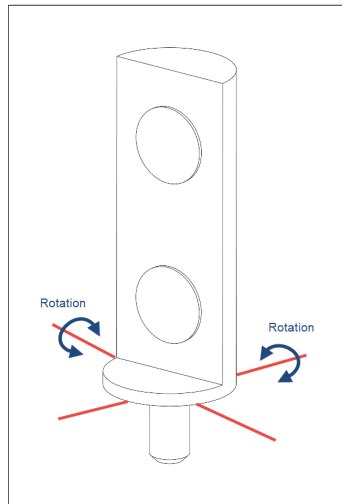


Figure 4.20 Rotation autour des axes des cibles

- Dans le contexte du projet de recherche, l'ensemble des pièces à l'étude ont été considérées comme étant parfaitement rigides. Cependant, dans un contexte industriel, notamment au niveau de l'industrie aéronautique, le processus d'assemblage assisté par la métrologie 3D serait plutôt effectué dans le cadre d'opération de positionnement et d'orientation de grandes composantes flexibles (ex. l'assemblage des ailes sur le fuselage d'un avion). Le développement d'un algorithme permettant l'estimation des performances du système de mesure devrait donc être en mesure de prendre en compte l'effet de la gravité. En effet, comme la position et l'orientation des composantes sont calculées en évaluant les coordonnées de différents points (cibles) mesurés sur les surfaces fonctionnelles d'une pièce ou sur des référentiels d'assemblage, la gravité vient affecter le calcul. Une méthode comme celle présentée à la section 2.2.6 pourrait être employée.

- Le projet a permis d'identifier certaines limitations au niveau de la performance d'un système de mesure composé d'un appareil de photogrammétrie et d'artéfacts. Comme présenté à la section 2.2, plusieurs technologies de métrologie 3D sont présentement disponibles sur le marché. Ces dernières pourraient venir pallier les faiblesses du système de photogrammétrie. Par exemple, un traceur laser, offrant de meilleures performances métrologiques, pourrait être utilisé avec ce dernier. L'appareil de photogrammétrie pourrait permettre d'effectuer un suivi dynamique de la pièce, et le traceur laser pourrait effectuer les mesures ayant des requis plus serrés. Cela aurait comme effet d'augmenter la performance globale du système de mesure, et ce en gardant les effets bénéfiques de chacune des technologies. Une approche coopérative comme celle présentée à la section 2.2.4.1 pourrait être employée.
- Lors des manipulations expérimentales de l'étude R&R, il était très difficile pour les opérateurs de positionner la pièce selon un DRO présenté sur un écran d'ordinateur. Pour utiliser une telle solution dans un contexte industriel, cela prendrait probablement des opérateurs avec un grand niveau de formation. Il serait cependant possible d'utiliser une technologie de réalité augmentée, comme les *HoloLens*, afin d'offrir une meilleure boucle de retour aux opérateurs.
- Dans le même ordre d'idée qu'au point 7, l'application développée dans le cadre de la recherche nécessite une grande compréhension du système de photogrammétrie (C-Track™, VXelement™ et VXtrack™) et du logiciel de métrologie (PolyWorks|Inspector™). Afin de pouvoir supporter une utilisation dans un secteur industriel, une meilleure intégration entre l'appareil de mesure et le logiciel devrait probablement être effectuée.
- Finalement, comme mentionné à la fin de la section 4.5, la tolérance d'acceptabilité qui est utilisée pour le positionnement en temps réel par les opérateurs à une grande influence sur la performance du système de mesure. Malheureusement, plus cette tolérance diminue, plus il est difficile pour un opérateur de positionner la pièce à l'étude. Il faudrait donc trouver un juste milieu entre la performance nécessaire et le temps de manipulation désiré. Un cobot serait probablement envisageable pour effectuer ce genre de tâches.



## ANNEXE I

### MÉTHODE ALTERNATIVE DE CALCUL DE LA RÉPÉTABILITÉ

Il existe une méthode alternative pour déterminer la variation issue du système de mesure (répétabilité). Cette dernière est calculée à partir d'un échantillon, mais cette fois en utilisant des formules relatives au contrôle statistique de procédé, notamment aux cartes de contrôle individuel et étendue mobile (I-EM). La formule utilisée pour estimer l'écart type est la suivante.

$$\sigma_r = \frac{\overline{EM}}{d_2} \quad (\text{A I-1})$$

Où,  $\sigma_r$  correspond à l'écart type de l'échantillon,  $\overline{EM}$  correspond à la moyenne des étendues mobiles et  $d_2$  est une constante qui dépend de la taille de l'échantillon.

Dans ce contexte, l'étendue mobile correspond à la différence entre deux valeurs consécutives dans l'échantillon. Cet écart type correspond ici à une estimation de l'étendue de la variation liée au système de mesure. Grâce à cette valeur, il est possible de calculer une métrique qualifiant la répétabilité du système. La métrique,  $Cg$ , permet de comparer la variation de l'étude (répétabilité) avec un pourcentage de la tolérance. La formule ci-dessous est utilisée :

$$Cg = \frac{K/100 \times \text{Tolérance}}{L\sigma_r} \quad (\text{A I-2})$$

Où,  $K$  correspond au pourcentage de la tolérance (généralement 20%),  $L$  correspond au facteur de confiance de l'étude (généralement 6 pour un niveau de confiance de 99,73%) et  $\sigma_r$  correspond à l'écart type de l'échantillon.

Le pourcentage de la tolérance correspond ici à un seuil d'acceptation entre la variation de l'équipement et la tolérance de la caractéristique devant être mesurée. Des valeurs  $Cg \geq 1,33$

indiquent que la dispersion des mesures de l'instrumentation est suffisamment faible par rapport à l'étendue de la tolérance devant être mesurée. Il est aussi possible de calculer un second indice de performance lié à la répétabilité du système de mesure. En effet, lorsque la présence de biais est confirmée, il est possible de calculer la métrique  $Cgk$ , avec la formule suivante :

$$Cgk = \frac{\frac{K}{200} \times Tolérance - |\bar{x} - Ref|}{L \times \sigma_r} \quad (A\ I-3)$$

Où,  $K$  correspond au pourcentage de la tolérance (généralement 20%),  $\bar{x}$  correspond à la moyenne de l'échantillon,  $Ref$  correspond à la valeur de référence,  $L$  correspond au facteur de confiance de l'étude (généralement 6 pour 99,73%) et  $\sigma_r$  correspond à l'écart type de l'échantillon.

La métrique  $Cgk$  permet de comparer la répétabilité à la tolérance, mais détermine aussi si cette dernière est centrée sur la valeur cible. La valeur de  $Cgk$  diminue proportionnellement à celle du biais. De façon générale, un  $Cgk$  correspond à la valeur de référence standard pour indiquer que le système de mesure est précis (répétabilité) et exact (biais).



## ANNEXE II

### ÉTUDE EMPIRIQUE DE L'INCERTITUDE DE LINÉARITÉ

L'étude empirique de l'incertitude de linéarité permet de déterminer s'il y a présence d'un biais significatif sur l'étendue de mesure d'un système. Certaines étapes préparatoires doivent être effectuées au préalable afin de pouvoir conclure de la présence significative de biais et de linéarité lors de l'utilisation d'un système de mesure. Ces dernières sont les suivantes :

- Un minimum de  $g \geq 5$  pièces couvrant l'étendue de mesure du système doivent être sélectionnées.
- Une valeur de référence pour chacune des pièces doit être préalablement établie avec un autre système de mesure considéré comme 5 fois plus précis que le système étudié.
- Collecter un minimum de  $n \geq 10$  mesures pour l'ensemble de KCs, préférablement  $n \geq 30$  mesures
- Un seul opérateur doit effectuer les mesures et les conditions environnementales doivent être constantes.

La première étape de la méthode permet de calculer le biais de la pièce ( $bias_{i,j}$ ) pour chaque mesure ( $n$ ) et le biais moyen ( $\overline{bias_i}$ ) pour chaque pièce.

$$bias_{i,j} = x_{i,j} - Ref_i \quad (A II-1)$$

$$\overline{bias_i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n bias_{i,j} \quad (A II-2)$$

Un graphique doit être créé avec les biais individuels ( $bias_{i,j}$ ) ainsi que les biais moyens ( $\overline{bias_i}$ ) représentant l'ensemble des pièces à l'étude. Ce graphique doit représenter une droite ayant la formule ci-dessous :

$$\bar{y}_i = ax_i + b \quad (A II-3)$$

Où,  $\bar{y}_i$  correspond au biais moyen,  $x_i$  correspond à la valeur de référence et :

$$a = \frac{\sum xy - \left(\frac{1}{gn} \sum x \sum y\right)}{\sum x^2 - \frac{1}{gn} (\sum x)^2} \quad (\text{A II-4})$$

$$b = \bar{\bar{y}} - a\bar{x} \quad (\text{A II-5})$$

Une fois la droite tracée, il faut déterminer un intervalle de confiance ( $IC$ ) pour une valeur  $x_0$  avec un facteur de confiance  $\alpha$  de la façon suivante :

$$s = \sqrt{\frac{\sum y_i^2 - b \sum y_i - a \sum x_i y_i}{gn - 2}} \quad (\text{A II-6})$$

$$IC = b + ax_0 \pm \left[ t_{gn-2, 1-\frac{\alpha}{2}} \left( \frac{1}{gn} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right)^{1/2} \right] \quad (\text{A II-7})$$

La variable  $s$  représente ici la variation issue du système de mesure (répétabilité). L'analyse du graphique permet ensuite de déterminer si la linéarité du système est acceptable. Pour ce faire, la droite de l'équation A II-3 doit se situer dans l'intervalle de confiance calculée avec l'équation A II-7.

### ANNEXE III

#### FORMULES DÉTAILLÉES POUR L'ÉTUDE R&R

Le tableau suivant présente les formules mathématiques utilisées lors d'une étude R&R employant la méthodologie ANOVA.

Tableau A III-1 ANOVA avec interaction

Source	Degrés de liberté ( $DL$ )	Somme des carrés ( $SC$ )	Carrés Moyen ( $CM$ )	$F$
Pièce	$a - 1$	$bn \sum (\bar{x}_{i..} - \bar{x}_{...})^2$	$\frac{SC_{Pièce}}{DL_{Pièce}}$	$\frac{CM_{Pièce}}{CM_{Pièce*Opérateur}}$
Opérateur	$b - 1$	$an \sum (\bar{x}_{.j.} - \bar{x}_{...})^2$	$\frac{SC_{Opérateur}}{DL_{Opérateur}}$	$\frac{CM_{Opérateur}}{CM_{Pièce*Opérateur}}$
Pièce/Opérateur	$(a - 1)(b - 1)$	$SC_{Total} - (SC_{Pièce} + SC_{Opérateur} + SC_{Répétabilité})$	$\frac{SC_{Pièce*Opérateur}}{DL_{Pièce*Opérateur}}$	$\frac{CM_{Pièce*Opérateur}}{CM_{Répétabilité}}$
Répétabilité	$ab(n - 1)$	$\sum \sum \sum (x_{ijk} - \bar{x}_{ij.})^2$	$\frac{SC_{Répétabilité}}{DL_{Répétabilité}}$	-
Total	$abn - 1$	$\sum \sum \sum (x_{ijk} - \bar{x}_{...})^2$	-	-

Où,  $a$  correspond au nombre de pièces,  $b$  correspond au nombre d'opérateurs et  $n$  correspond au nombre de répétition,  $\bar{x}_{i..}$  correspond à la moyenne pour chaque pièce,  $\bar{x}_{...}$  correspond à la grande médiane,  $\bar{x}_{.j.}$  correspond à la moyenne pour chaque opérateur,  $x_{ijk}$  correspond à chaque observation,  $\bar{x}_{ij.}$  correspond à la moyenne de chaque niveau de facteur.

Une valeur de  $p$  peut être calculée pour les sources suivantes : pièce, opérateur et pièce/opérateur. Lorsque la valeur est en dessous du seuil significatif de 0.05 pour la source pièce/opérateur, les calculs sont légèrement différents et ne tiennent pas compte de cette dernière. Il s'agit donc d'un tableau ANOVA sans interaction. Une fois les calculs de l'ANOVA complétés, la composante de la variance à laquelle chaque source a contribué peut

être calculée. Lorsque l'interaction pièce/opérateur est inclus dans le modèle ANOVA, les composantes de la variance sont calculées de la façon suivante :

$$Répétabilité = CM_{Répétabilité} \quad (A \text{ III-1})$$

$$Opérateur = \frac{CM_{Opérateur} - CM_{Pièce*Opérateur}}{a \times n} \quad (A \text{ III-2})$$

$$Pièce * Opérateur = \frac{CM_{Pièce*Opérateur} - CM_{Répétabilité}}{n} \quad (A \text{ III-3})$$

$$Pièce = \frac{CM_{Pièce} - CM_{Pièce*Opérateur}}{b \times n} \quad (A \text{ III-4})$$

$$Reproductibilité = Opérateur + Pièce * Opérateur \quad (A \text{ III-5})$$

$$GR\&R = Répétabilité + Reproductibilité \quad (A \text{ III-6})$$

$$Variation totale = GR\&R + Pièce \quad (A \text{ III-7})$$

Lorsque l'interaction pièce/opérateur n'est pas inclus dans le modèle ANOVA, les formules suivante divergent :

$$Opérateur = \frac{CM_{Opérateur} - CM_{Répétabilité}}{a \times n} \quad (A \text{ III-8})$$


$$Pièce = \frac{CM_{Pièce} - CM_{Répétabilité}}{b \times n} \quad (A \text{ III-9})$$

$$Reproductibilité = Opérateur \quad (A \text{ III-10})$$

## ANNEXE IV

### CERTIFICAT DE CALIBRATION MMT

Figure A IV-1 Résultats de calibration de la MMT, page 1

	Hexagon Metrology SpA Tel: +39 011 4025111	Strada del Portone, 107/118 Fax: +39 011 7803245	10095 Grugliasco (TO) - Italy www.hexagonmetrology.net
---	---	---	---

**Acceptance protocol for 3D Coordinate Measuring Machine**  
Protocol nr. 1GLOA0008081510072133 (ISO 10360-2)

CMM	
Manufacturer:	DEA
Machine Model:	GLOBAL ADV - 070705 - X=700, Y=700, Z=500
Serial Number:	GLOA000808
Arms Number:	1
Axis lengths [mm]:	X=700, Y=700, Z=500
Hardware Control:	B3c-Lc
Software:	PcDmls (2011)


  

Customer	
Company:	InnovMetric Software Inc
Address:	2014 Cyrille-Duquet, Suite 310 Quebec, QC Canada
Department:	
References:	
Telephone:	
Note:	

Technician	
Name:	Hagay Angrest
Personal Code:	
Company:	Globus



*In consideration of the result of the tests carried out, we hereby certify that  
the machine conforms to the performance defined in the  
Hexagon Metrology catalog, according to ISO 10360-2*


**07-Oct-2015**

Inspected by: .....

Accepted by: .....

ATRep V.3.2 Test ISO 10360-2      Protocol nr. 1GLOA0008081510072133      1 of 10

Figure A IV-2 Risultats de calibracion de la MMT, page 2



Hexagon Metrology SpA  
Tel. +39 011 4025111

Strada del Portone, 107/118  
Fax: +39 011 7303245

10095 Grugliasco (TO) - Italy  
www.hexagonmetrology.net

Measurement Performance

Reference gauge used

Description	Type	Serial No.	
	Certificate No.	Certificate date	Certificate by
Sphere gauge	25 mm	K4460	
	1050051	28-Oct-2015	MG
Step block gauge	600 mm	1310022	
	1307789/1	30-Jul-2013	MG


The measure lengths test has been execute using this formula:  
MPE Measuring Gauges: 1.70 + L / 250.00

Measuring Parameters

Measurement Speed [mm/s]:	3.0
Position Speed [mm/s]:	200.0
Acceleration [mm/s2]:	2500.0
Approach distance [mm]:	3.0
Fly enabled:	Yes
Temperature compensation mode:	Structural NTC

Length Probe Info

Probe Model (head):	PH10MQ	Probe serial number:	11L072
Sensor Model:	SP25	Sensor serial number:	310F08
Probe Extension [mm]:	0.0		
Tip length [mm]:	21.0		
Tip diameter [mm]:	5.0		



ATRep V.3.2 Test ISO 10360-2

Protocol nr. 1GLQA0003081510072193

2 of 10

Figure A IV-3 Résultats de calibration de la MMT, page 3



Hexagon Metrology SpA  
Tel. +39 011 4025111

Strada del Portone, 107/118  
Fax: +39 011 7303245

10095 Grugliasco (TO) - Italy  
www.hexagonmetrology.net



### Position (Volume 1 Position 1)

07-Oct-2015 18:17

#### Gauge position and Probe orientation

X [mm]:	<b>-23.998</b>	X [cos]:	<b>-1.0</b>	Roll position [g]:	<b>0.0</b>
Y [mm]:	<b>260.6558</b>	Y [cos]:	<b>0.0008</b>	Pitch position [g]:	<b>0.0</b>
Z [mm]:	<b>-516.4989</b>	Z [cos]:	<b>-0.0001</b>		

#### Environment

	Before	After
Air temperature [°C]:	<b>21.0</b>	<b>21.0</b>
Air humidity [%]:	---	---
X temperature [°C]:	<b>21.03</b>	<b>21.03</b>
Y temperature [°C]:	<b>20.99</b>	<b>20.99</b>
Z temperature [°C]:	<b>21.0</b>	<b>21.0</b>
Part temperature [°C]:	<b>20.67</b>	<b>20.67</b>

#### Results

Nominal [mm]	Measured [mm]	Tolerance [μm]	Deviation [μm]
10.00000	10.00100	±1.74	1.00
130.00030	130.00200	±2.22	1.70
210.00060	210.00160	±2.54	1.00
410.00080	410.00120	±3.34	0.40
590.00060	590.00060	±4.06	0.00
10.00000	10.00080	±1.74	0.80
130.00030	130.00190	±2.22	1.60
210.00060	210.00150	±2.54	0.90
410.00080	410.00120	±3.34	0.40
590.00060	590.00060	±4.06	0.00
10.00000	10.00080	±1.74	0.80
130.00030	130.00190	±2.22	1.60
210.00060	210.00150	±2.54	0.90
410.00080	410.00130	±3.34	0.50
590.00060	590.00070	±4.06	0.10

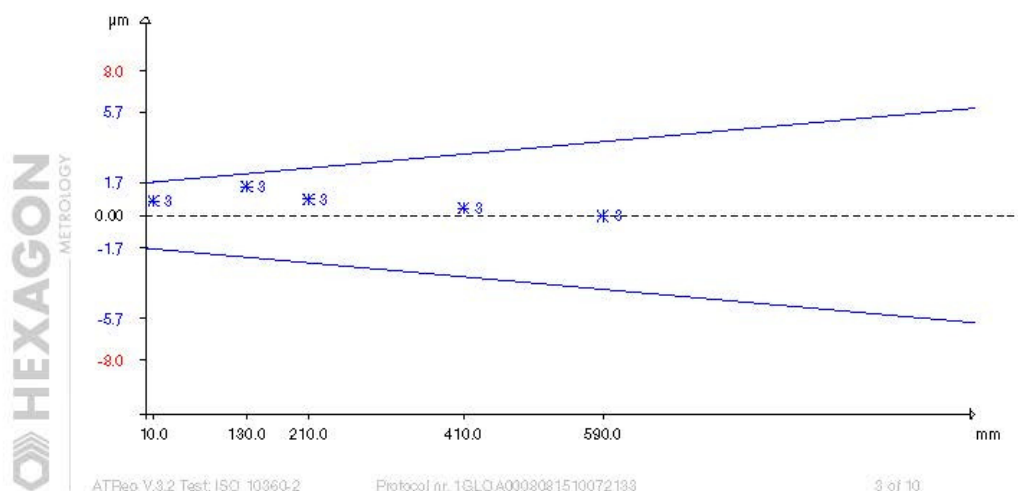


Figure A IV-4 Résultats de calibration de la MMT, page 4

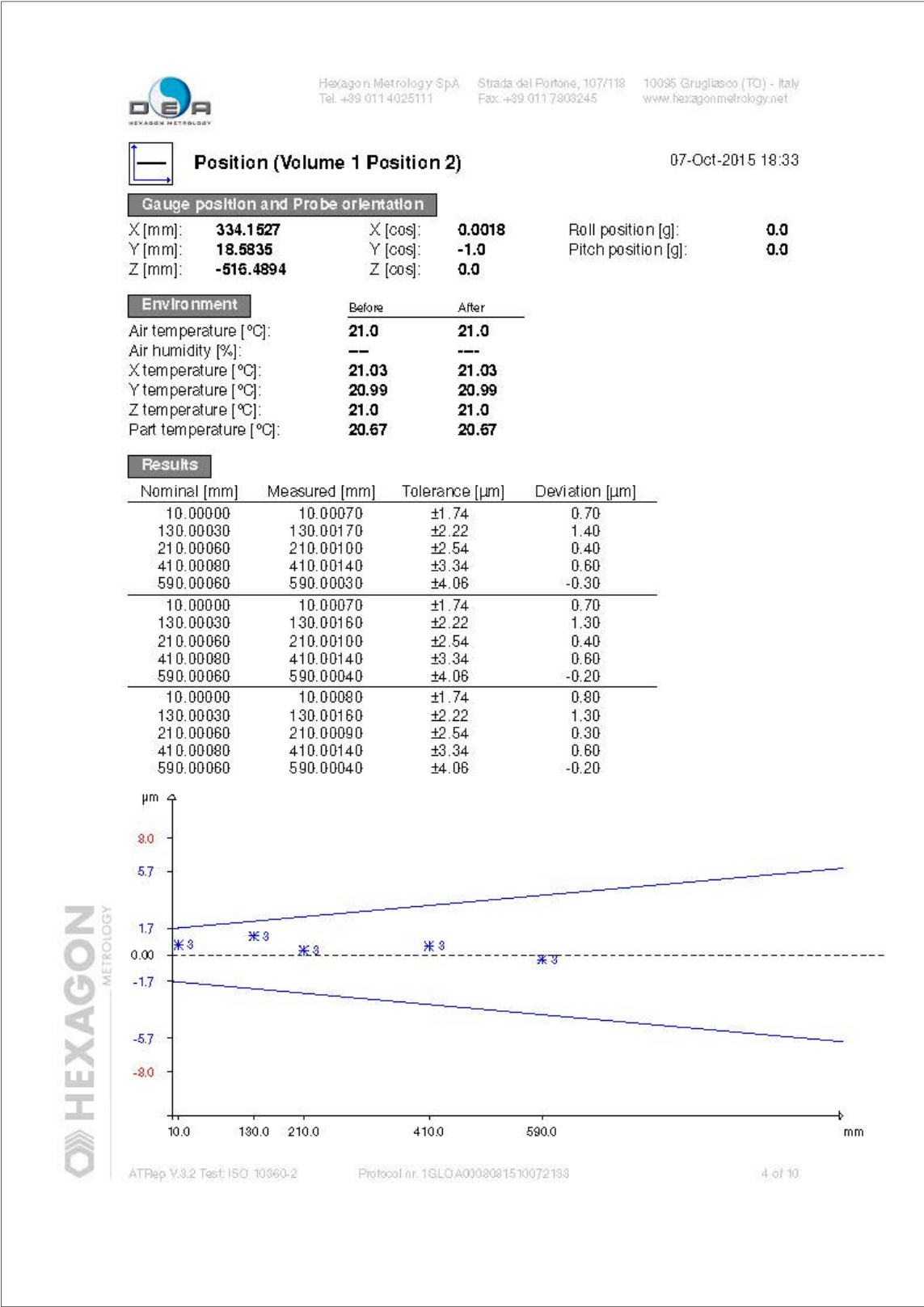




Figure A IV-5 Résultats de calibration de la MMT, page 5

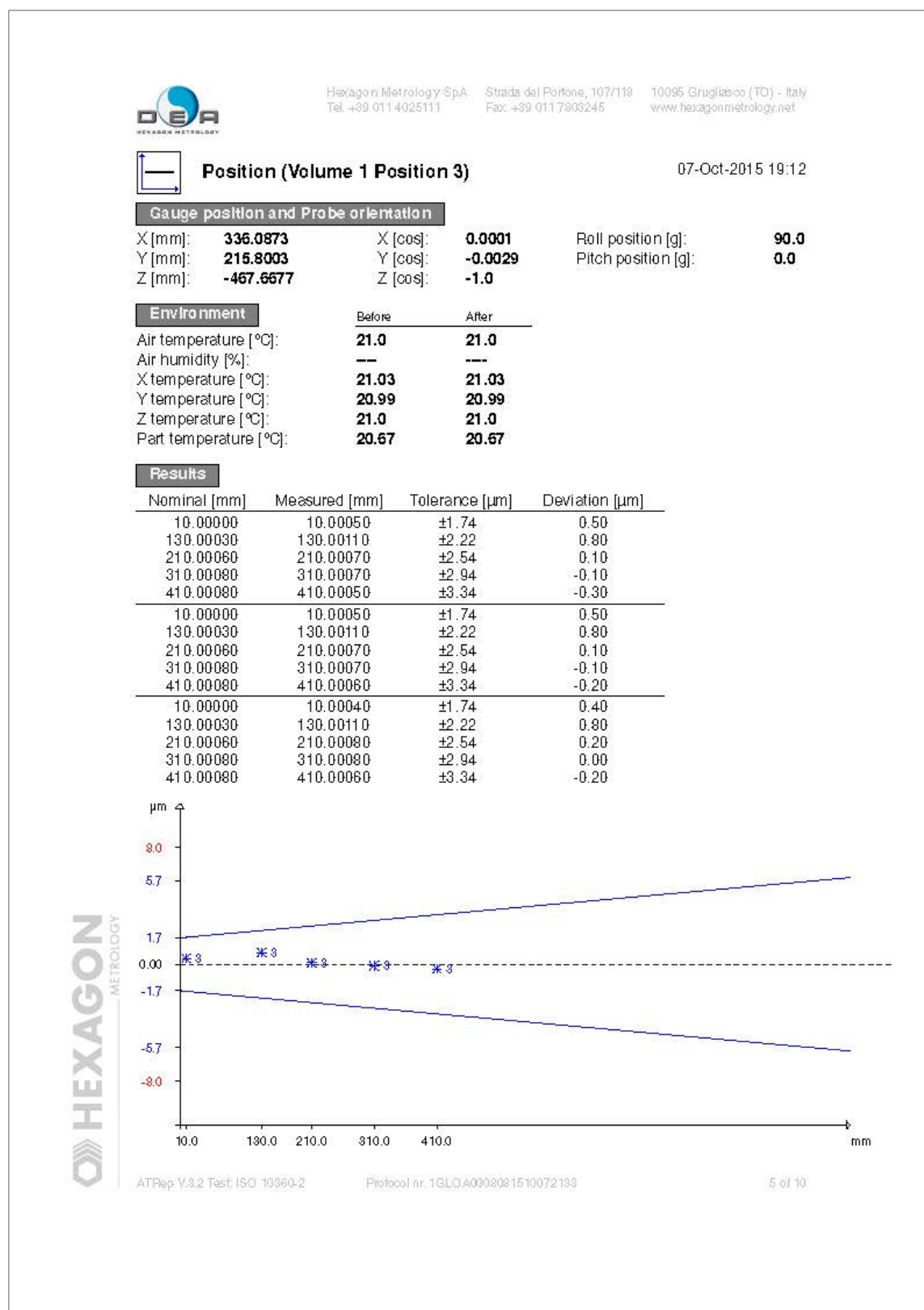


Figure A IV-6 Résultats de calibration de la MMT, page 6

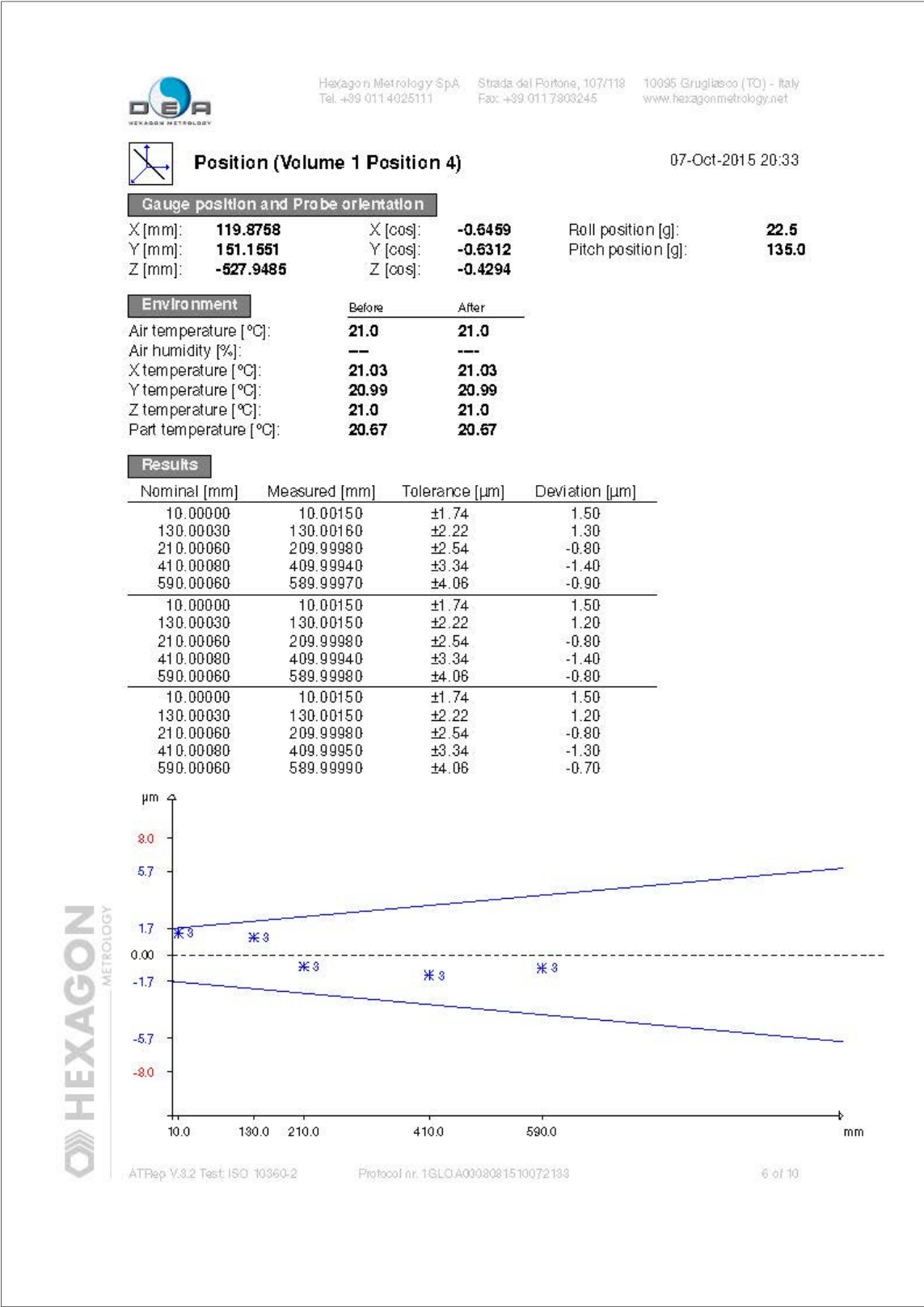


Figure A IV-7 Résultats de calibration de la MMT, page 7

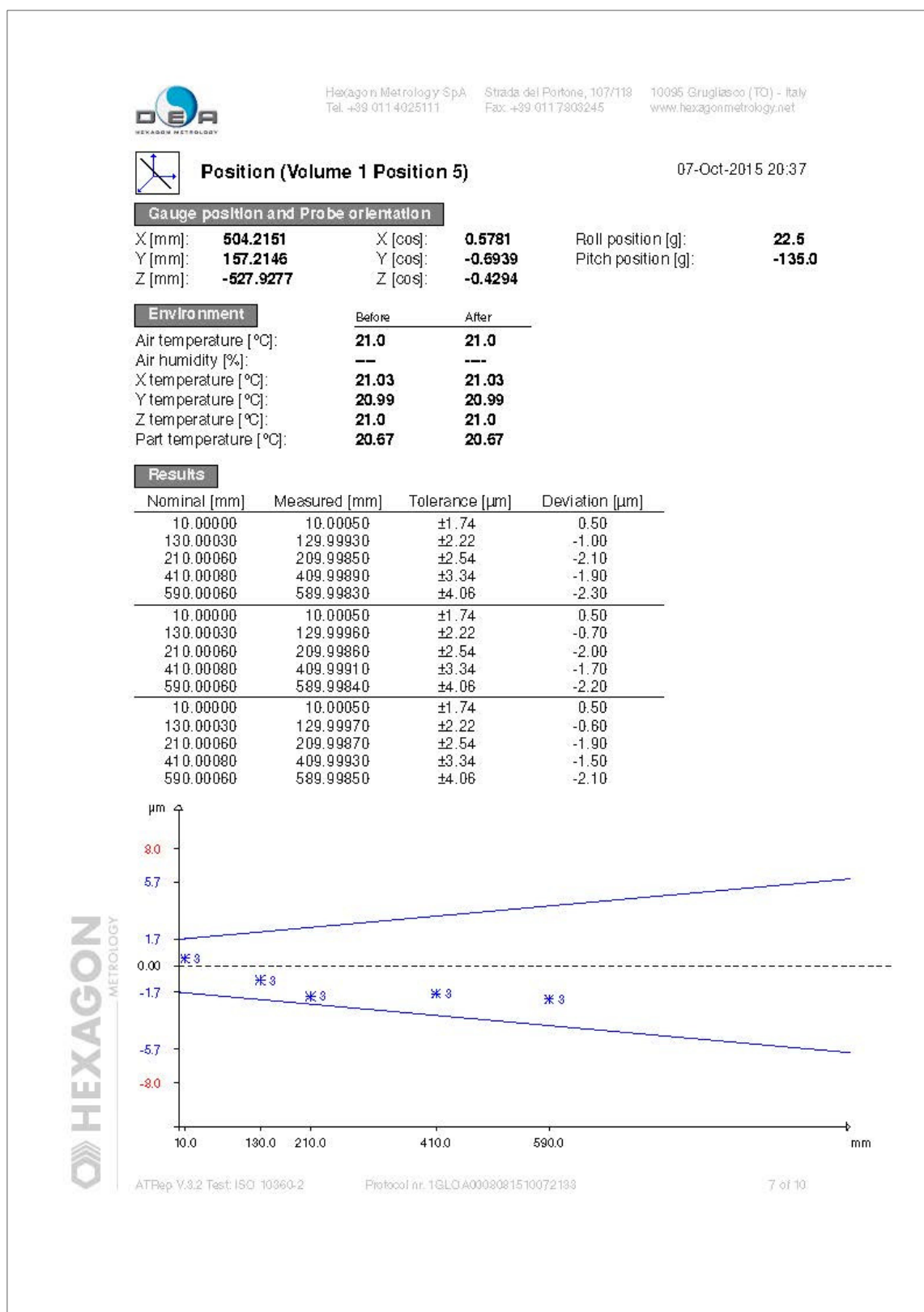


Figure A IV-8 Résultats de calibration de la MMT, page 8

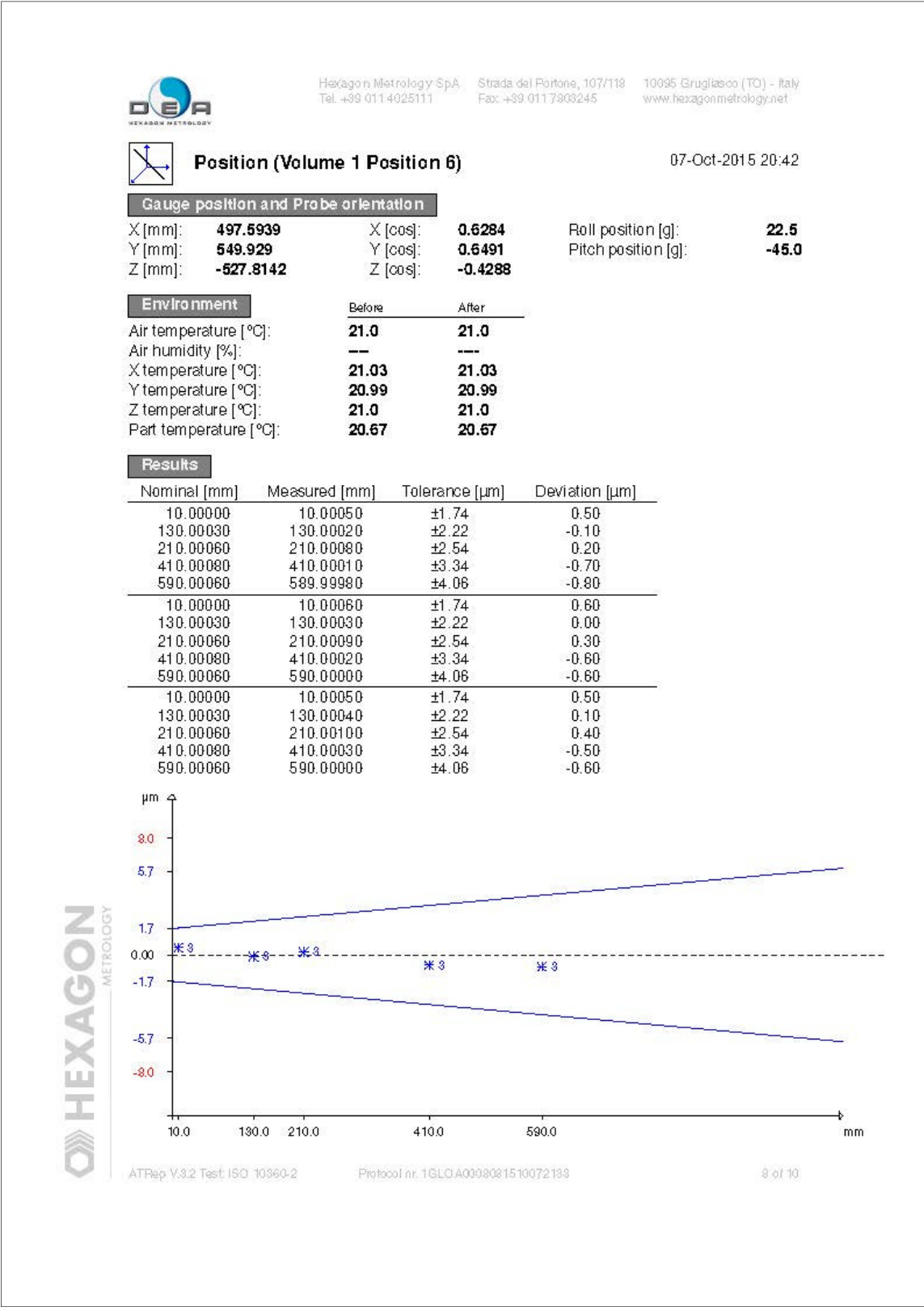


Figure A IV-9 Résultats de calibration de la MMT, page 9

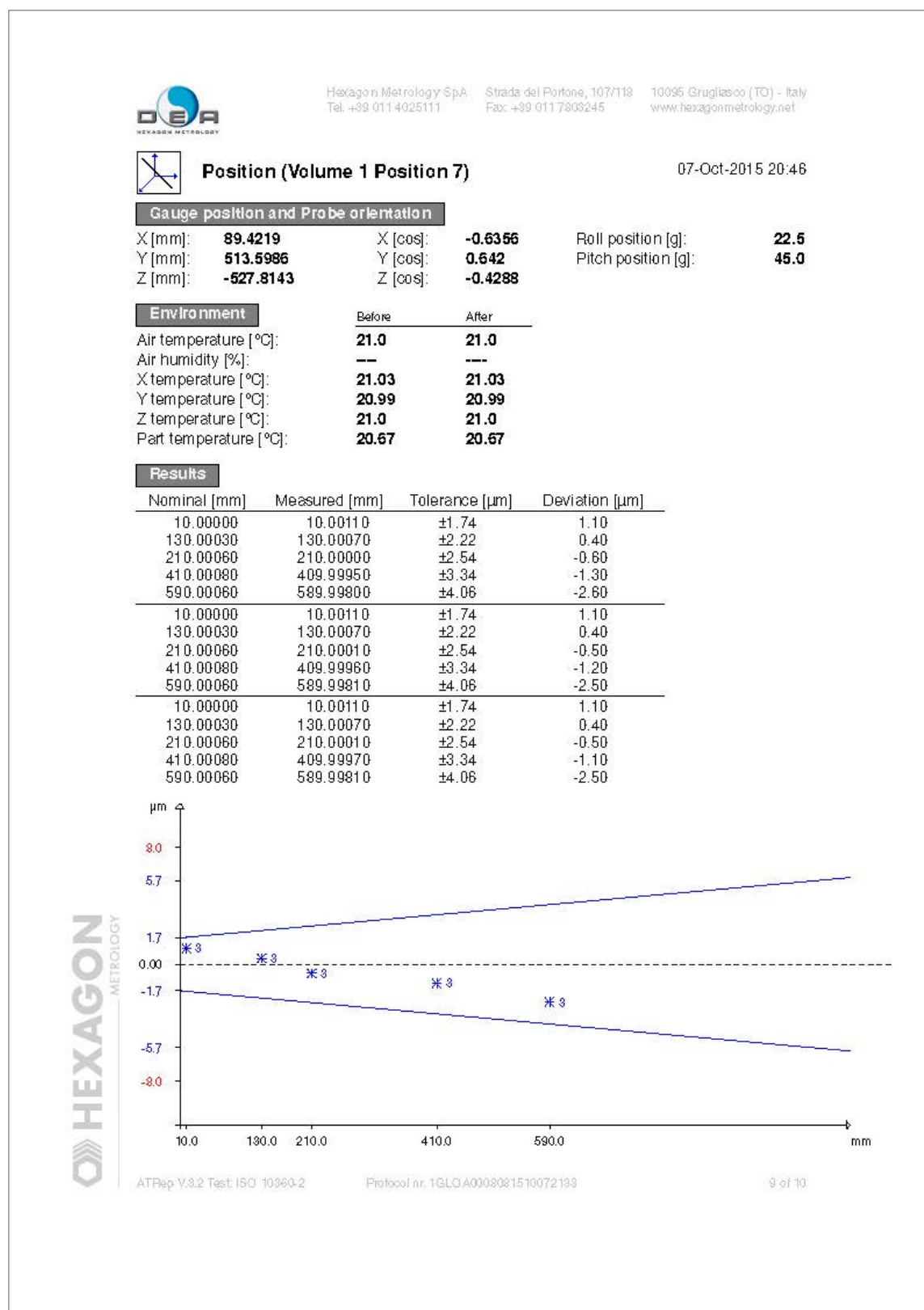


Figure A IV-10 Résultats de calibration de la MMT, page 10

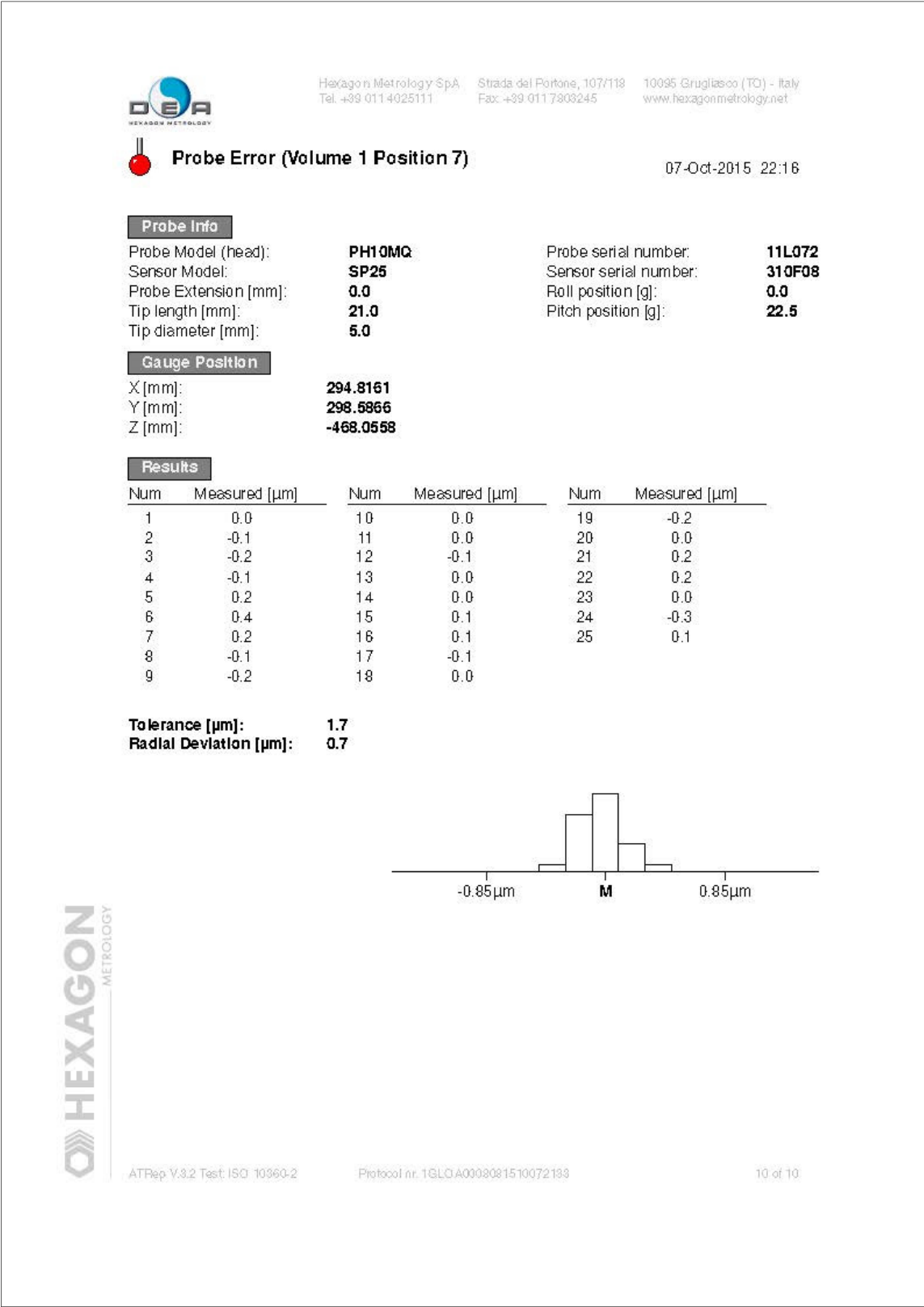






Figure A V-2 Résultats de calibration du C-Track™, page 2

# Probing Size Error

## Summary

Specification	Limits +/-	Status	Max. Deviation (Result)
Accuracy	0.025	Passed	0.009

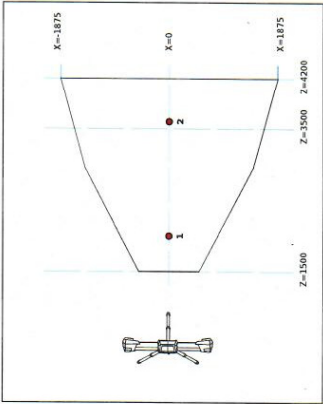
## Detailed Results

Position	Size Deviation	Status	Diameter (Nominal)	Diameter (Measured)	Form (Range of deviation) <sup>3</sup>
1	-0.000	Passed	50.8012	50.8011	0.028
2	0.009	Passed	50.8012	50.8101	0.053

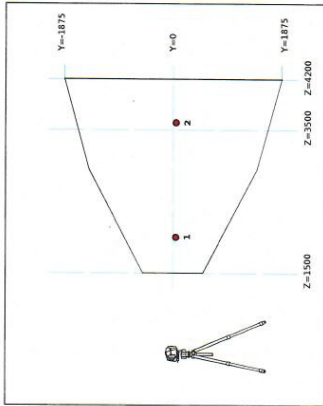
Max. dev. 0.009  
Limits +/- 0.025

Uncertainty (k = 2) : 0.006  
Decision rule based on simple acceptance.

## Positions in volume



Top view



Side view

Note 3 : Not included in the scope of accreditation to ISO/IEC 17025 :2017  
Unless otherwise stated, mm is the unit.  
©2002-2021 Creaform Inc. All rights reserved.



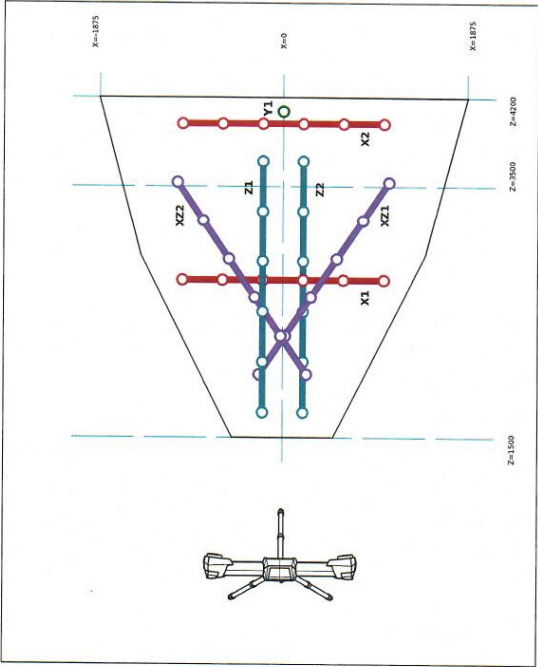
Figure A V-3 Résultats de calibration du C-Track™, page 3

# Length Error Summary

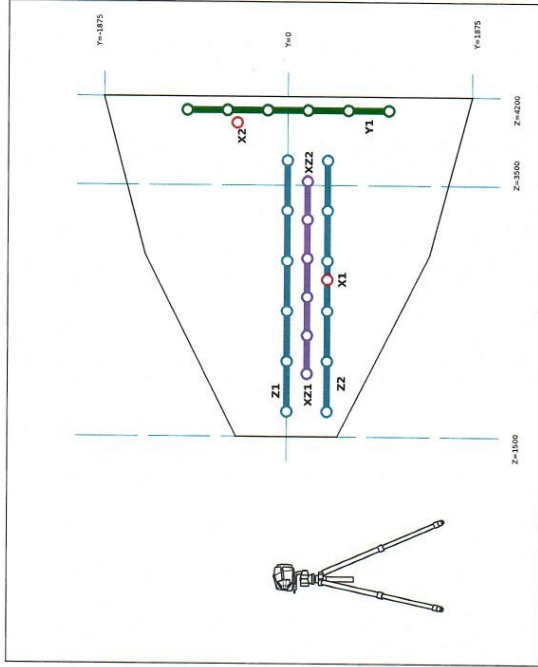
Specification	Limits +/-	Status	Max. Deviation (Result)
Volumetric Accuracy (9.1m <sup>3</sup> )	0.064	Passed	0.044
Volumetric Accuracy (16.6m <sup>3</sup> )	0.078	Passed	0.044

Uncertainty (k = 2) : 0.012  
Decision rule based on simple acceptance.

## Positions in volume



Top view



Side view

Unless otherwise stated, mm is the unit.  
©2002-2021 Creaform Inc. All rights reserved.

Figure A V-4 Résultats de calibration du C-Track™, page 4

## Length Error

### Detailed Results (1 of 2)

Position	Limits +/-	Deviation	Status	Nominal length	Measured length	x1	y1	z1	x2	y2	z2
XZ1A	0.064	-0.009	Passed	400.085	400.075	214.313	190.789	1983.572	-42.054	197.373	2290.644
XZ1B	0.064	-0.002	Passed	800.273	800.271	214.307	190.788	1983.570	-298.369	203.864	2597.920
XZ1C	0.064	-0.014	Passed	1200.093	1200.079	-42.059	197.371	2290.638	-810.727	217.035	3212.024
XZ1D	0.064	-0.012	Passed	1600.178	1600.166	214.305	190.787	1983.559	-810.735	217.037	3212.029
XZ2A	0.064	-0.007	Passed	399.996	399.989	-220.439	214.249	1953.833	37.665	212.248	2259.397
XZ2B	0.064	0.001	Passed	799.947	799.949	-220.446	214.249	1953.816	295.742	210.133	2564.922
XZ2C	0.064	0.007	Passed	1200.046	1200.053	37.653	212.246	2259.401	812.121	205.674	3176.070
XZ2D	0.064	0.002	Passed	1600.041	1600.044	-220.452	214.247	1953.818	812.119	205.674	3176.055
Z1A	0.064	0.019	Passed	400.085	400.104	-195.941	10.143	1671.402	-194.489	13.582	2071.488
Z1B	0.064	-0.005	Passed	800.273	800.268	-195.941	10.139	1671.393	-192.856	16.926	2471.627
Z1C	0.064	-0.006	Passed	1200.083	1200.087	-194.485	13.576	2071.457	-189.659	23.818	3271.491
Z1D	0.064	-0.005	Passed	1600.178	1600.173	-195.947	10.133	1671.405	-189.659	23.811	3271.507
Z2A	0.064	-0.030	Passed	400.085	400.055	205.881	415.637	1671.968	207.521	419.750	2071.999
Z2B	0.064	-0.044	Passed	800.273	800.229	205.877	415.635	1671.969	209.332	423.769	2472.149
Z2C	0.064	0.011	Passed	1200.083	1200.105	207.519	419.750	2071.998	212.892	431.997	3272.028
Z2D	0.064	-0.044	Passed	1600.178	1600.134	205.879	415.636	1671.972	212.888	431.996	3272.007
X1A	0.064	-0.005	Passed	399.973	399.968	1019.385	476.145	2750.363	619.486	469.313	2753.374
X1B	0.064	-0.007	Passed	800.094	800.087	619.483	469.315	2753.381	-180.460	455.356	2759.445
X1C	0.064	0.009	Passed	1200.067	1200.076	1019.400	476.148	2750.390	-180.461	455.359	2759.464
X1D	0.064	-0.002	Passed	1600.019	1600.017	1019.389	476.150	2750.358	-580.339	448.266	2762.458
X1E	0.064	0.002	Passed	2000.014	2000.016	1019.396	476.146	2750.358	-980.255	441.061	2765.427
XZ1E	0.078	-0.018	Passed	2000.224	2000.206	214.302	190.787	1983.569	-1066.999	223.512	3519.154
XZ2E	0.078	-0.013	Passed	2000.014	2000.001	-220.459	214.246	1953.821	1070.215	203.293	3481.579
Z1E	0.078	-0.012	Passed	2000.224	2000.211	-195.945	10.131	1671.399	-188.086	27.144	3671.522

Unless otherwise stated, mm is the unit.  
©2002-2021 Creafarm Inc. All rights reserved.

Certificate number : QC203-21104-0026

Page 4 of 6

Figure A V-5 Résultats de calibration du C-Track™, page 5

## Length Error

### Detailed Results (2 of 2)

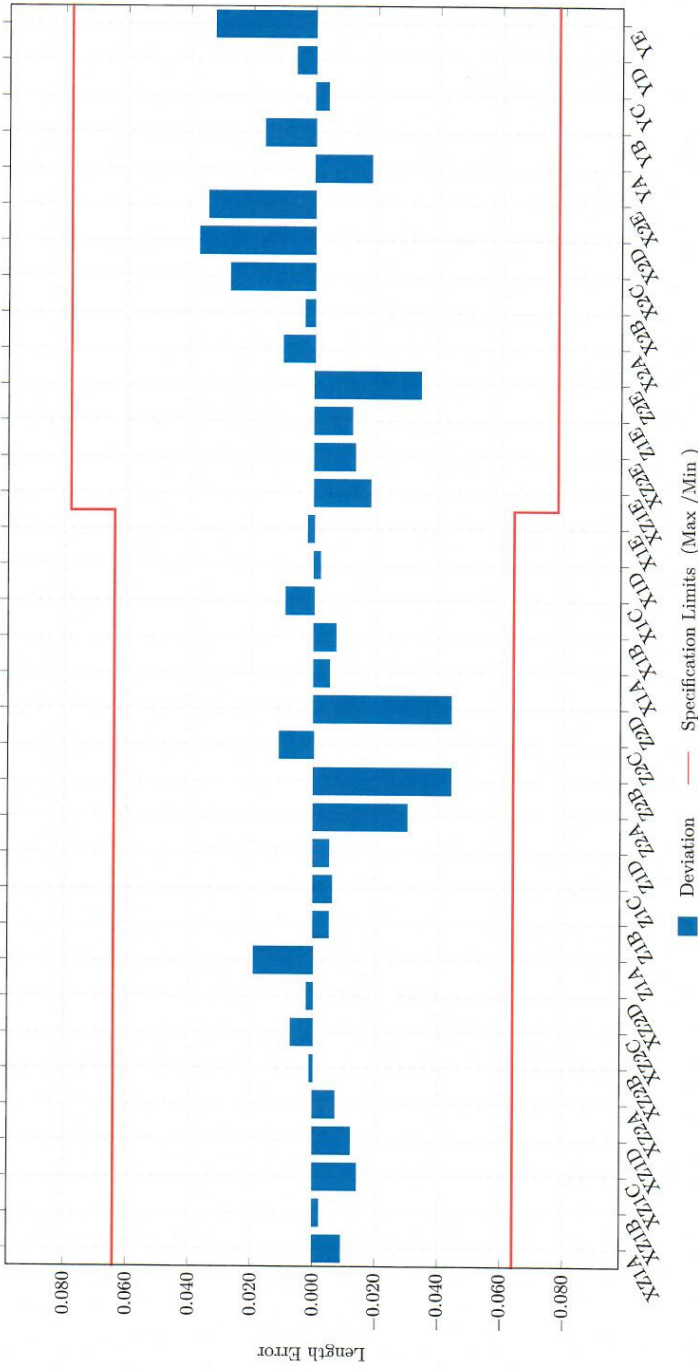
Position	Limits +/-	Deviation	Status	Nominal length	Measured length	x1	y1	z1	x2	y2	z2
ZzE	0.078	-0.034	Passed	2000.224	2000.190	205.881	415.634	1671.976	214.636	435.994	3672.043
X2A	0.078	0.010	Passed	399.973	399.983	1000.306	-471.772	4006.910	600.383	-478.480	4008.615
X2B	0.078	0.003	Passed	800.094	800.097	600.381	-478.478	4008.540	-199.591	-492.195	4012.066
X2C	0.078	0.027	Passed	1200.067	1200.094	1000.295	-471.769	4006.870	-199.614	-492.204	4012.082
X2D	0.078	0.037	Passed	1600.019	1600.055	1000.294	-471.776	4006.902	-599.512	-499.187	4013.811
X2E	0.078	0.034	Passed	2000.014	2000.048	1000.295	-471.785	4006.910	-999.438	-506.266	4015.437
YA	0.078	-0.018	Passed	400.016	399.998	23.845	-981.551	4091.617	15.715	-581.671	4097.006
YB	0.078	0.016	Passed	800.044	800.060	15.710	-581.675	4097.009	-0.846	218.141	4107.818
YC	0.078	-0.004	Passed	1200.060	1200.056	23.846	-981.547	4091.605	-0.838	218.145	4107.841
YD	0.078	0.006	Passed	1600.135	1600.142	23.846	-981.555	4091.614	-8.422	618.116	4113.150
YE	0.078	0.032	Passed	2000.136	2000.168	23.853	-981.560	4091.627	-16.436	1018.023	4118.426
Max. dev.	9.1m <sup>3</sup>	0.044	Passed								
Max. dev.	16.6m <sup>3</sup>	0.044	Passed								

Unless otherwise stated, mm is the unit.  
©2002-2021 Creafarm Inc. All rights reserved.

Figure A V-6 Résultats de calibration du C-Track™, page 6

Length Error

Graph



## ANNEXE VI

### SPÉCIFICATION TECHNIQUES DU C-TRACK™

La figure ci-dessous présente une schématisation 3D du volume de travail du C-Track™. Le volume est composé de deux zones. La première zone en gris pâle (9.1 m³) et la seconde zone en gris foncé (16.6 m³).

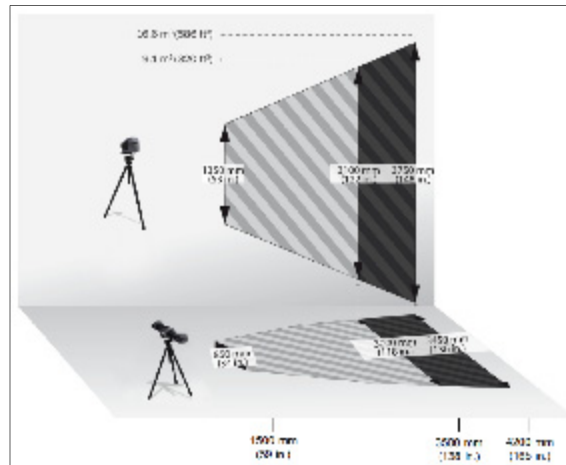


Figure A VI-1 Dimensions du volume de travail du C-Track™

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques techniques avec un niveau de confiance de 95% du système de photogrammétrie en fonction des zones, ce dernier est tirée de (Creaform, 2021a)

Tableau A VI-1 Caractéristiques techniques du C-Track™

Caractéristiques	Volume de travail	
	9,1 m³	16,6 m³
Répétabilité	0,010 mm	0,015 mm
Performance volumétrique	0,050 mm	0,075 mm

## ANNEXE VII

## DESSINS DE FABRICATIONS DES ARTÉFACTS

Figure A VII-1 Dessin de fabrication de l'extension de 50 mm

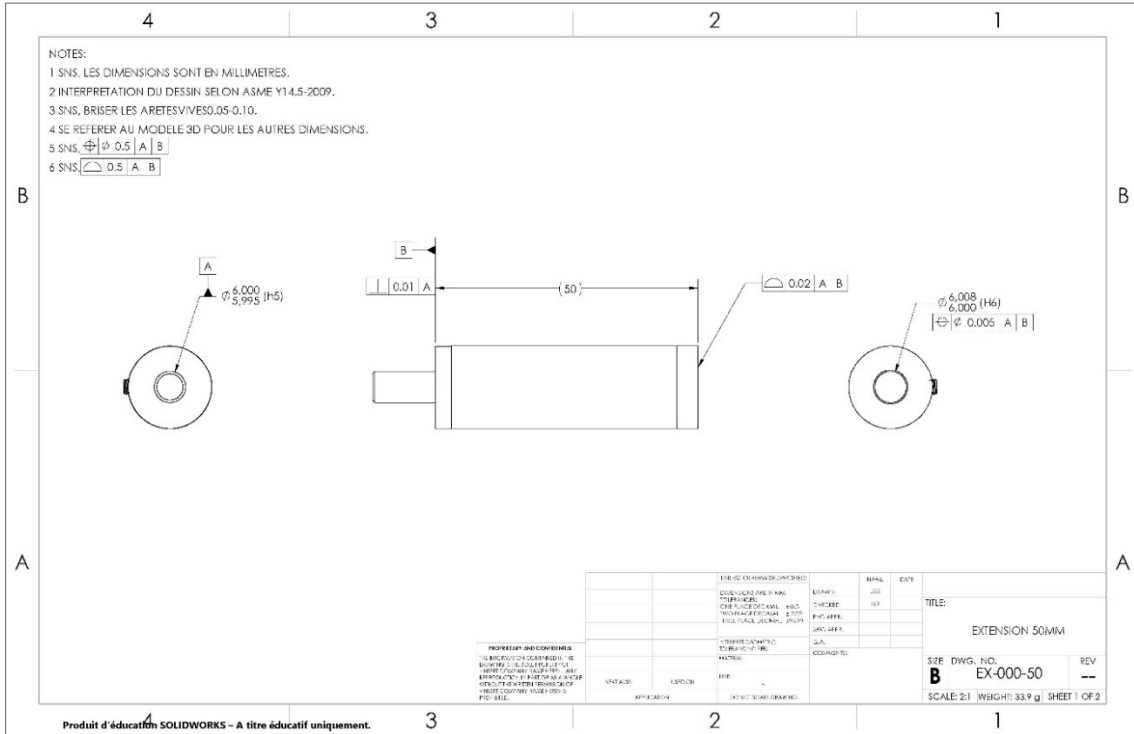


Figure A VII-2 Dessin d'assemblage de l'extension de 50 mm

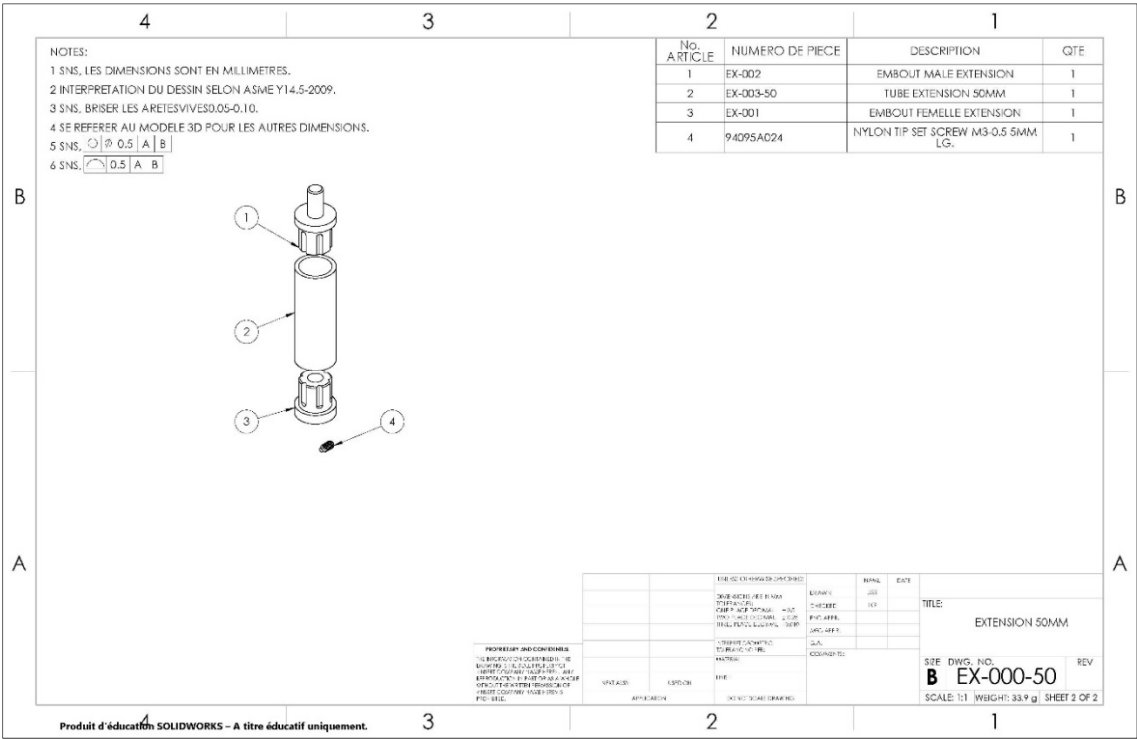


Figure A VII-3 Dessin de fabrication de l'extension de 100 mm

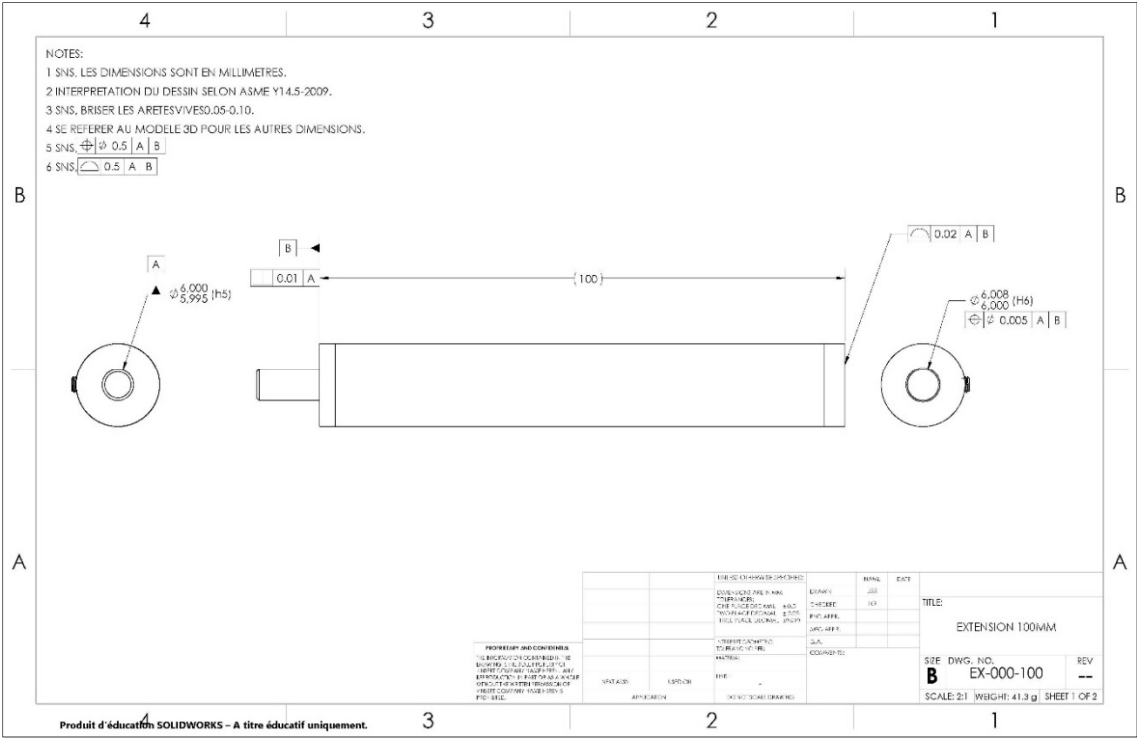


Figure A VII-4 Dessin d'assemblage de l'extension de 100 mm

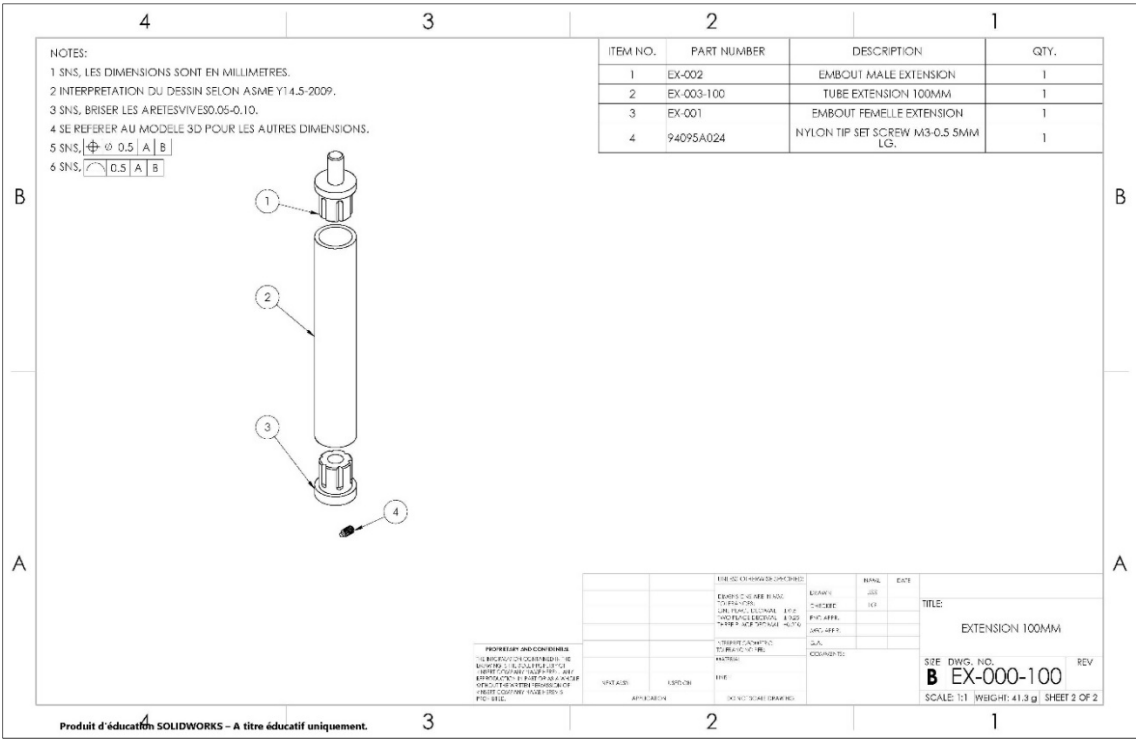


Figure A VII-5 Dessin de fabrication de l'embout femelle pour les extensions

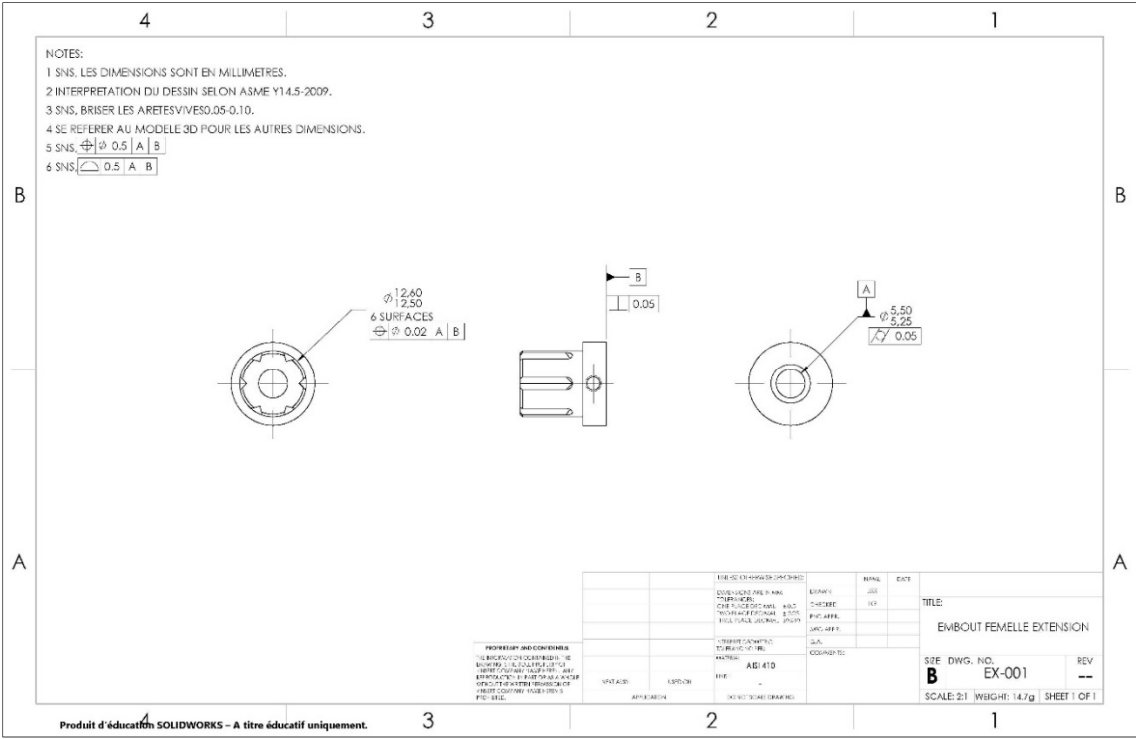




Figure A VII-6 Dessin de fabrication de l'embout mâle pour les extensions

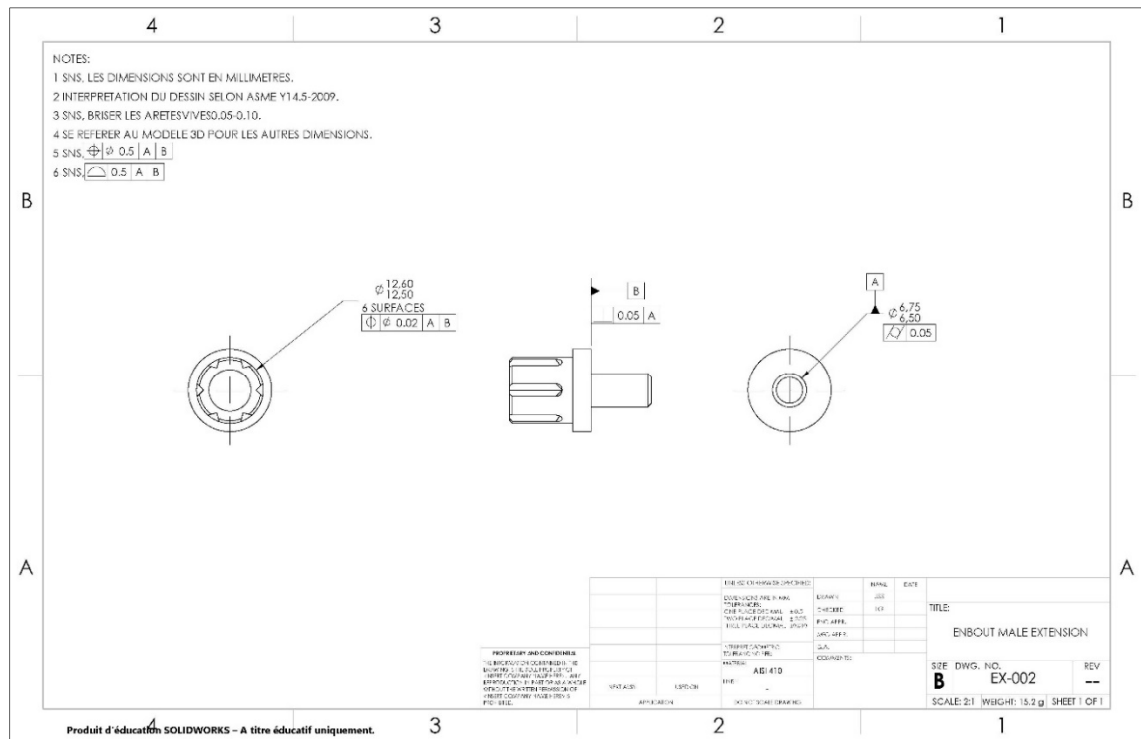


Figure A VII-7 Dessin de fabrication du tube de l'extension de 50 mm

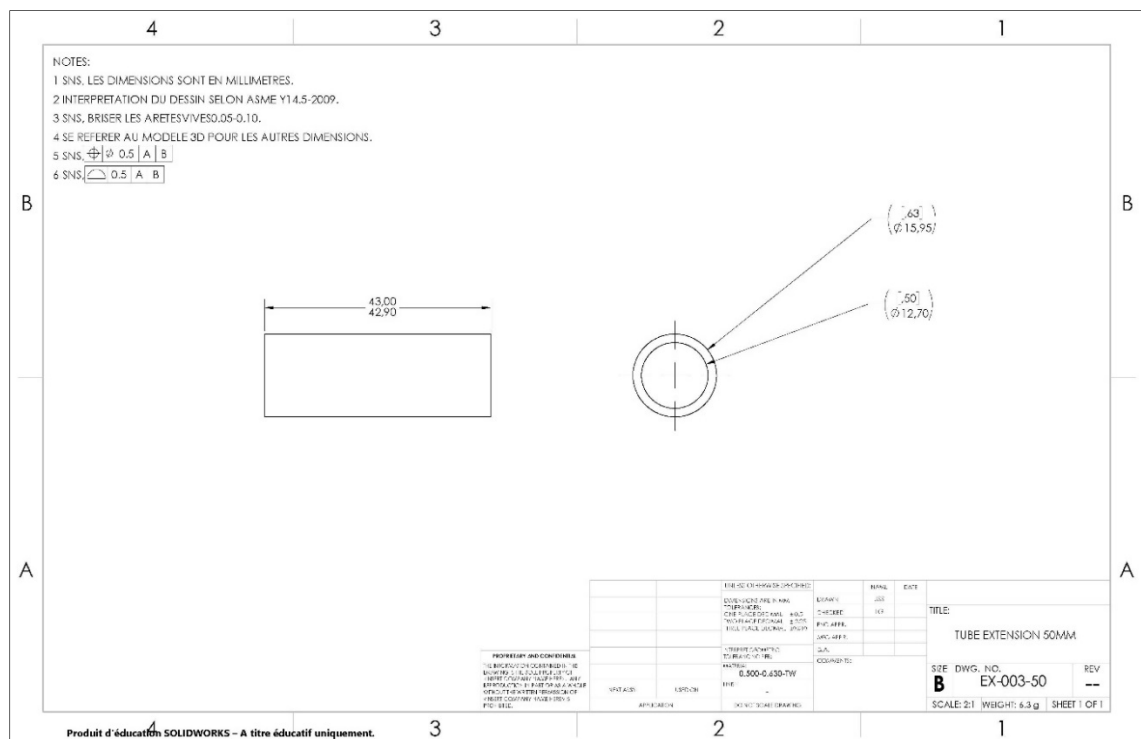


Figure A VII-8 Dessin de fabrication du tube de l'extension de 100 mm

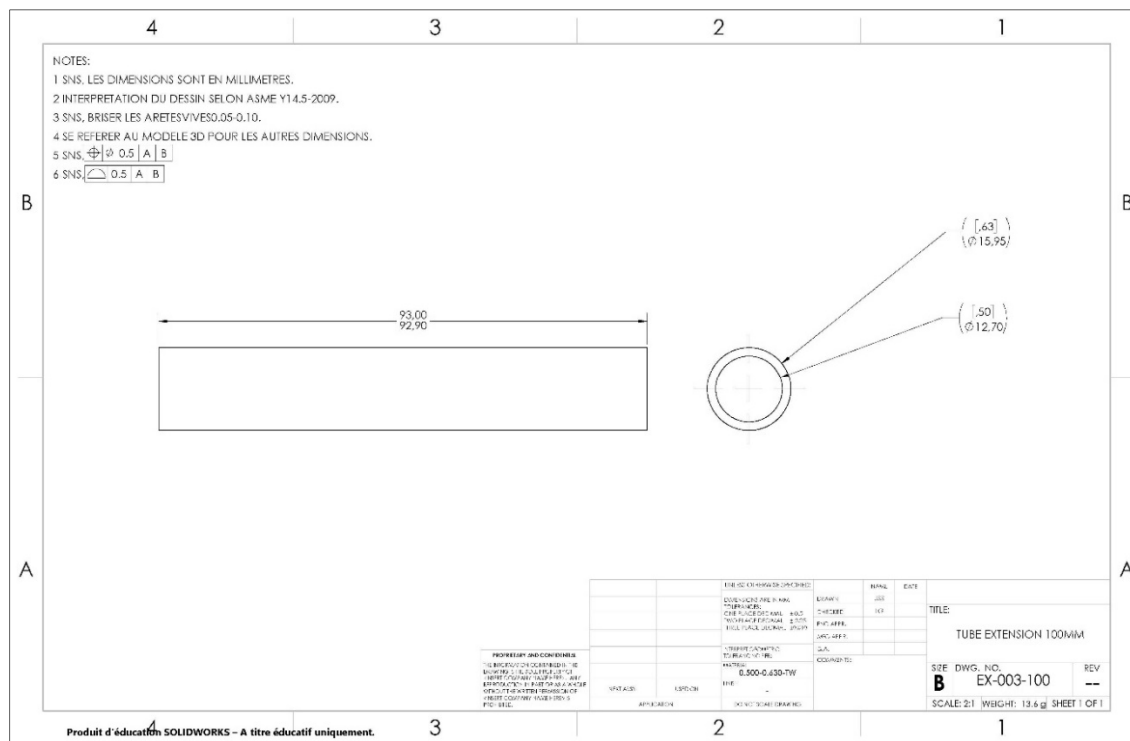
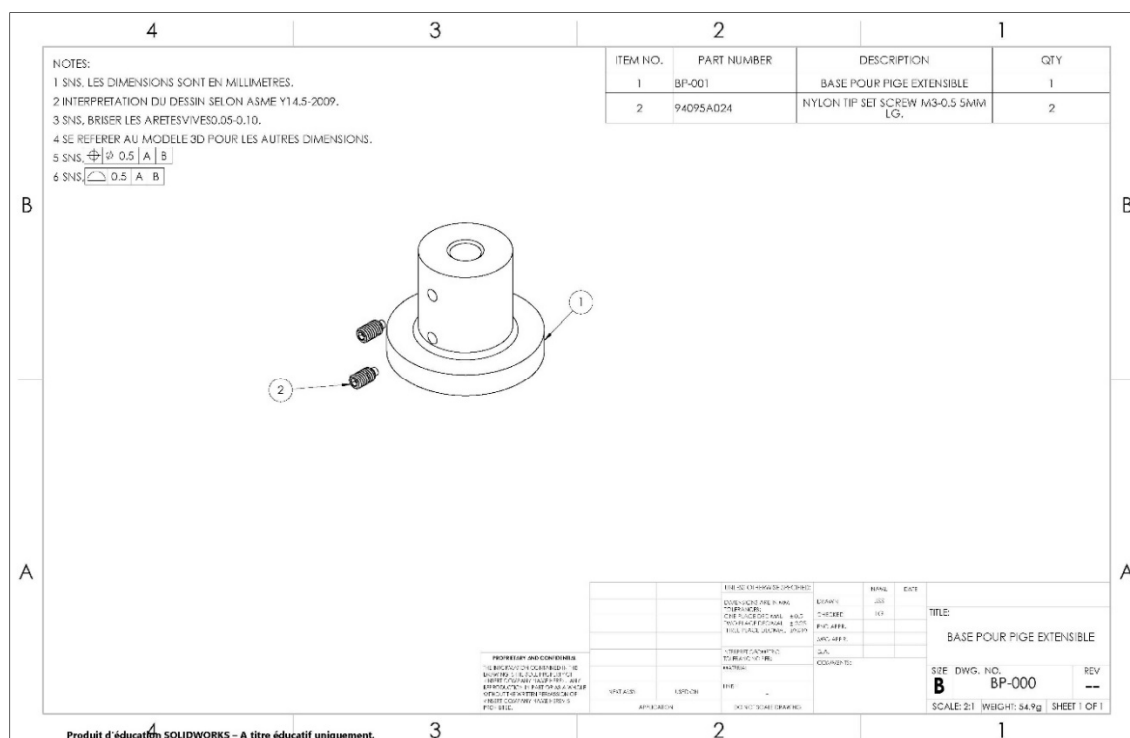


Figure A VII-9 Dessin d'assemblage de la base pour pige extensible



4 3 2 1

NOTES:  
 1 SNS. LES DIMENSIONS SONT EN MILLIMETRES.  
 2 INTERPRETATION DU DESSIN SELON ASME Y14.5-2009.  
 3 SNS. BRISER LES ARRETS VISO 0.05-0.10.  
 4 SE REFERER AU MODELE 3D POUR LES AUTRES DIMENSIONS.  
 5 SNS.  $\phi 0.5$  A B  
 6 SNS.  $\angle 0.5$  A B

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL  
 THIS DRAWING IS THE PROPERTY OF ABB. IT IS TO BE USED FOR THE PURPOSES SPECIFIED ONLY. IT IS NOT TO BE REPRODUCED OR TRANSMITTED IN ANY FORM OR BY ANY MEANS, ELECTRONIC OR MECHANICAL, WITHOUT PERMISSION IN WRITING FROM ABB.

DATE: 2010-01-01  
 DESIGNED BY: ABB  
 CHECKED BY: ABB  
 APPROVED BY: ABB

ITEM NO. PART NUMBER DESCRIPTION QTY  
 1 P-000-4 PIGE EXTENSIBLE Ø6 MM 1  
 2 91217A082 SET SCREW M3-0.5 20MM LG. 90° TIP 1

FIGURE 1: PIGE EXTENSIBLE ET VIS DE REGLAGE

SIZE DWG. NO. REV  
 B P-000-6 --  
 SCALE: 4:1 WEIGHT: 7.3 g SHEET 1 OF 1

Figure A VII-12 Dessin de fabrication de la pigne extensible de 6 mm

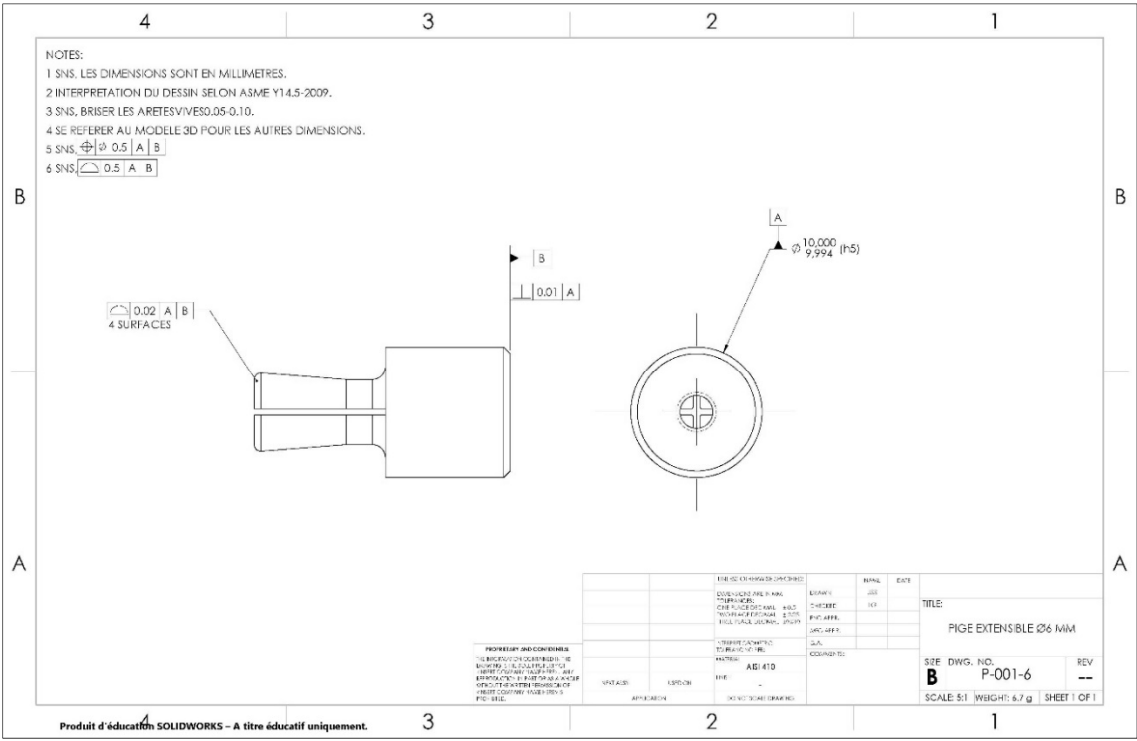


Figure A VII-13 Dessin d'assemblage de la base vacuum

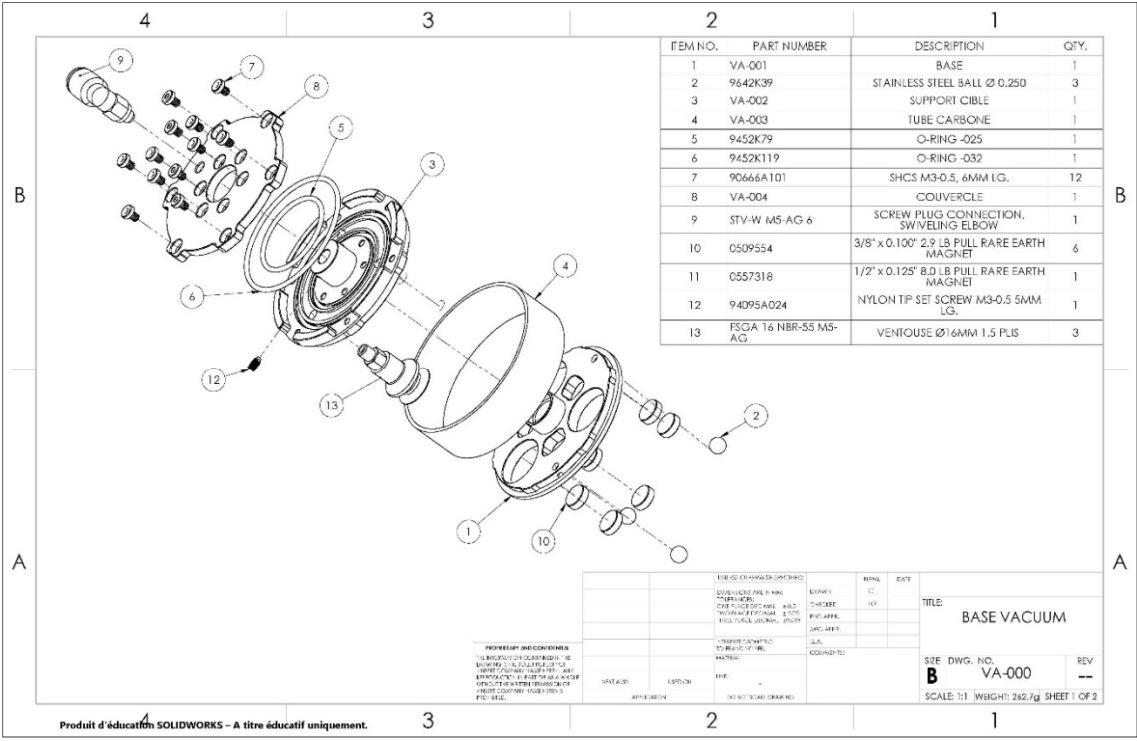


Figure A VII-14 Dessin de fabrication de la base vacuum

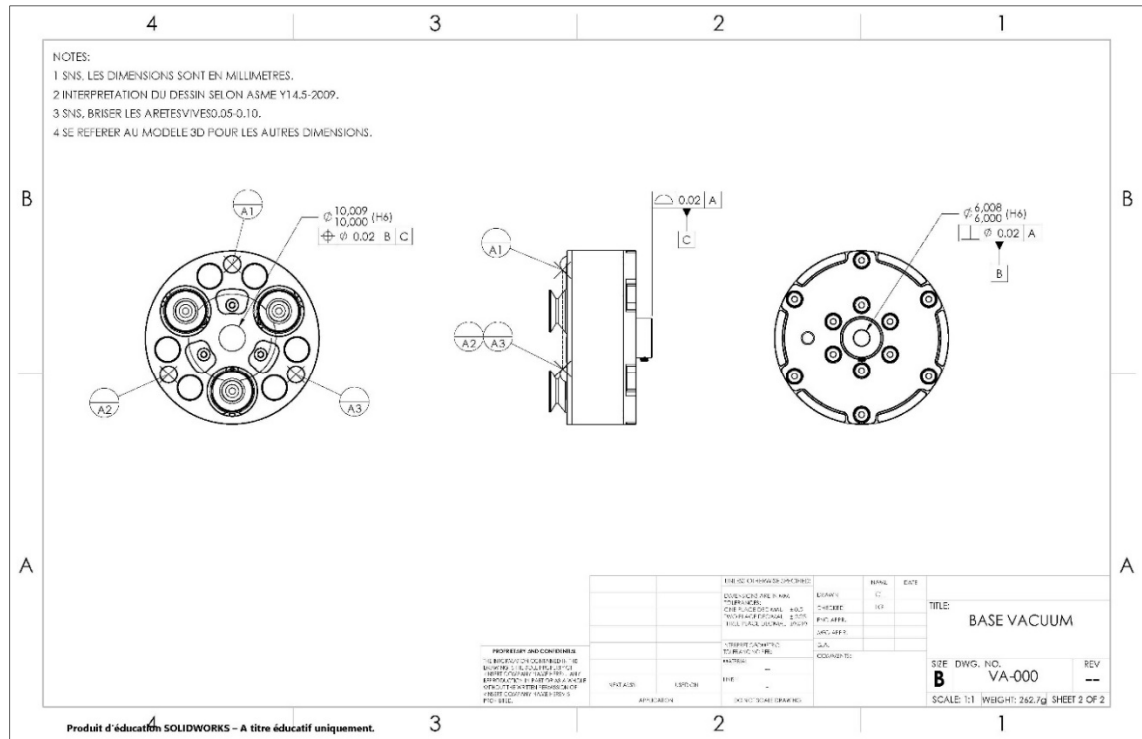


Figure A VII-15 Dessin de fabrication de la base de la base vacuum

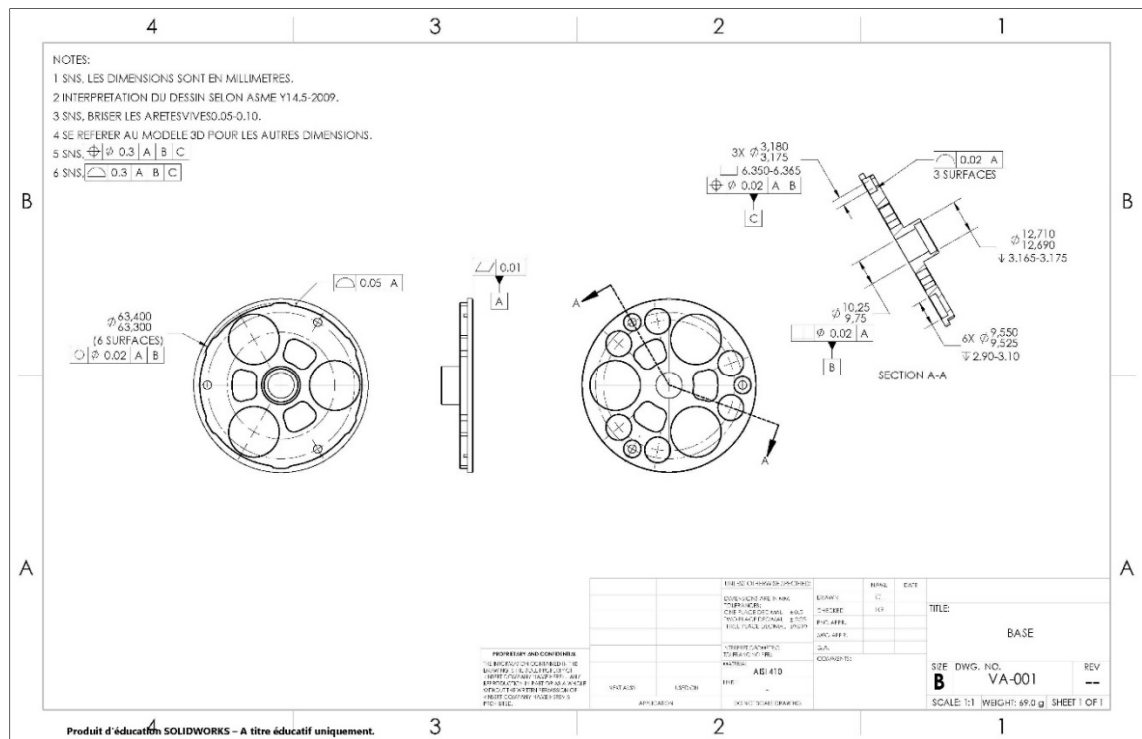


Figure A VII-16 Dessin de fabrication du support cible de la base vacuum

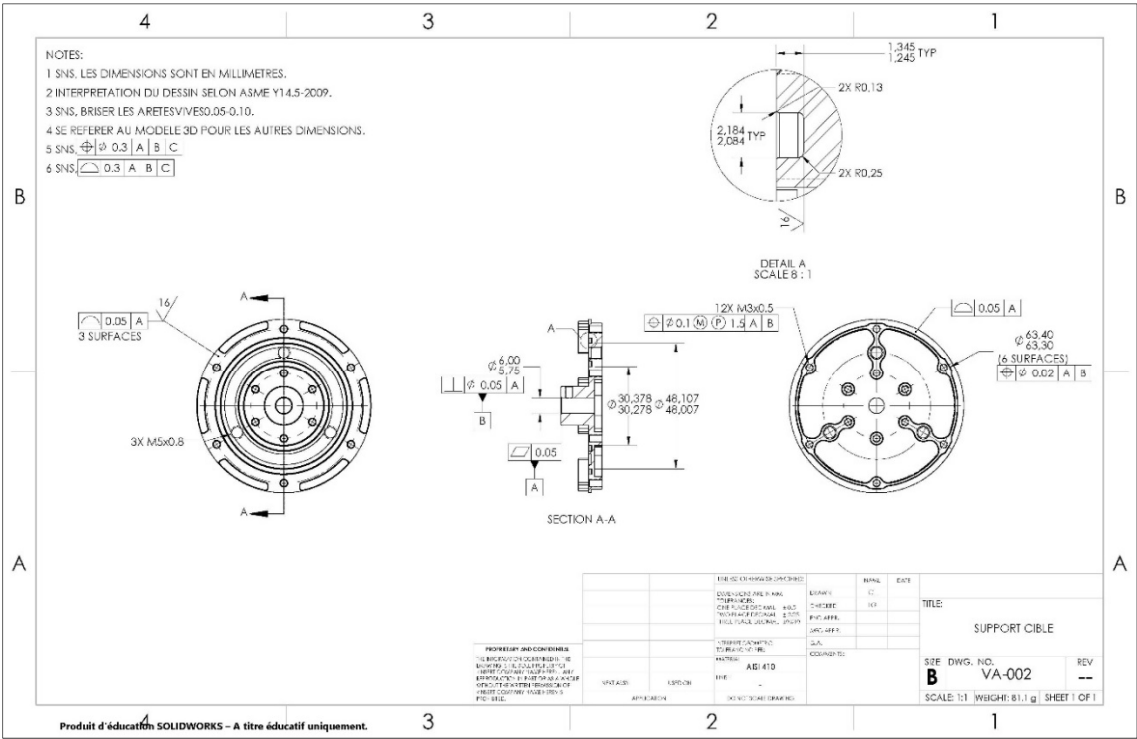


Figure A VII-17 Dessin de fabrication du corps de la base vacuum

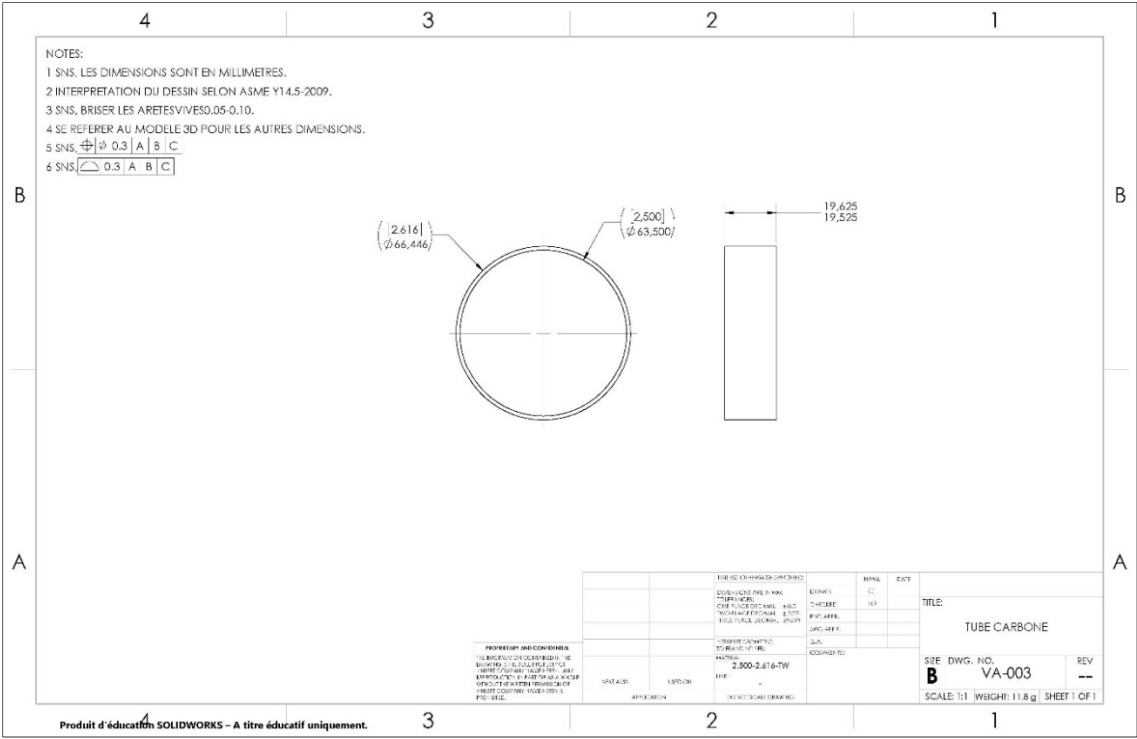




Figure A VII-20 Dessin de fabrication de la base en V, côté mobile

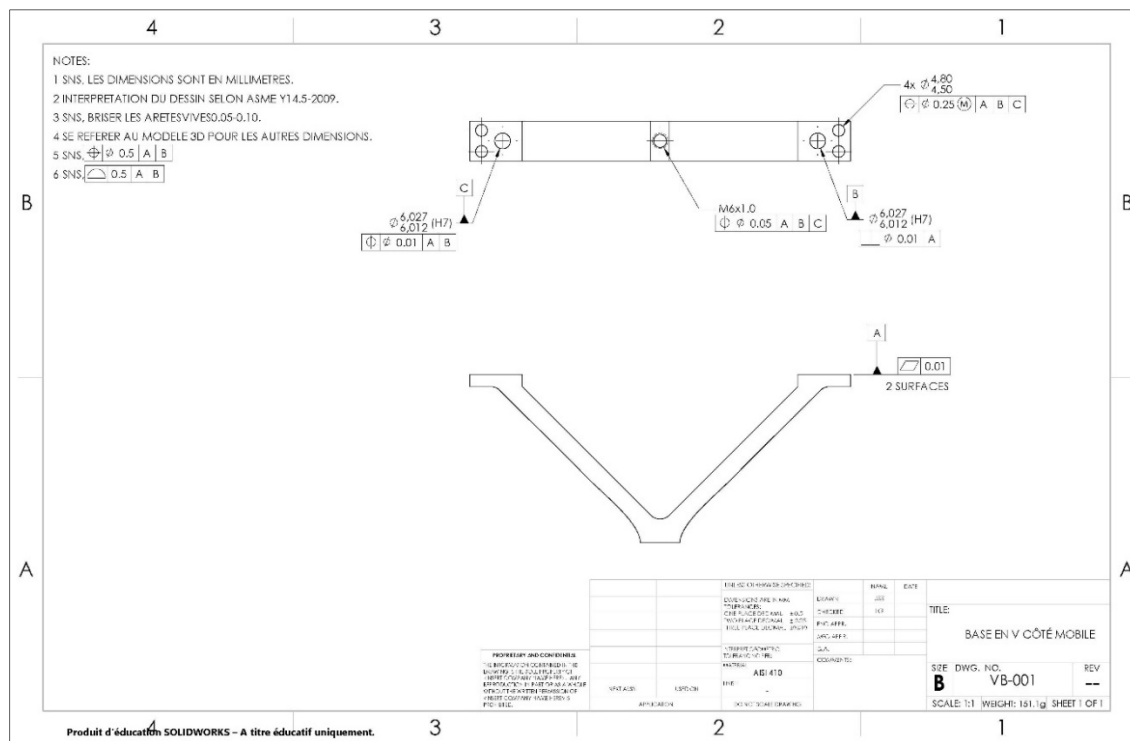
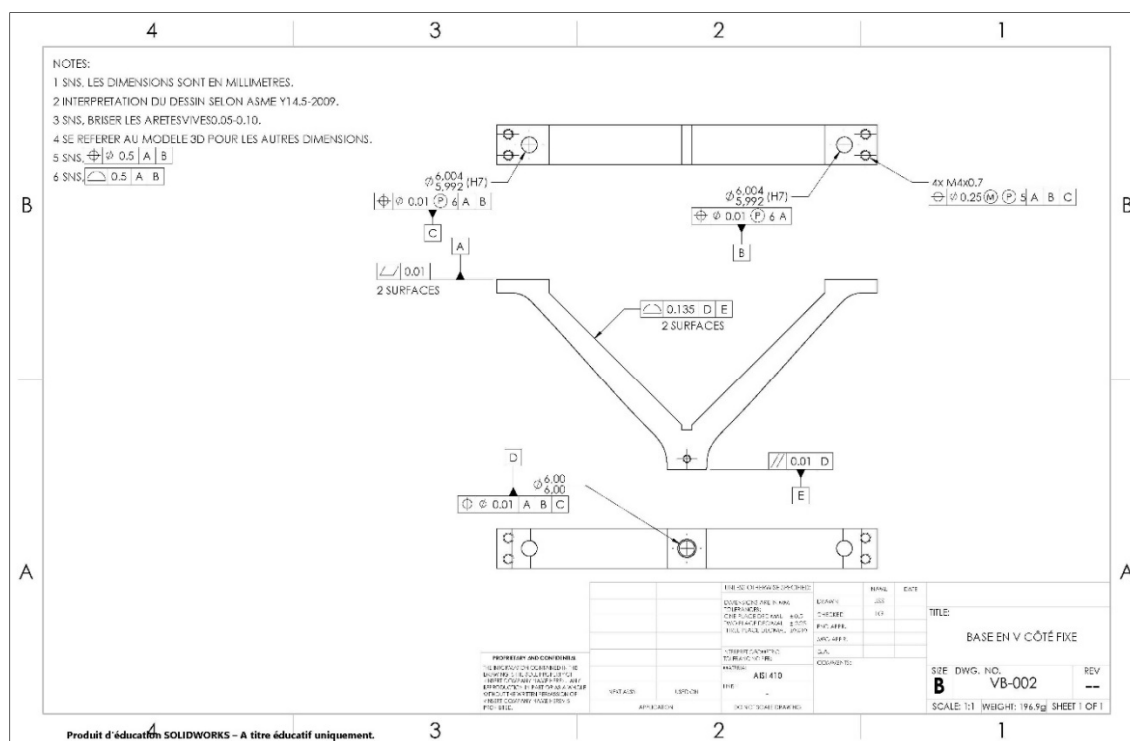


Figure A VII-21 Dessin de fabrication de la base en V, côté fixe





[illegible]



## ANNEXE VIII

### APPLICATION PERMETTANT L'ANALYSE DES RÉSULTATS

Comme il est possible de voir à la figure ci-dessous, l'application VXtrack comporte trois barres d'outils. La première (A) permet de se connecter et de se déconnecter au système, la seconde (B) permet d'aligner le système à l'environnement en utilisant un réseau de cible prédéfini et la troisième (C) permet de créer une séquence de suivi pour ensuite exporter la position des différentes cibles de suivies dans un fichier texte.

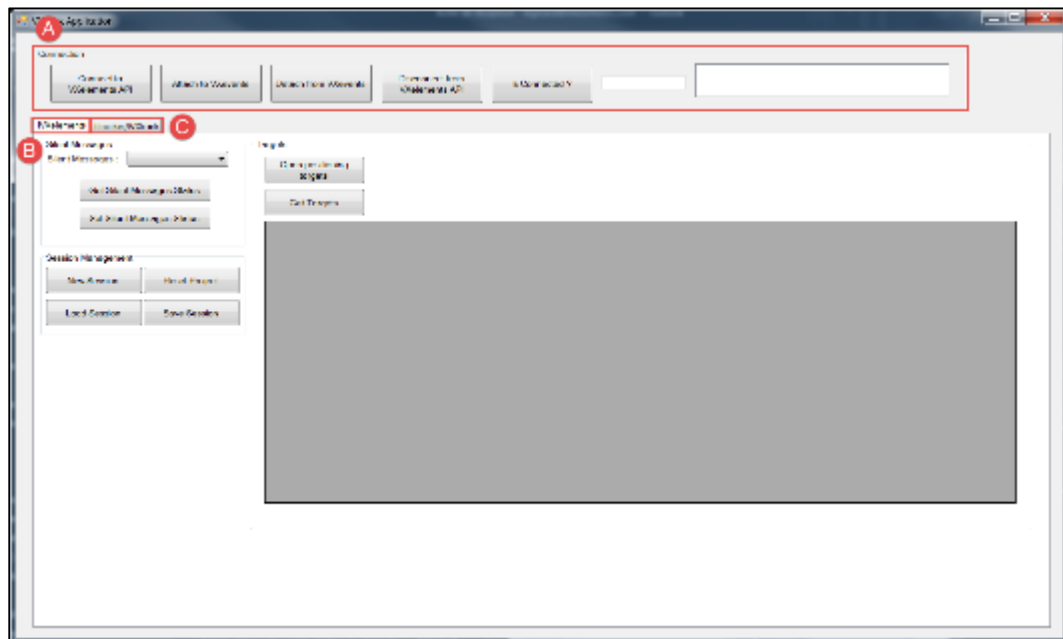


Figure A VIII-1 Application VXtrack

La première barre permet de gérer les différents aspects qui permettent de gérer la connexion entre l'application et l'interface de programmation (API) de VXelements.



Figure A VIII-2 Barre d'outils de connexion

Voici ce à quoi servent les différents boutons :

- Bouton 1, permet de connecter l'application VXtrack à l'API de VXelements;
- Bouton 2, permet de lier les événements qui se produisent dans VXelements à l'application;
- Bouton 3, permet de détacher les événements de VXelement de l'application;
- Bouton 4, permet de se déconnecter de l'API;
- Bouton 5, permet de voir si l'application est bel-et-bien connecté à l'application (true = connecté et false = déconnecté);
- Bouton 6, permet de voir le statut de l'exécution des commandes. Lorsque qu'une commande est réalisée, elle s'inscrit dans cette fenêtre.

La seconde barre d'outils permet de gérer les principaux aspects de la connexion à VXelements et d'importer le fichier .txt contenant l'information liée aux cibles de positionnement.

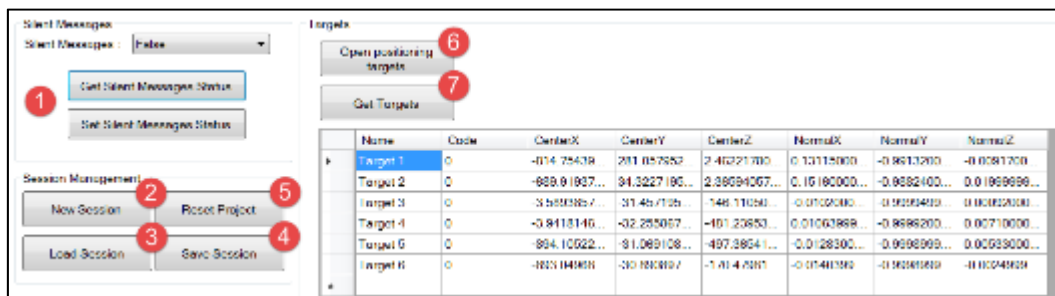


Figure A VIII-3 Barre d'outils VXelements

Voici à quoi servent les différents boutons de ce premier onglet :

- Bouton 1, permet de bloquer les différents message émis par l'API de VXelements. Ainsi, il est possible de permettre ou non à l'interface de faire apparaître des messages à l'utilisateur. Dans un cas où le statut est à false, l'utilisateur ne reçoit pas de messages;
- Bouton 2, permet de créer une nouvelle session dans VXelements;
- Bouton 3, permet d'ouvrir une session existante dans VXelements;
- Bouton 4, permet de mettre à zéro un projet existant dans VXelements;
- Bouton 5, permet de sauvegarder une session;

- Bouton 6, permet d'ouvrir un fichier .txt contenant l'information nécessaire pour importer les cibles de positionnement;
- Bouton 7, permet de voir les cibles de positionnement (coordonnées x,y et z et normale x,y et z).

La troisième barre d'outils permet de gérer l'ensemble des actions permettant de suivre en temps réel un modèle de cibles prédéfinis par l'utilisateur.

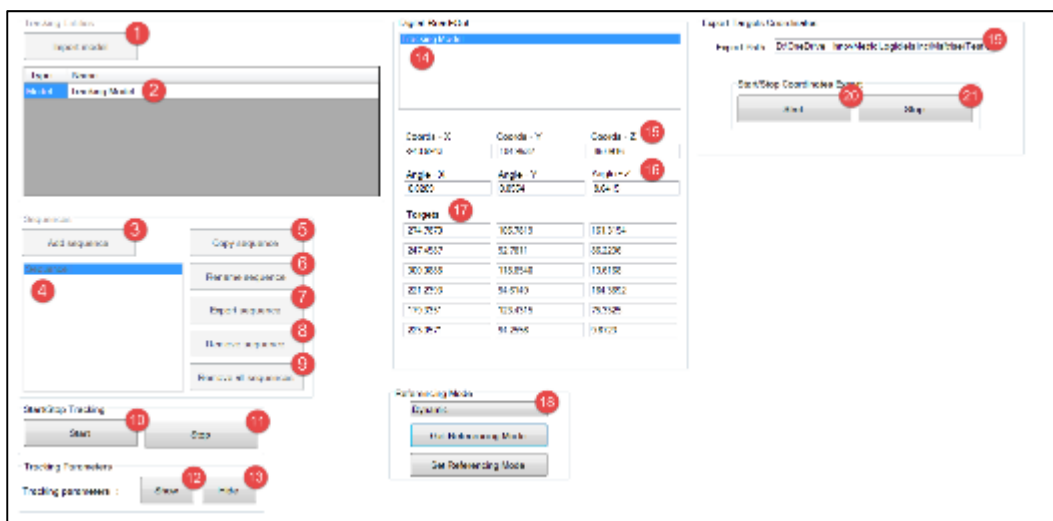


Figure A VIII-4 Barre d'outils VXelements

Voici à quoi servent les différents boutons de ce deuxième onglet :

- Bouton 1, permet d'ouvrir un fichier .txt contenant l'information nécessaire pour importer les cibles formant un modèle de suivi;
- Bouton 2, affiche le nom des différents modèles de suivi présent dans le projet (habituellement seulement un);
- Bouton 3, permet de créer une nouvelle séquence de suivi;
- Bouton 4, affiche le nom des séquences;
- Bouton 5, permet de copier une séquence (celle qui est surlignée en bleu);
- Bouton 6, permet de renommer une séquence;
- Bouton 7, permet d'exporter sous format .csv une séquence;

- Bouton 8, permet de supprimer une séquence;
- Bouton 9, permet de supprimer l'ensemble des séquences du projets;
- Bouton 10, commence l'acquisition en temps réel du positionnement des cibles du modèle de suivi;
- Bouton 11, arrête l'acquisition;
- Bouton 12, présente les paramètres de suivi du C-Track™ et permet de les éditer;
  - a. Permet de modifier la vitesse d'acquisition de la position des cibles en Hz;
  - b. Permet de filtrer la position des cibles;
  - c. Permet d'appliquer les changements effectués.
- Bouton 13, permet de cacher la fenêtre des paramètres;
- Bouton 14, affiche le nom du modèle de cibles qui est présentement en train de se faire suivre par le C-Track™;
- Bouton 15, affiche les coordonnées x,y et z du centre du modèle de suivi (centre théorique de l'ensemble des cibles du modèle);
- Bouton 16, affiche les angles x, y et z du centre du modèle de suivi;
- Bouton 17, affiche les coordonnées x, y et z de l'ensemble des cibles du modèle de suivi;
- Bouton 18, affiche et permet d'ajuster le mode de référence utilisé par le C-Track™. Le mode dynamique doit être préconisé, car il permet de suivre en temps réel l'assemblage;
- Bouton 19, permet d'écrire le chemin et le nom du fichier .txt vers lequel les coordonnées x, y et z des cibles seront exportées;
- Bouton 20, commence l'export des coordonnées vers le fichier .txt;
- Bouton 21, arrête l'export des coordonnées

## ANNEXE IX

### RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Tableau A X-1 Résultats détaillés de la mesure de la position de référence sur MMT

	Cercle 1			Cercle 2			Cercle 3		
Mesure	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,1756	53,7495	201,3745	220,7346	92,3118	216,4765	252,1448	55,959	186,4206
2	192,1757	53,7493	201,3742	220,7342	92,3116	216,4764	252,1449	55,9586	186,4207
3	192,1757	53,7489	201,3744	220,7349	92,3112	216,4764	252,1447	55,9585	186,4199
4	192,176	53,7496	201,3746	220,7349	92,3118	216,4763	252,145	55,9585	186,4206
5	192,1759	53,7494	201,3736	220,7338	92,3117	216,4757	252,1443	55,9588	186,4197
6	192,1758	53,7493	201,3744	220,7344	92,3116	216,4764	252,145	55,9585	186,4204
7	192,1761	53,7484	201,3755	220,7388	92,3113	216,4748	252,1432	55,9588	186,4144
8	192,1767	53,7486	201,3756	220,7387	92,3115	216,475	252,1439	55,9588	186,4151
9	192,1759	53,7486	201,3753	220,7381	92,3114	216,4749	252,1433	55,9591	186,4151
10	192,1751	53,7489	201,3751	220,7365	92,3112	216,4746	252,1431	55,9587	186,415
11	192,1758	53,7488	201,375	220,7368	92,3112	216,4747	252,1438	55,9592	186,4149
12	192,1758	53,7487	201,3751	220,7366	92,3107	216,4749	252,1438	55,9591	186,4153
13	192,1762	53,7493	201,3762	220,7375	92,3107	216,4752	252,1442	55,9589	186,4146
14	192,1769	53,7502	201,3748	220,7352	92,311	216,4751	252,1426	55,9585	186,4163
15	192,1767	53,7495	201,3748	220,7362	92,3109	216,475	252,1432	55,9589	186,4159
16	192,177	53,7494	201,375	220,7363	92,311	216,475	252,1431	55,9591	186,4155
17	192,1769	53,7493	201,3752	220,7366	92,311	216,475	252,1433	55,9592	186,4155
18	192,1767	53,7495	201,3751	220,7358	92,3115	216,4753	252,1439	55,9588	186,4163
19	192,1769	53,749	201,3752	220,7361	92,3114	216,4752	252,1435	55,959	186,4162
20	192,1755	53,7497	201,3736	220,7336	92,3116	216,4754	252,1437	55,9588	186,4192
21	192,1763	53,7495	201,374	220,7349	92,3116	216,4754	252,1452	55,9592	186,4185
22	192,1762	53,7496	201,3739	220,734	92,3116	216,4761	252,1449	55,9591	186,4207
23	192,1751	53,7493	201,3739	220,7337	92,3118	216,476	252,1448	55,9589	186,4207
24	192,1754	53,7493	201,3739	220,733	92,3118	216,476	252,145	55,9588	186,421
25	192,1749	53,7499	201,374	220,7341	92,3113	216,4758	252,1445	55,9585	186,4203
26	192,1758	53,7492	201,3741	220,7344	92,3115	216,4757	252,1446	55,9587	186,4195
27	192,1763	53,7486	201,3746	220,7354	92,3111	216,4757	252,1444	55,9594	186,4182
28	192,1751	53,7495	201,3741	220,7343	92,3115	216,476	252,1443	55,9585	186,4202
29	192,1752	53,7495	201,3741	220,7344	92,3111	216,4759	252,1442	55,9587	186,4202
30	192,1756	53,7495	201,3742	220,7339	92,3115	216,476	252,1448	55,9581	186,4202

Tableau A X-2 Résultats de mesure temps de chauffe 0 minute

	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
Pièces	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,1327	53,8409	201,3881	220,7095	92,4307	216,4871	252,1166	56,1146	186,406
2	192,1271	53,8459	201,3835	220,7129	92,4285	216,4837	252,1108	56,1077	186,3988
3	192,1364	53,8229	201,3816	220,6966	92,4238	216,4834	252,1201	56,122	186,4024
4	192,132	53,8311	201,3784	220,7104	92,4187	216,4801	252,1179	56,0996	186,4033
5	192,1303	53,8562	201,3803	220,7194	92,436	216,4816	252,1175	56,1062	186,4077
6	192,1284	53,8508	201,3821	220,7188	92,4328	216,4756	252,1161	56,095	186,4106
7	192,1273	53,8541	201,3848	220,7156	92,4406	216,4709	252,1134	56,1019	186,4074
8	192,1368	53,8234	201,385	220,7225	92,4071	216,4824	252,1237	56,0772	186,4119
9	192,1329	53,8449	201,3793	220,716	92,4309	216,4757	252,1184	56,105	186,4016
10	192,1344	53,8363	201,3845	220,7079	92,4283	216,484	252,1185	56,1145	186,4039
11	192,1339	53,88	201,3849	220,7154	92,4655	216,4861	252,1191	56,1451	186,4065
12	192,1291	53,8271	201,3796	220,7146	92,4116	216,4758	252,1146	56,0837	186,4018
13	192,1281	53,8522	201,3824	220,7089	92,4396	216,4802	252,1126	56,1192	186,4009
14	192,128	53,8705	201,3798	220,7231	92,4482	216,4755	252,1163	56,1077	186,4095
15	192,1374	53,8402	201,3825	220,72	92,4247	216,4843	252,1226	56,1037	186,4046
16	192,1334	53,8418	201,3865	220,7061	92,4415	216,4681	252,1183	56,1127	186,4078
17	192,1384	53,8507	201,3927	220,7072	92,4507	216,4812	252,1225	56,1318	186,4123
18	192,1413	53,8214	201,3923	220,7092	92,4193	216,4869	252,1239	56,1084	186,4077
19	192,1363	53,8678	201,3835	220,7204	92,453	216,4801	252,1222	56,1256	186,4073
20	192,1371	53,8108	201,398	220,706	92,414	216,4775	252,1195	56,0914	186,4114
21	192,1328	53,8426	201,3929	220,7066	92,4365	216,4872	252,1158	56,121	186,4077
22	192,133	53,858	201,3877	220,7033	92,4543	216,4821	252,1175	56,1379	186,409
23	192,1288	53,8535	201,3804	220,7205	92,4305	216,4842	252,1151	56,103	186,4039
24	192,1327	53,8505	201,3787	220,7212	92,4247	216,4954	252,1195	56,1079	186,4061
25	192,1389	53,8826	201,3833	220,7317	92,465	216,4711	252,1271	56,1199	186,4129
26	192,1354	53,843	201,3882	220,7097	92,4365	216,4824	252,1202	56,1166	186,4096
27	192,1429	53,8279	201,3918	220,7313	92,4066	216,497	252,1293	56,0823	186,4167
28	192,1221	53,8443	201,3784	220,7032	92,4252	216,4917	252,107	56,1153	186,3997
29	192,1327	53,8601	201,3819	220,7201	92,4402	216,4855	252,1172	56,1188	186,4004
30	192,165	53,8359	201,3884	220,7116	92,4485	216,4864	252,1482	56,1538	186,4104



Tableau A X-3 Résultats de mesure temps de chauffe 60 minute

Pièces	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,1309	53,8495	201,3905	220,6985	92,4518	216,4749	252,1164	56,1272	186,4153
2	192,1317	53,8402	201,3771	220,7162	92,4232	216,4792	252,1195	56,096	186,4077
3	192,125	53,8533	201,3779	220,7042	92,4441	216,4701	252,1119	56,1148	186,4059
4	192,1278	53,8626	201,3778	220,7141	92,4432	216,4824	252,1147	56,1183	186,4052
5	192,1236	53,8138	201,3808	220,7041	92,404	216,4714	252,1098	56,0739	186,4058
6	192,1284	53,8162	201,3799	220,707	92,4064	216,4743	252,1151	56,0792	186,4077
7	192,1329	53,8423	201,3761	220,7198	92,4247	216,4749	252,1201	56,094	186,4043
8	192,1379	53,8241	201,3897	220,704	92,4292	216,4698	252,1211	56,1071	186,4067
9	192,1307	53,8295	201,3817	220,7149	92,4141	216,4794	252,1177	56,085	186,4098
10	192,1248	53,8167	201,3818	220,7002	92,408	216,4798	252,1088	56,0919	186,4006
11	192,1358	53,8583	201,3876	220,7089	92,4507	216,4872	252,1203	56,1364	186,4086
12	192,134	53,8472	201,386	220,7129	92,4366	216,4821	252,12	56,112	186,4112
13	192,1253	53,8264	201,383	220,7044	92,4148	216,4814	252,1101	56,0943	186,4043
14	192,1311	53,8371	201,3804	220,7097	92,4229	216,4861	252,1161	56,1084	186,4022
15	192,1344	53,8568	201,3866	220,7147	92,4461	216,4804	252,1183	56,1232	186,4039
16	192,1344	53,8334	201,387	220,7124	92,427	216,4738	252,1214	56,0935	186,4159
17	192,1333	53,8388	201,3793	220,7092	92,4261	216,4863	252,1191	56,1124	186,4053
18	192,1377	53,8292	201,3849	220,7015	92,4339	216,4704	252,1216	56,116	186,4051
19	192,1303	53,8374	201,3838	220,7152	92,4188	216,489	252,1149	56,1007	186,4027
20	192,1291	53,8385	201,3768	220,7064	92,4227	216,4894	252,1135	56,1161	186,397
21	192,1385	53,8434	201,3761	220,7106	92,4352	216,4782	252,1247	56,1198	186,4037
22	192,1347	53,8685	201,3881	220,7136	92,4589	216,4812	252,1207	56,1324	186,4128
23	192,1371	53,8506	201,3855	220,7166	92,4383	216,4853	252,1228	56,1173	186,4095
24	192,1332	53,8188	201,3831	220,7007	92,4163	216,4802	252,1164	56,1065	186,4008
25	192,1311	53,8469	201,3835	220,7085	92,4404	216,4722	252,1178	56,1099	186,411
26	192,133	53,8425	201,3773	220,7122	92,4302	216,4773	252,1182	56,1105	186,3994
27	192,1228	53,8381	201,3975	220,7104	92,4277	216,4772	252,1072	56,0881	186,4138
28	192,1296	53,8285	201,3797	220,7075	92,4158	216,4824	252,1145	56,0995	186,4017
29	192,1363	53,8105	201,3934	220,7066	92,4117	216,4758	252,121	56,085	186,4152
30	192,132	53,8408	201,3937	220,7043	92,4395	216,4789	252,116	56,1156	186,4121

Tableau A X-4 Résultats de mesure temps de chauffe 120 minute

	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
Pièces	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,1306	53,837	201,3813	220,7081	92,427	216,4786	252,1191	56,0992	186,4157
2	192,128	53,8318	201,3851	220,713	92,4213	216,4694	252,1164	56,0779	186,4175
3	192,1274	53,8466	201,3887	220,7057	92,444	216,4656	252,1135	56,1051	186,413
4	192,1303	53,822	201,3851	220,706	92,416	216,4757	252,1191	56,0837	186,4205
5	192,1319	53,8212	201,3935	220,7072	92,4205	216,4715	252,1187	56,0828	186,4212
6	192,1324	53,8188	201,3799	220,7135	92,4107	216,4656	252,1215	56,0699	186,4155
7	192,1255	53,8324	201,3835	220,7087	92,4191	216,4785	252,1142	56,0847	186,418
8	192,1232	53,8179	201,3814	220,7119	92,4049	216,4649	252,113	56,056	186,4173
9	192,1235	53,7986	201,3879	220,7077	92,3892	216,471	252,1123	56,0451	186,4213
10	192,1244	53,8362	201,3802	220,7048	92,4267	216,4706	252,1131	56,0912	186,4143
11	192,1318	53,8485	201,3853	220,7165	92,4376	216,4712	252,1209	56,0943	186,4201
12	192,1298	53,849	201,3861	220,7137	92,441	216,4662	252,1191	56,0938	186,4212
13	192,1266	53,8527	201,3772	220,7177	92,4383	216,4597	252,1174	56,0846	186,4167
14	192,1281	53,8159	201,395	220,7093	92,4094	216,4765	252,1152	56,0696	186,4232
15	192,123	53,8433	201,3811	220,7115	92,4272	216,473	252,1127	56,0851	186,4174
16	192,127	53,8445	201,3917	220,7117	92,436	216,4718	252,1158	56,0895	186,4246
17	192,1267	53,8454	201,3931	220,713	92,433	216,4797	252,116	56,089	186,4283
18	192,1282	53,8427	201,388	220,7132	92,4317	216,4734	252,1172	56,0885	186,4219
19	192,1248	53,8093	201,3831	220,7105	92,3972	216,4702	252,1138	56,0545	186,4175
20	192,131	53,8377	201,3852	220,7054	92,4329	216,4749	252,118	56,1044	186,4144
21	192,1331	53,8228	201,3784	220,7115	92,4174	216,4622	252,1219	56,0778	186,413
22	192,1256	53,8424	201,3899	220,7215	92,4228	216,4764	252,1165	56,0684	186,429
23	192,1288	53,8436	201,382	220,7101	92,4368	216,4635	252,1183	56,0919	186,4186
24	192,1303	53,8533	201,3863	220,7108	92,443	216,4784	252,119	56,1082	186,4211
25	192,1271	53,8499	201,3858	220,708	92,4426	216,4701	252,1155	56,1025	186,4186
26	192,1329	53,843	201,3846	220,7095	92,4369	216,4735	252,1205	56,1049	186,4159
27	192,1261	53,8267	201,3878	220,7146	92,4161	216,4657	252,1157	56,0632	186,4228
28	192,1301	53,8207	201,3854	220,7139	92,4109	216,4705	252,1178	56,0711	186,4147
29	192,1261	53,8388	201,3872	220,7057	92,4293	216,4794	252,1144	56,0967	186,4202
30	192,1298	53,845	201,3861	220,7207	92,4335	216,4612	252,1208	56,0735	186,4262

Tableau A X-5 Résultats de mesure temps de chauffe 180 minute

Pièces	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,1226	53,8047	201,3907	220,7008	92,3955	216,4846	252,1109	56,0648	186,4243
2	192,125	53,8267	201,3781	220,7004	92,4163	216,4803	252,1155	56,0892	186,4209
3	192,1273	53,8439	201,3872	220,7071	92,4323	216,4839	252,1154	56,1034	186,4196
4	192,1226	53,8325	201,3807	220,6985	92,4229	216,4799	252,114	56,0915	186,4261
5	192,1297	53,8272	201,3852	220,7041	92,4192	216,4829	252,1207	56,0886	186,4295
6	192,1255	53,8218	201,3847	220,6965	92,4178	216,4787	252,1157	56,0883	186,4268
7	192,1293	53,8267	201,3814	220,6994	92,4197	216,4844	252,1172	56,1022	186,4163
8	192,121	53,8416	201,3821	220,6981	92,4305	216,4828	252,1101	56,1044	186,419
9	192,1194	53,8337	201,3796	220,6961	92,4224	216,4817	252,1088	56,097	186,4179
10	192,1218	53,8224	201,383	220,7039	92,4122	216,472	252,1137	56,0674	186,4285
11	192,1225	53,8349	201,3818	220,6995	92,4222	216,4868	252,1137	56,0951	186,4266
12	192,1206	53,8399	201,3812	220,7001	92,426	216,4843	252,1113	56,0966	186,4236
13	192,1308	53,8292	201,3757	220,7042	92,418	216,484	252,1206	56,0989	186,4163
14	192,123	53,8321	201,3781	220,7087	92,4135	216,4819	252,1152	56,0767	186,4254
15	192,1277	53,829	201,3762	220,7002	92,4189	216,4827	252,1181	56,0972	186,4199
16	192,1224	53,8261	201,3815	220,7052	92,4085	216,4881	252,1143	56,077	186,428
17	192,1254	53,8319	201,39	220,7038	92,4217	216,4859	252,1165	56,0865	186,4337
18	192,1241	53,8306	201,3796	220,6923	92,4239	216,4863	252,1129	56,1091	186,4178
19	192,1244	53,8402	201,3819	220,7019	92,4292	216,4814	252,1157	56,0972	186,4268
20	192,1192	53,8302	201,3712	220,6972	92,4164	216,4766	252,1107	56,0878	186,4176
21	192,1199	53,8498	201,377	220,6942	92,436	216,4901	252,1109	56,1173	186,4222
22	192,1252	53,8308	201,3804	220,7049	92,419	216,4779	252,1174	56,0812	186,4287
23	192,1268	53,8286	201,3741	220,6987	92,4214	216,475	252,1164	56,0978	186,4142
24	192,1255	53,8263	201,3826	220,7017	92,4167	216,4815	252,116	56,0866	186,4249
25	192,1283	53,8398	201,3745	220,7064	92,4276	216,4762	252,1189	56,0981	186,417
26	192,1268	53,8199	201,3831	220,6965	92,4144	216,4831	252,115	56,0943	186,4187
27	192,1274	53,8401	201,3748	220,7065	92,4261	216,4786	252,1172	56,0991	186,4148
28	192,1297	53,8488	201,3772	220,7103	92,4368	216,474	252,1193	56,104	186,4154
29	192,1267	53,8411	201,377	220,7043	92,4296	216,4779	252,1183	56,098	186,423
30	192,121	53,839	201,3872	220,6977	92,4294	216,485	252,1111	56,0988	186,4283

Tableau A X-6 Ordre des essais, profondeur et position mesurées  
pour analyse de leur effet

Ordre des essais	Profondeur de champs (mm)	Position X (mm)	Position Y (mm)	Nombre de cibles visibles sur 10
1	1958	-1,6	10,8	10
2	2035,1	-395,6	-0,2	10
3	1973	367,8	8,2	9
4	2010,9	-4,6	-405,6	10
5	2007,5	4,7	399	10
6	2500	-17,6	-9,5	10
7	2526,2	-440,7	-15,6	10
8	2512,5	398,4	2,3	10
9	2517,2	2,8	-405,5	10
10	2465,6	-28,2	403	10
11	3003	32,4	13,5	10
12	2991	-430	-3,9	10
13	2990,3	416,2	20,7	10
14	3002,6	11,5	-404,5	10
15	3009,2	-11,8	417,1	10
16	3748,5	10,1	11,1	10
17	3782	-392,5	-4,4	10
18	3730	432,9	18,2	10
19	3756,8	-42,2	-420	10
20	3726,7	-11,8	413,6	10
21	4004	-19,9	7,5	6
22	4015,2	-406,6	-4,3	6
23	3967,9	437,4	18,2	6
24	3994,6	-37,3	-420	6
25	4014	10,5	419	5

Tableau A X-7 Essai 1

	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
Pièces	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,1333	53,844	201,3879	220,7168	92,4326	216,4772	252,1227	56,0922	186,4243
2	192,1308	53,8132	201,3731	220,7086	92,4006	216,4767	252,1203	56,0753	186,4116
3	192,126	53,8154	201,3877	220,7001	92,4084	216,4839	252,1136	56,0837	186,42
4	192,1255	53,8512	201,3792	220,6992	92,4436	216,4773	252,1136	56,12	186,4132
5	192,1219	53,8474	201,3865	220,7148	92,4298	216,4738	252,1123	56,0793	186,4245
6	192,1165	53,8316	201,3759	220,6932	92,4174	216,4851	252,1051	56,099	186,4121
7	192,124	53,8317	201,3848	220,7125	92,4129	216,4834	252,1141	56,0752	186,4229
8	192,1213	53,8388	201,3803	220,6996	92,4273	216,4801	252,109	56,1027	186,4119
9	192,1249	53,836	201,382	220,6964	92,4291	216,4824	252,1129	56,1091	186,4161
10	192,1118	53,8303	201,3725	220,6986	92,4123	216,4722	252,1009	56,0788	186,4073
11	192,1235	53,8366	201,382	220,7021	92,4236	216,4846	252,1112	56,1009	186,4138
12	192,1236	53,8447	201,3806	220,7044	92,4293	216,4852	252,1137	56,1014	186,4208
13	192,1182	53,8127	201,3846	220,6977	92,4011	216,4822	252,1066	56,0726	186,4182
14	192,1229	53,8147	201,3818	220,6931	92,4071	216,4866	252,1094	56,0944	186,411
15	192,1211	53,8293	201,3732	220,6916	92,4209	216,4796	252,108	56,108	186,4046
16	192,1232	53,8192	201,3756	220,6942	92,414	216,4726	252,1119	56,0896	186,4128
17	192,1196	53,8221	201,38	220,6921	92,4168	216,4748	252,1075	56,0917	186,4132
18	192,1299	53,8232	201,3761	220,7047	92,4133	216,4783	252,1184	56,0913	186,4115
19	192,1267	53,8017	201,3774	220,6934	92,4011	216,4709	252,1134	56,0818	186,4072
20	192,1218	53,8606	201,3792	220,6928	92,4548	216,4782	252,1093	56,1348	186,4116
21	192,1302	53,8102	201,3905	220,6937	92,4123	216,4828	252,1173	56,0929	186,423
22	192,1182	53,8444	201,384	220,7007	92,4281	216,4879	252,1077	56,1	186,4214
23	192,1174	53,8659	201,3616	220,705	92,4468	216,463	252,1069	56,113	186,3977
24	192,1206	53,8121	201,3827	220,6968	92,401	216,4852	252,1083	56,0796	186,4154
25	192,1163	53,8216	201,3697	220,6905	92,4122	216,4714	252,1049	56,0898	186,4055
26	192,1222	53,8155	201,381	220,6974	92,4046	216,4845	252,1105	56,0832	186,4163
27	192,1174	53,8153	201,3784	220,6868	92,4101	216,4789	252,1043	56,0939	186,4089
28	192,1344	53,8288	201,3836	220,7107	92,42	216,4797	252,1232	56,0916	186,4192
29	192,1146	53,8545	201,3878	220,695	92,4418	216,4864	252,1026	56,1144	186,4198
30	192,1211	53,8135	201,3891	220,6992	92,4061	216,4784	252,11	56,0704	186,425

Tableau A X-8 Essai 2

	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
Pièces	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,1365	53,7875	201,3752	220,6958	92,3905	216,4736	252,12	56,0869	186,3952
2	192,1326	53,7938	201,3779	220,6874	92,4028	216,469	252,1148	56,0994	186,394
3	192,1302	53,7885	201,3703	220,6989	92,3781	216,4851	252,1135	56,0807	186,3893
4	192,1323	53,7704	201,3804	220,6984	92,3684	216,4786	252,1161	56,0593	186,4004
5	192,1261	53,7941	201,3707	220,7064	92,3763	216,4827	252,1109	56,0659	186,3921
6	192,1332	53,7644	201,3765	220,6974	92,3618	216,4794	252,1172	56,0569	186,3982
7	192,1315	53,786	201,3672	220,7038	92,3756	216,4754	252,1163	56,0679	186,3899
8	192,1311	53,7823	201,3726	220,7005	92,3753	216,4768	252,116	56,0661	186,3964
9	192,1354	53,7677	201,3663	220,7138	92,3514	216,478	252,1207	56,0412	186,3896
10	192,1218	53,8121	201,3753	220,6915	92,4049	216,4798	252,1078	56,0931	186,4034
11	192,1404	53,7741	201,3763	220,7013	92,3741	216,4795	252,1256	56,0696	186,4026
12	192,1344	53,7727	201,3739	220,6935	92,3738	216,477	252,1176	56,0745	186,3936
13	192,1342	53,7918	201,3741	220,7006	92,3859	216,4818	252,1181	56,0837	186,3949
14	192,1356	53,8128	201,3703	220,7038	92,4026	216,4858	252,1202	56,1039	186,3934
15	192,1373	53,7691	201,3761	220,6934	92,3754	216,4724	252,1216	56,0706	186,3998
16	192,1313	53,7785	201,3817	220,7008	92,3691	216,4927	252,1164	56,0648	186,4063
17	192,1387	53,7741	201,3703	220,7026	92,3659	216,4888	252,121	56,0777	186,386
18	192,1353	53,7856	201,3786	220,6952	92,3819	216,4932	252,1174	56,0934	186,3946
19	192,1355	53,7561	201,3774	220,7023	92,3499	216,4855	252,1201	56,0463	186,4005
20	192,133	53,7775	201,3675	220,7021	92,372	216,4687	252,1185	56,0593	186,3934
21	192,1361	53,7747	201,3717	220,7247	92,3548	216,4728	252,1243	56,0225	186,4036
22	192,1406	53,7606	201,3721	220,7072	92,3536	216,4824	252,124	56,0546	186,3909
23	192,1357	53,7842	201,3698	220,7137	92,3691	216,4787	252,1216	56,0552	186,3959
24	192,1389	53,768	201,374	220,7132	92,3584	216,476	252,1256	56,0401	186,4032
25	192,1364	53,7981	201,3816	220,6971	92,3976	216,4864	252,1196	56,0986	186,4008
26	192,1357	53,798	201,373	220,7006	92,3924	216,4829	252,119	56,0943	186,3919
27	192,1371	53,7696	201,3762	220,6949	92,3708	216,4823	252,121	56,0732	186,399
28	192,1323	53,7768	201,3777	220,7007	92,3719	216,4789	252,1171	56,0615	186,4008
29	192,1269	53,8055	201,3646	220,7263	92,3682	216,4902	252,1152	56,0479	186,3953
30	192,1279	53,799	201,3759	220,7	92,3891	216,483	252,1114	56,0833	186,3941

Tableau A X-9 Essai 3

Pièces	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,1377	53,5893	201,3681	220,7291	92,1519	216,5088	252,1267	55,8473	186,4039
2	192,1433	53,5897	201,357	220,7257	92,1535	216,5119	252,1314	55,868	186,3922
3	192,1421	53,6152	201,3558	220,732	92,1734	216,5109	252,1316	55,8803	186,3942
4	192,1442	53,6127	201,3553	220,7333	92,1712	216,5109	252,1347	55,8761	186,3986
5	192,1392	53,6041	201,3665	220,7281	92,167	216,5114	252,1273	55,8695	186,3996
6	192,1409	53,5973	201,3552	220,73	92,1544	216,5146	252,1301	55,8655	186,3935
7	192,1432	53,6084	201,3581	220,734	92,1656	216,5138	252,132	55,8737	186,3943
8	192,1329	53,5983	201,3611	220,7244	92,1572	216,5113	252,1231	55,8573	186,4019
9	192,1444	53,6016	201,3626	220,7365	92,1595	216,5141	252,1343	55,8609	186,4023
10	192,1342	53,6017	201,3579	220,7317	92,1556	216,509	252,125	55,8511	186,3997
11	192,1498	53,5984	201,3639	220,7369	92,1615	216,5118	252,1382	55,8666	186,3991
12	192,1488	53,5962	201,3671	220,7313	92,1645	216,5106	252,1376	55,8687	186,4041
13	192,135	53,5888	201,3644	220,7296	92,1446	216,5167	252,1255	55,8434	186,406
14	192,1446	53,6055	201,3634	220,7312	92,1676	216,5148	252,134	55,8738	186,4023
15	192,1388	53,6075	201,3637	220,7328	92,1658	216,5106	252,1281	55,8636	186,4005
16	192,1506	53,6127	201,3709	220,7323	92,1788	216,521	252,1398	55,8878	186,41
17	192,1334	53,5985	201,3598	220,7207	92,1586	216,5148	252,1235	55,8656	186,4015
18	192,1424	53,5818	201,3634	220,7309	92,1414	216,5168	252,1318	55,8476	186,4025
19	192,1379	53,5955	201,3508	220,735	92,1467	216,5097	252,1288	55,8484	186,3935
20	192,1427	53,5931	201,3694	220,7323	92,1562	216,5125	252,1323	55,853	186,4084
21	192,1371	53,5969	201,3569	220,734	92,1496	216,5123	252,1284	55,8478	186,4009
22	192,1338	53,6031	201,3707	220,7335	92,1607	216,5084	252,1244	55,8442	186,4112
23	192,1448	53,5902	201,3602	220,724	92,1568	216,514	252,1322	55,8741	186,3938
24	192,1384	53,6189	201,3551	220,7309	92,1725	216,5171	252,1289	55,8807	186,3974
25	192,1434	53,6249	201,3573	220,7454	92,1739	216,5126	252,1342	55,8694	186,3984
26	192,1332	53,5962	201,3595	220,7303	92,149	216,5144	252,124	55,8475	186,4016
27	192,138	53,5959	201,3695	220,7192	92,1643	216,5152	252,1259	55,873	186,4038
28	192,1415	53,5947	201,359	220,7346	92,152	216,5102	252,1317	55,8519	186,3994
29	192,1348	53,6125	201,3654	220,7297	92,1697	216,5133	252,125	55,8654	186,4057
30	192,1302	53,6138	201,3536	220,7317	92,1598	216,5176	252,1215	55,8613	186,3972

Tableau A X-10 Essai 4

	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
Pièces	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,132	53,8876	201,3965	220,7174	92,4667	216,5073	252,1189	56,1474	186,4242
2	192,113	53,8554	201,3803	220,705	92,4284	216,4934	252,1	56,1062	186,4073
3	192,1233	53,8561	201,3845	220,7041	92,4388	216,4942	252,1095	56,1229	186,4111
4	192,1145	53,843	201,3877	220,6907	92,4302	216,4951	252,1002	56,1176	186,4123
5	192,1204	53,8648	201,3894	220,71	92,4384	216,5055	252,1082	56,1179	186,4203
6	192,1205	53,8617	201,3796	220,7102	92,4396	216,4849	252,1074	56,1131	186,406
7	192,1236	53,8786	201,39	220,7112	92,4543	216,5045	252,1109	56,1357	186,4187
8	192,1175	53,8394	201,3786	220,7086	92,4122	216,4943	252,1047	56,0921	186,4066
9	192,1182	53,8664	201,3851	220,7116	92,4414	216,4905	252,1055	56,1113	186,4128
10	192,126	53,8508	201,3889	220,7039	92,4402	216,4866	252,1119	56,1181	186,4139
11	192,1161	53,8421	201,3838	220,7015	92,4222	216,4912	252,1023	56,1017	186,409
12	192,1264	53,8611	201,3847	220,7114	92,4404	216,495	252,1137	56,1204	186,4139
13	192,1162	53,8586	201,3866	220,7029	92,4336	216,5048	252,103	56,1197	186,414
14	192,1123	53,8499	201,3805	220,7049	92,421	216,4976	252,0991	56,1021	186,4065
15	192,1262	53,8607	201,392	220,711	92,4419	216,4984	252,1121	56,1214	186,4163
16	192,1324	53,8959	201,38	220,7199	92,4702	216,4987	252,1204	56,1533	186,4117
17	192,1197	53,8602	201,3838	220,7064	92,4366	216,4984	252,1077	56,117	186,4156
18	192,1157	53,8828	201,3969	220,7122	92,4553	216,503	252,1026	56,1248	186,4219
19	192,1201	53,8518	201,3882	220,7035	92,4337	216,4948	252,1064	56,1139	186,414
20	192,1182	53,8746	201,3893	220,7082	92,4507	216,499	252,1052	56,1272	186,4161
21	192,1169	53,871	201,3842	220,7124	92,4414	216,4976	252,1034	56,118	186,4084
22	192,1232	53,8492	201,3863	220,7009	92,4362	216,4907	252,1094	56,1186	186,4127
23	192,1152	53,87	201,3911	220,7074	92,4455	216,4974	252,102	56,1184	186,4167
24	192,1154	53,8728	201,3907	220,706	92,4475	216,5023	252,1026	56,1248	186,4182
25	192,1111	53,8585	201,3907	220,6955	92,4422	216,4904	252,0978	56,1153	186,4175
26	192,1136	53,8566	201,3859	220,708	92,4293	216,495	252,0991	56,1058	186,4064
27	192,1236	53,8539	201,3885	220,7092	92,434	216,4954	252,1091	56,1145	186,4109
28	192,1138	53,8904	201,3881	220,7006	92,469	216,4967	252,1012	56,1456	186,4178
29	192,1195	53,8391	201,3798	220,7038	92,4194	216,4891	252,1053	56,102	186,4038
30	192,1153	53,8554	201,3847	220,7059	92,4286	216,5003	252,1029	56,1081	186,4141



Tableau A X-11 Essai 5

Pièces	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,1336	53,8549	201,3799	220,7027	92,4518	216,4754	252,1203	56,1323	186,4096
2	192,1333	53,8891	201,3548	220,7139	92,4689	216,4724	252,1236	56,1509	186,3963
3	192,1329	53,8375	201,3802	220,7123	92,4291	216,4698	252,1217	56,0932	186,415
4	192,1347	53,8544	201,3768	220,6993	92,4524	216,4775	252,1191	56,1448	186,3995
5	192,1348	53,8409	201,3741	220,6996	92,4327	216,4908	252,1199	56,1362	186,4001
6	192,133	53,8489	201,3719	220,6943	92,451	216,4686	252,1175	56,142	186,3959
7	192,1337	53,7727	201,3929	220,6888	92,3798	216,4886	252,1185	56,0737	186,419
8	192,1348	53,8439	201,3829	220,6924	92,4513	216,4733	252,1169	56,1458	186,3976
9	192,1384	53,8338	201,3819	220,7043	92,433	216,4778	252,124	56,1184	186,4083
10	192,1395	53,8229	201,384	220,7025	92,4226	216,4835	252,125	56,1127	186,4113
11	192,1378	53,8697	201,369	220,7085	92,4629	216,4711	252,1247	56,1471	186,3991
12	192,1347	53,8335	201,3755	220,7048	92,4297	216,4711	252,1225	56,1072	186,4089
13	192,1357	53,8825	201,3673	220,7061	92,4765	216,4676	252,1222	56,1599	186,3968
14	192,1269	53,8377	201,3751	220,6979	92,4341	216,4685	252,1133	56,1121	186,4032
15	192,1352	53,8196	201,3839	220,7	92,421	216,4758	252,1197	56,1061	186,4065
16	192,1324	53,8568	201,3672	220,7091	92,4424	216,477	252,1206	56,1251	186,402
17	192,1295	53,8435	201,38	220,7072	92,4373	216,467	252,1169	56,1035	186,4103
18	192,1297	53,8303	201,3973	220,6906	92,4344	216,4901	252,1124	56,1271	186,4138
19	192,135	53,8419	201,3812	220,7022	92,4386	216,4805	252,1206	56,1259	186,4073
20	192,1426	53,7887	201,3857	220,6956	92,3983	216,4793	252,1248	56,0978	186,4026
21	192,1341	53,8168	201,3737	220,7039	92,4109	216,4752	252,1192	56,0991	186,3977
22	192,1332	53,822	201,3869	220,7103	92,4145	216,4778	252,1217	56,0819	186,4212
23	192,1416	53,8351	201,3783	220,7021	92,4349	216,4828	252,125	56,1352	186,3983
24	192,1384	53,8209	201,3805	220,7027	92,423	216,4717	252,1248	56,104	186,4096
25	192,1361	53,8566	201,3756	220,715	92,4407	216,4851	252,1251	56,1203	186,4126
26	192,1317	53,8481	201,3679	220,7108	92,4338	216,4729	252,1206	56,11	186,404
27	192,1344	53,8755	201,3766	220,7052	92,4673	216,4816	252,121	56,1545	186,4058
28	192,1315	53,8496	201,3783	220,6993	92,4512	216,4645	252,116	56,13	186,3995
29	192,1322	53,8446	201,3735	220,703	92,4403	216,4687	252,1182	56,1211	186,4
30	192,1383	53,8605	201,3738	220,7113	92,4537	216,4715	252,1263	56,1305	186,4073

Tableau A X-12 Essai 6

	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
Pièces	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,127	53,8686	201,3919	220,7021	92,4569	216,4978	252,1129	56,143	186,4178
2	192,1279	53,8853	201,3804	220,7007	92,4707	216,4982	252,115	56,1648	186,4126
3	192,1286	53,8952	201,3895	220,7036	92,4807	216,5025	252,1155	56,1704	186,4196
4	192,1358	53,8939	201,3813	220,6879	92,4942	216,5003	252,12	56,2099	186,407
5	192,1338	53,8865	201,3778	220,7004	92,4717	216,5079	252,1195	56,1832	186,4062
6	192,1211	53,8839	201,3919	220,689	92,4758	216,5027	252,105	56,1753	186,4121
7	192,1317	53,9069	201,3804	220,7057	92,4886	216,5056	252,1184	56,1887	186,4109
8	192,1317	53,9333	201,396	220,7112	92,5167	216,5061	252,1184	56,201	186,4248
9	192,1271	53,8892	201,3833	220,7003	92,4707	216,5099	252,114	56,1721	186,4146
10	192,1244	53,8703	201,3751	220,6957	92,4584	216,4884	252,111	56,151	186,4054
11	192,1332	53,8786	201,3835	220,6905	92,4695	216,5166	252,117	56,1934	186,4075
12	192,1345	53,8912	201,3966	220,6943	92,4853	216,5174	252,1191	56,1965	186,4219
13	192,1248	53,8983	201,3808	220,6981	92,4853	216,4936	252,1112	56,1767	186,4098
14	192,1141	53,8813	201,3831	220,7078	92,4554	216,4903	252,1033	56,1227	186,4173
15	192,1335	53,9082	201,3896	220,7009	92,495	216,5135	252,1168	56,2058	186,4092
16	192,1266	53,8763	201,3913	220,6932	92,4744	216,4885	252,1115	56,1617	186,4151
17	192,1237	53,8836	201,3993	220,7051	92,4657	216,5095	252,1103	56,1492	186,4268
18	192,1361	53,8992	201,3825	220,7104	92,4865	216,4924	252,1227	56,1747	186,4114
19	192,131	53,9332	201,3748	220,7081	92,5072	216,5137	252,119	56,2132	186,41
20	192,1269	53,8946	201,395	220,6943	92,483	216,5155	252,1124	56,1868	186,422
21	192,1266	53,8787	201,3927	220,6956	92,4739	216,4924	252,1125	56,1592	186,42
22	192,1319	53,8789	201,3984	220,7076	92,4711	216,4935	252,1184	56,1466	186,4264
23	192,1281	53,8926	201,375	220,7116	92,4683	216,4971	252,117	56,1549	186,4112
24	192,1347	53,8992	201,3824	220,7202	92,4778	216,4934	252,1231	56,1551	186,4159
25	192,1231	53,8939	201,3798	220,6938	92,4772	216,5068	252,1082	56,1844	186,4054
26	192,1227	53,8783	201,3774	220,7085	92,4491	216,5082	252,1109	56,142	186,4116
27	192,1337	53,8946	201,3789	220,6962	92,4865	216,4999	252,1183	56,1955	186,4043
28	192,1233	53,8894	201,3897	220,6945	92,481	216,4944	252,1104	56,1665	186,4208
29	192,1337	53,8678	201,3895	220,6979	92,4619	216,5015	252,1198	56,1599	186,4189
30	192,1331	53,8982	201,3772	220,7035	92,488	216,4881	252,1196	56,1797	186,4071

Tableau A X-13 Essai 7

Pièces	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,1109	53,8629	201,3823	220,6801	92,4564	216,4864	252,0926	56,1545	186,3939
2	192,1144	53,868	201,3742	220,6876	92,4541	216,4896	252,0966	56,157	186,3876
3	192,1303	53,8238	201,3817	220,698	92,4195	216,483	252,1131	56,1137	186,3979
4	192,1178	53,8467	201,3882	220,6942	92,439	216,4814	252,103	56,116	186,4105
5	192,138	53,8362	201,373	220,7038	92,433	216,4748	252,1216	56,1273	186,3925
6	192,1294	53,8026	201,3749	220,7022	92,3923	216,4814	252,1103	56,0915	186,3831
7	192,1348	53,8335	201,3881	220,692	92,4383	216,4858	252,1149	56,1429	186,3965
8	192,1242	53,8524	201,3731	220,7055	92,4348	216,4828	252,1092	56,1217	186,3947
9	192,1144	53,851	201,3715	220,6979	92,4336	216,4762	252,0978	56,1184	186,3867
10	192,1284	53,8056	201,3991	220,6839	92,4181	216,4806	252,1101	56,108	186,4123
11	192,1281	53,8451	201,3824	220,697	92,4359	216,4934	252,1102	56,1383	186,3967
12	192,1315	53,8093	201,3774	220,6867	92,4116	216,4851	252,1106	56,1272	186,3833
13	192,1233	53,8356	201,375	220,6851	92,4384	216,4692	252,1054	56,1326	186,3896
14	192,1305	53,8178	201,3778	220,7165	92,3966	216,4875	252,1167	56,0775	186,4029
15	192,1152	53,866	201,3948	220,7163	92,435	216,501	252,1033	56,0988	186,423
16	192,1285	53,8444	201,3981	220,6987	92,4436	216,4855	252,1115	56,1248	186,4137
17	192,1307	53,8118	201,3892	220,6957	92,4102	216,4888	252,112	56,1085	186,4
18	192,1417	53,814	201,3827	220,7275	92,3915	216,4962	252,1281	56,0751	186,4087
19	192,1307	53,8002	201,3947	220,6978	92,399	216,489	252,112	56,0918	186,4049
20	192,1348	53,7938	201,3844	220,7065	92,3892	216,479	252,1185	56,0742	186,4019
21	192,1343	53,8048	201,3915	220,6945	92,416	216,4674	252,1181	56,0937	186,4112
22	192,1214	53,8342	201,3835	220,7007	92,4239	216,4778	252,1044	56,1047	186,3971
23	192,1228	53,833	201,3891	220,7002	92,427	216,4761	252,1056	56,1035	186,4022
24	192,1246	53,8168	201,3844	220,6835	92,4226	216,4765	252,1063	56,1184	186,3975
25	192,1192	53,8442	201,3898	220,7081	92,4299	216,4765	252,106	56,0899	186,4147
26	192,1317	53,8829	201,4	220,7183	92,4656	216,4986	252,1155	56,1427	186,4155
27	192,1228	53,8331	201,3901	220,7146	92,4131	216,4858	252,107	56,0832	186,4061
28	192,1322	53,8058	201,3877	220,7025	92,3971	216,4959	252,1136	56,0982	186,3983
29	192,1263	53,8167	201,3803	220,699	92,4028	216,4963	252,1086	56,1064	186,3943
30	192,1188	53,8356	201,3869	220,6836	92,4373	216,478	252,101	56,1271	186,4005

Tableau A X-14 Essai 8

	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
Pièces	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,1267	53,8567	201,3966	220,706	92,4473	216,4886	252,1138	56,1173	186,4252
2	192,1296	53,8191	201,3881	220,6856	92,4204	216,4974	252,114	56,1257	186,413
3	192,1286	53,8545	201,4011	220,7083	92,4445	216,4941	252,1144	56,1177	186,425
4	192,1327	53,7977	201,4027	220,6792	92,4145	216,4899	252,1152	56,1131	186,4215
5	192,1224	53,8624	201,3902	220,7121	92,4453	216,4827	252,1101	56,1072	186,4189
6	192,125	53,8686	201,3763	220,6995	92,4512	216,4979	252,1115	56,149	186,4052
7	192,1263	53,8502	201,388	220,7048	92,4378	216,4892	252,1143	56,1136	186,4206
8	192,1236	53,8217	201,3977	220,7049	92,4076	216,4983	252,1106	56,0827	186,4266
9	192,1348	53,8497	201,3917	220,7098	92,438	216,498	252,1221	56,1217	186,423
10	192,125	53,8667	201,4004	220,7129	92,4512	216,4918	252,1132	56,1124	186,4312
11	192,1318	53,8906	201,3799	220,7202	92,4663	216,4933	252,1205	56,1431	186,4136
12	192,1236	53,837	201,3713	220,712	92,4157	216,4767	252,1127	56,0849	186,4067
13	192,1167	53,8481	201,3918	220,7121	92,4259	216,4859	252,1049	56,0839	186,4212
14	192,1252	53,8799	201,376	220,6896	92,4669	216,5059	252,1122	56,1765	186,41
15	192,1357	53,8072	201,3915	220,6878	92,4133	216,4953	252,1195	56,1182	186,4147
16	192,1198	53,8613	201,3945	220,708	92,4431	216,4922	252,1074	56,1105	186,4233
17	192,1225	53,8248	201,3912	220,6946	92,4174	216,4924	252,1083	56,1023	186,4172
18	192,1392	53,8516	201,3947	220,7198	92,4414	216,4866	252,1262	56,1106	186,4227
19	192,1338	53,8662	201,3895	220,7032	92,4558	216,5032	252,12	56,1515	186,4181
20	192,1174	53,8038	201,3953	220,6873	92,406	216,4759	252,1031	56,0767	186,42
21	192,1384	53,8603	201,3801	220,7071	92,4512	216,4918	252,1245	56,1457	186,4088
22	192,1272	53,8395	201,3923	220,7035	92,4307	216,4887	252,1152	56,104	186,425
23	192,1105	53,8339	201,3838	220,7017	92,4124	216,4845	252,0998	56,0759	186,4191
24	192,1237	53,8471	201,3987	220,7259	92,4178	216,4987	252,1131	56,0733	186,4313
25	192,1348	53,8467	201,3853	220,7047	92,4433	216,4799	252,1209	56,1243	186,4119
26	192,135	53,8024	201,3903	220,7053	92,3928	216,5003	252,1216	56,084	186,4199
27	192,1273	53,8208	201,3954	220,7029	92,4143	216,4868	252,1135	56,0879	186,4221
28	192,1319	53,8747	201,3931	220,7161	92,459	216,4919	252,1195	56,1298	186,4228
29	192,1277	53,8378	201,3935	220,7059	92,4252	216,4957	252,1163	56,1005	186,4284
30	192,1332	53,8391	201,3932	220,7158	92,4249	216,4912	252,12	56,0979	186,4204

Tableau A X-15 Essai 9

Pièces	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,1226	53,8695	201,387	220,7118	92,4506	216,4845	252,1105	56,1164	186,4167
2	192,1226	53,8865	201,3851	220,6919	92,4745	216,5028	252,107	56,1767	186,408
3	192,1274	53,8649	201,3887	220,6982	92,454	216,5009	252,1137	56,1471	186,4176
4	192,1311	53,8836	201,3865	220,6896	92,4812	216,5	252,1158	56,1875	186,412
5	192,1282	53,8731	201,3811	220,6976	92,4634	216,4926	252,1146	56,1565	186,4109
6	192,131	53,8875	201,3838	220,6966	92,4771	216,5048	252,1167	56,1821	186,4119
7	192,1285	53,883	201,3899	220,7068	92,4709	216,491	252,1151	56,1496	186,4176
8	192,1256	53,8849	201,393	220,6905	92,4816	216,4966	252,1118	56,172	186,4228
9	192,124	53,8745	201,3891	220,6909	92,4654	216,5039	252,1096	56,165	186,4161
10	192,1223	53,8922	201,3811	220,6951	92,4754	216,5048	252,109	56,1748	186,4122
11	192,1236	53,8907	201,387	220,7052	92,4735	216,4951	252,1103	56,1552	186,4146
12	192,1225	53,8821	201,3858	220,692	92,4739	216,4936	252,1081	56,1664	186,4119
13	192,1287	53,894	201,3878	220,695	92,4819	216,512	252,1144	56,1888	186,416
14	192,1277	53,8817	201,3852	220,702	92,4708	216,4903	252,1144	56,1553	186,414
15	192,1215	53,9141	201,3972	220,6934	92,5004	216,5145	252,1083	56,1958	186,4277
16	192,1267	53,8742	201,391	220,6996	92,4618	216,5036	252,1131	56,1536	186,4198
17	192,1281	53,8886	201,3928	220,7054	92,4792	216,489	252,1141	56,1558	186,4186
18	192,1294	53,8777	201,3833	220,702	92,4627	216,5025	252,1151	56,161	186,4105
19	192,125	53,8816	201,3958	220,6987	92,4729	216,4965	252,1105	56,1565	186,4209
20	192,1248	53,8845	201,3926	220,6941	92,474	216,5065	252,1116	56,1687	186,4234
21	192,1224	53,8716	201,3959	220,6922	92,4632	216,5036	252,109	56,1529	186,4258
22	192,1286	53,8871	201,3822	220,7048	92,4694	216,5018	252,1156	56,163	186,4131
23	192,1298	53,8978	201,3947	220,7153	92,4776	216,5029	252,1163	56,1572	186,4207
24	192,1246	53,9186	201,389	220,6999	92,5008	216,5109	252,1115	56,197	186,4197
25	192,1296	53,9183	201,3875	220,7006	92,501	216,5162	252,1142	56,2107	186,4108
26	192,1209	53,8826	201,3812	220,6926	92,471	216,4936	252,1076	56,163	186,4111
27	192,1315	53,8767	201,3885	220,7093	92,4568	216,5105	252,1178	56,1529	186,4164
28	192,1292	53,8762	201,3894	220,7009	92,461	216,5108	252,116	56,1594	186,4207
29	192,1271	53,8776	201,384	220,7039	92,4593	216,5038	252,1137	56,1535	186,4133
30	192,128	53,8852	201,3796	220,7078	92,4653	216,4978	252,1152	56,1552	186,4101

Tableau A X-16 Essai 10

	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
Pièces	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,1316	53,8469	201,3841	220,7077	92,4429	216,4686	252,1155	56,1161	186,4012
2	192,132	53,8434	201,3788	220,7056	92,4339	216,482	252,1158	56,1234	186,3977
3	192,1282	53,8439	201,3887	220,6997	92,4419	216,477	252,1105	56,1246	186,4013
4	192,1223	53,8461	201,3856	220,6986	92,441	216,4726	252,1071	56,1141	186,4062
5	192,1294	53,8517	201,3898	220,7104	92,4402	216,4839	252,1149	56,1137	186,4127
6	192,119	53,8689	201,3875	220,6988	92,4616	216,4731	252,1028	56,1335	186,4035
7	192,13	53,8332	201,3885	220,6943	92,4372	216,475	252,1123	56,1236	186,4023
8	192,1309	53,8582	201,3919	220,6961	92,4639	216,4724	252,1109	56,1495	186,3974
9	192,1403	53,8108	201,3971	220,702	92,4199	216,4752	252,1209	56,1053	186,4048
10	192,128	53,8588	201,3896	220,6931	92,463	216,4742	252,1106	56,1468	186,4043
11	192,1248	53,8648	201,3809	220,6967	92,4606	216,4736	252,1077	56,1454	186,3957
12	192,1301	53,8507	201,3906	220,7078	92,4457	216,4752	252,1147	56,1163	186,4102
13	192,1264	53,8512	201,3836	220,7014	92,4424	216,4826	252,1089	56,1304	186,397
14	192,1267	53,8408	201,3986	220,6894	92,4482	216,4794	252,1084	56,1325	186,4103
15	192,1279	53,8483	201,3841	220,7056	92,4377	216,4828	252,1138	56,1166	186,409
16	192,1228	53,9054	201,3746	220,7049	92,4894	216,4781	252,108	56,1706	186,3962
17	192,1257	53,8514	201,371	220,7045	92,4358	216,4803	252,1097	56,1263	186,3895
18	192,128	53,8186	201,3913	220,6966	92,4257	216,4617	252,1114	56,0943	186,4075
19	192,1278	53,8154	201,3953	220,6933	92,4173	216,4852	252,1088	56,1085	186,4043
20	192,1245	53,8706	201,3795	220,7081	92,4491	216,4949	252,1106	56,1363	186,405
21	192,1327	53,8398	201,3746	220,7089	92,4295	216,4749	252,1167	56,1148	186,3931
22	192,1283	53,8734	201,378	220,7041	92,4599	216,4871	252,1108	56,1559	186,3913
23	192,1266	53,8445	201,3804	220,7096	92,4315	216,4749	252,112	56,1044	186,4022
24	192,1316	53,8469	201,3843	220,7075	92,4395	216,4781	252,1159	56,1194	186,4035
25	192,1288	53,8877	201,3847	220,6999	92,4861	216,4723	252,1127	56,1654	186,4029
26	192,1181	53,8587	201,3848	220,698	92,452	216,4694	252,1025	56,1218	186,4029
27	192,1299	53,847	201,3877	220,7018	92,4445	216,4765	252,1114	56,1293	186,3973
28	192,1389	53,8305	201,3957	220,6893	92,4511	216,4657	252,116	56,145	186,3932
29	192,1335	53,8572	201,3726	220,7013	92,453	216,4734	252,1151	56,1496	186,3841
30	192,1393	53,8482	201,3946	220,709	92,4484	216,4803	252,1203	56,1333	186,4025

Tableau A X-17 Essai 11

Pièces	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,122	53,9332	201,3531	220,7019	92,4935	216,5216	252,1089	56,2231	186,3855
2	192,1063	53,8845	201,377	220,7259	92,4306	216,5068	252,0984	56,0912	186,4179
3	192,1154	53,9304	201,3687	220,6892	92,5108	216,4977	252,0991	56,2206	186,3883
4	192,1096	53,9278	201,3931	220,7132	92,4919	216,507	252,0986	56,1575	186,4254
5	192,1242	53,8853	201,362	220,6938	92,4602	216,5128	252,1078	56,1901	186,3837
6	192,1079	53,9674	201,3549	220,6921	92,5352	216,496	252,0974	56,2344	186,3948
7	192,1208	53,9403	201,3674	220,7035	92,5146	216,495	252,1061	56,2135	186,3912
8	192,1213	53,9433	201,3755	220,7113	92,5074	216,5155	252,1083	56,2076	186,4042
9	192,1202	53,875	201,3626	220,7174	92,4343	216,5009	252,1078	56,1266	186,3925
10	192,1205	53,8882	201,3664	220,7222	92,4454	216,5019	252,1121	56,1241	186,4092
11	192,1236	53,8784	201,3749	220,7061	92,4538	216,5001	252,1103	56,1485	186,4032
12	192,1201	53,8969	201,3744	220,6893	92,481	216,5022	252,1054	56,1892	186,4014
13	192,1139	53,8543	201,365	220,7	92,4252	216,4946	252,1002	56,1211	186,3919
14	192,1215	53,9002	201,3647	220,6974	92,4754	216,5029	252,1076	56,186	186,393
15	192,1128	53,9032	201,3757	220,7145	92,466	216,4965	252,1018	56,1388	186,4081
16	192,1069	53,9655	201,357	220,6931	92,5243	216,5173	252,0937	56,2435	186,3869
17	192,1075	53,9811	201,3683	220,7148	92,5395	216,49	252,0969	56,2081	186,4013
18	192,1273	53,9121	201,3829	220,6934	92,5029	216,4998	252,1123	56,2057	186,4081
19	192,1167	53,9371	201,3831	220,6996	92,5155	216,4996	252,1024	56,2047	186,4077
20	192,1209	53,9039	201,3713	220,7127	92,4718	216,4979	252,1107	56,1544	186,4089
21	192,1154	53,8983	201,3639	220,7098	92,4611	216,499	252,1031	56,1532	186,3938
22	192,1143	53,8617	201,3757	220,7279	92,4161	216,4952	252,1068	56,0721	186,4186
23	192,1103	53,9188	201,3835	220,6996	92,4846	216,52	252,0976	56,1821	186,4131
24	192,1204	53,9265	201,3719	220,7342	92,4764	216,5027	252,1108	56,1453	186,4079
25	192,1182	53,9067	201,3669	220,6849	92,4908	216,4999	252,1027	56,2071	186,391
26	192,1174	53,8769	201,3845	220,6897	92,4666	216,4921	252,1011	56,1609	186,4032
27	192,1295	53,919	201,3672	220,6774	92,5105	216,5164	252,1121	56,2563	186,3894
28	192,1261	53,8663	201,3907	220,7068	92,4509	216,4957	252,1124	56,1315	186,4171
29	192,1128	53,8721	201,372	220,6987	92,4489	216,4872	252,1018	56,1282	186,4073
30	192,1241	53,9225	201,3678	220,7132	92,489	216,5028	252,1114	56,1851	186,3979

Tableau A X-18 Essai 12

	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
Pièces	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,102	53,8735	201,3907	220,6774	92,4704	216,4739	252,0874	56,1395	186,414
2	192,0924	53,9473	201,3837	220,6611	92,541	216,4879	252,0734	56,2412	186,3927
3	192,0936	53,8643	201,3943	220,6651	92,4679	216,4679	252,0792	56,1321	186,4182
4	192,1119	53,8912	201,3785	220,6905	92,4802	216,4757	252,0954	56,1624	186,3943
5	192,0854	53,9176	201,3777	220,699	92,4852	216,4639	252,0759	56,1192	186,4117
6	192,0988	53,9014	201,3834	220,7034	92,4772	216,4658	252,0843	56,126	186,4001
7	192,1202	53,8267	201,3859	220,6713	92,4398	216,4743	252,101	56,1395	186,3979
8	192,1188	53,8608	201,3812	220,6781	92,4607	216,4876	252,0988	56,1708	186,3891
9	192,1002	53,8842	201,373	220,7092	92,4493	216,474	252,0889	56,1019	186,4023
10	192,1073	53,8744	201,3844	220,6962	92,4573	216,4782	252,0911	56,1293	186,3989
11	192,1123	53,8081	201,3864	220,6887	92,4063	216,4647	252,0953	56,0764	186,4
12	192,0981	53,9164	201,3779	220,678	92,501	216,4844	252,0807	56,1909	186,3913
13	192,089	53,9251	201,3824	220,6593	92,5274	216,4619	252,072	56,2025	186,3973
14	192,1173	53,8618	201,3864	220,692	92,4538	216,4835	252,0985	56,1432	186,3952
15	192,1188	53,8144	201,3804	220,7013	92,3957	216,4906	252,1014	56,0873	186,393
16	192,1003	53,8926	201,3729	220,6935	92,4667	216,4814	252,0884	56,1383	186,4026
17	192,117	53,8482	201,3715	220,681	92,4446	216,478	252,0973	56,1511	186,3794
18	192,1168	53,8383	201,3878	220,6888	92,4333	216,4829	252,0988	56,1216	186,3994
19	192,0885	53,935	201,3703	220,6741	92,5205	216,4638	252,0736	56,1917	186,3901
20	192,0975	53,9195	201,3813	220,6879	92,4952	216,4903	252,082	56,1759	186,3996
21	192,1164	53,8661	201,3845	220,6854	92,4575	216,4942	252,0965	56,1631	186,3912
22	192,1157	53,8608	201,3751	220,6971	92,447	216,4749	252,1028	56,1215	186,4038
23	192,1164	53,8268	201,378	220,6828	92,4277	216,4686	252,0985	56,1162	186,3909
24	192,1048	53,8868	201,392	220,6883	92,4764	216,4783	252,0904	56,142	186,4144
25	192,1089	53,869	201,3867	220,6859	92,4527	216,5014	252,0908	56,153	186,3981
26	192,1248	53,8443	201,3844	220,7186	92,4205	216,4862	252,1132	56,0851	186,4154
27	192,1077	53,857	201,3841	220,6767	92,4547	216,4779	252,09	56,1434	186,3976
28	192,104	53,8821	201,3769	220,7087	92,4495	216,4806	252,093	56,1071	186,4078
29	192,1086	53,8443	201,4003	220,6652	92,4541	216,4862	252,0899	56,1472	186,4126
30	192,1117	53,8637	201,3834	220,6959	92,4539	216,4673	252,0962	56,1195	186,4015



Tableau A X-19 Essai 13

Pièces	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,1263	53,8317	201,3578	220,7142	92,3981	216,4958	252,1164	56,0912	186,3985
2	192,1309	53,811	201,3778	220,6805	92,4144	216,4934	252,1136	56,1323	186,3987
3	192,1368	53,8566	201,3594	220,6884	92,4545	216,4856	252,1215	56,1753	186,3873
4	192,1243	53,7795	201,3782	220,677	92,3789	216,4985	252,1065	56,0998	186,3964
5	192,1373	53,8457	201,3667	220,7085	92,4323	216,4847	252,1255	56,1256	186,4028
6	192,1536	53,8878	201,3597	220,7054	92,4883	216,479	252,1385	56,2035	186,3877
7	192,1496	53,8096	201,3848	220,6826	92,4268	216,4967	252,1308	56,1563	186,4037
8	192,1448	53,8668	201,37	220,6998	92,4656	216,4873	252,1294	56,1772	186,3963
9	192,1447	53,8845	201,35	220,7007	92,4718	216,4948	252,1313	56,2001	186,3849
10	192,1153	53,842	201,3555	220,6995	92,4076	216,5025	252,1027	56,1162	186,3876
11	192,1164	53,7579	201,3609	220,6744	92,3454	216,5014	252,1021	56,0709	186,3919
12	192,1408	53,8512	201,3836	220,6971	92,449	216,5013	252,1251	56,1608	186,4084
13	192,1215	53,7772	201,3701	220,6921	92,3721	216,4678	252,1059	56,058	186,3913
14	192,1603	53,8156	201,373	220,7053	92,418	216,4997	252,1412	56,152	186,3884
15	192,1242	53,8385	201,342	220,6784	92,431	216,4766	252,1116	56,1503	186,3801
16	192,1184	53,8114	201,3621	220,6886	92,4	216,4765	252,103	56,0987	186,3852
17	192,1404	53,8566	201,3772	220,7102	92,4347	216,5195	252,1279	56,1494	186,4124
18	192,1441	53,8355	201,3532	220,696	92,4187	216,516	252,128	56,1693	186,3808
19	192,1427	53,8603	201,3703	220,6967	92,4527	216,5061	252,1278	56,1784	186,3995
20	192,1498	53,8684	201,3883	220,6913	92,4726	216,5174	252,1338	56,2036	186,4164
21	192,1297	53,824	201,3885	220,6955	92,4272	216,4739	252,1127	56,1103	186,4046
22	192,1326	53,8257	201,3507	220,6817	92,4137	216,5067	252,1181	56,1576	186,3839
23	192,1176	53,7948	201,3621	220,6764	92,3848	216,4949	252,1032	56,1039	186,392
24	192,1387	53,8569	201,3536	220,6935	92,4382	216,516	252,1264	56,1787	186,3936
25	192,13	53,8122	201,3773	220,69	92,4123	216,4817	252,1144	56,1107	186,4012
26	192,1352	53,8389	201,3523	220,7234	92,4151	216,4644	252,1248	56,0892	186,3894
27	192,1252	53,9123	201,3728	220,7194	92,4771	216,5027	252,1147	56,161	186,4095
28	192,128	53,7997	201,3751	220,7018	92,3791	216,5065	252,1144	56,0851	186,4045
29	192,1356	53,8427	201,3711	220,6923	92,4346	216,503	252,1204	56,1561	186,3985
30	192,1422	53,7561	201,3667	220,687	92,3578	216,4955	252,1247	56,09	186,3883

Tableau A X-20 Essai 14

	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
Pièces	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,1255	53,8113	201,383	220,7187	92,3893	216,4812	252,1097	56,0604	186,3989
2	192,1324	53,8732	201,4027	220,7224	92,458	216,4897	252,1166	56,1229	186,4181
3	192,1108	53,8123	201,398	220,6981	92,4056	216,468	252,0926	56,0645	186,4043
4	192,1216	53,8254	201,3918	220,7135	92,4121	216,47	252,1057	56,0688	186,4064
5	192,1289	53,8007	201,3914	220,7128	92,3808	216,5023	252,1131	56,0683	186,4098
6	192,1149	53,8406	201,3924	220,7177	92,417	216,4764	252,0996	56,0698	186,4067
7	192,1318	53,832	201,3982	220,7037	92,4326	216,4788	252,1155	56,1062	186,4153
8	192,13	53,8363	201,407	220,6986	92,4463	216,4702	252,1115	56,1134	186,4156
9	192,1204	53,8081	201,3979	220,7067	92,4013	216,4707	252,1036	56,0602	186,4094
10	192,1127	53,8368	201,4101	220,7057	92,4258	216,4806	252,0946	56,081	186,4154
11	192,1253	53,8246	201,4061	220,6976	92,4244	216,4888	252,1063	56,1053	186,4132
12	192,1315	53,8412	201,3966	220,7109	92,4306	216,4915	252,1159	56,1088	186,4153
13	192,13	53,8462	201,4146	220,704	92,4432	216,5001	252,1121	56,1225	186,4257
14	192,1292	53,8465	201,3979	220,6955	92,4466	216,4905	252,1095	56,1407	186,4044
15	192,1177	53,8621	201,3846	220,7188	92,435	216,4811	252,1019	56,0997	186,3982
16	192,1211	53,8237	201,4022	220,6925	92,4244	216,4832	252,1018	56,1049	186,4087
17	192,1151	53,8642	201,3939	220,7197	92,437	216,4836	252,1005	56,0913	186,4109
18	192,1234	53,8407	201,39	220,7199	92,4249	216,4657	252,1066	56,0783	186,4002
19	192,1203	53,8778	201,3975	220,73	92,445	216,492	252,1057	56,0996	186,4137
20	192,1082	53,8469	201,3959	220,7197	92,4248	216,4599	252,0921	56,0577	186,4043
21	192,1191	53,8513	201,3804	220,7239	92,4154	216,4923	252,1052	56,0855	186,4011
22	192,1145	53,8362	201,3972	220,7112	92,4249	216,4615	252,0959	56,0737	186,3997
23	192,1232	53,8641	201,3999	220,7263	92,4407	216,4826	252,1075	56,0932	186,4125
24	192,1361	53,8379	201,3893	220,7087	92,4365	216,4739	252,1194	56,1137	186,4049
25	192,1212	53,8257	201,3728	220,7077	92,418	216,4472	252,1045	56,0775	186,3851
26	192,1218	53,8369	201,3966	220,7261	92,4109	216,4842	252,1068	56,0648	186,4118
27	192,136	53,8053	201,3853	220,7094	92,3944	216,4926	252,1185	56,0899	186,3997
28	192,1179	53,859	201,3807	220,7215	92,4237	216,493	252,1035	56,0959	186,3997
29	192,1198	53,8511	201,3967	220,7203	92,4327	216,4716	252,1041	56,0803	186,4101
30	192,1174	53,8478	201,412	220,7254	92,4303	216,4711	252,1022	56,0596	186,4247

Tableau A X-21 Essai 15

Pièces	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,1337	53,8379	201,4063	220,6896	92,4578	216,4677	252,1121	56,1386	186,4067
2	192,1309	53,8221	201,4081	220,6896	92,433	216,487	252,109	56,126	186,408
3	192,1258	53,8204	201,4044	220,7003	92,4154	216,4947	252,109	56,0959	186,4196
4	192,1221	53,7799	201,3983	220,6663	92,4032	216,4736	252,097	56,1107	186,3888
5	192,1273	53,8232	201,4053	220,6667	92,4444	216,4948	252,1014	56,168	186,3947
6	192,1283	53,8857	201,3981	220,6804	92,5106	216,4547	252,1076	56,1886	186,4018
7	192,1303	53,8403	201,4033	220,6779	92,4704	216,4548	252,1069	56,1535	186,3977
8	192,1291	53,8383	201,4005	220,7065	92,4359	216,4782	252,11	56,1094	186,406
9	192,1198	53,857	201,3976	220,6929	92,4617	216,4654	252,1018	56,1279	186,4075
10	192,1266	53,9053	201,3954	220,7036	92,5065	216,4648	252,1109	56,1665	186,4127
11	192,1202	53,8976	201,3779	220,7223	92,4605	216,4977	252,1079	56,1351	186,4055
12	192,1266	53,8387	201,3974	220,6839	92,4583	216,4572	252,1025	56,1427	186,3877
13	192,137	53,8418	201,4126	220,6779	92,4779	216,4609	252,1139	56,1622	186,4096
14	192,1299	53,8354	201,4119	220,6762	92,4591	216,4822	252,1081	56,1537	186,4141
15	192,1395	53,838	201,4008	220,6987	92,4485	216,4802	252,1217	56,1333	186,4149
16	192,1371	53,8242	201,3941	220,6899	92,4371	216,4794	252,114	56,1422	186,3907
17	192,1307	53,8288	201,3926	220,7075	92,4215	216,4844	252,1134	56,1026	186,4056
18	192,1244	53,8909	201,3784	220,6857	92,4942	216,4724	252,1042	56,1934	186,3849
19	192,1225	53,877	201,3806	220,7144	92,4594	216,4698	252,1081	56,1212	186,4014
20	192,1238	53,9091	201,3745	220,6993	92,5005	216,4717	252,108	56,1831	186,3939
21	192,1209	53,8428	201,4037	220,6796	92,4541	216,4817	252,0979	56,1489	186,3993
22	192,1259	53,8816	201,3841	220,669	92,4948	216,4877	252,0989	56,2292	186,3697
23	192,1303	53,8382	201,4125	220,6492	92,4831	216,4802	252,1009	56,2111	186,3924
24	192,1319	53,8423	201,4009	220,6956	92,4475	216,4854	252,1092	56,1437	186,3964
25	192,1334	53,8477	201,4013	220,6946	92,4499	216,498	252,1133	56,1515	186,4079
26	192,1353	53,8309	201,3962	220,6894	92,4502	216,463	252,1149	56,1341	186,4013
27	192,1318	53,8181	201,4096	220,6763	92,4358	216,4984	252,1094	56,1475	186,4109
28	192,1272	53,8315	201,3897	220,6987	92,4262	216,4864	252,1098	56,1151	186,4037
29	192,1327	53,8838	201,3938	220,7343	92,4623	216,4749	252,12	56,108	186,4177
30	192,1397	53,8158	201,3849	220,6868	92,4316	216,474	252,1169	56,1429	186,3838

Tableau A X-22 Essai 16

	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
Pièces	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,1227	53,8478	201,3582	220,7009	92,414	216,5146	252,1058	56,1433	186,3768
2	192,1335	53,8102	201,3714	220,7151	92,396	216,4718	252,1192	56,0739	186,3949
3	192,1254	53,817	201,369	220,7147	92,3913	216,4842	252,1094	56,0789	186,3856
4	192,1142	53,8837	201,3585	220,7906	92,3797	216,5081	252,1131	56,0016	186,414
5	192,132	54,0029	201,3481	220,7343	92,5504	216,5069	252,1205	56,2536	186,3809
6	192,1277	53,8609	201,3552	220,7217	92,4273	216,4811	252,1137	56,1159	186,3788
7	192,1226	53,9142	201,3647	220,685	92,5081	216,4806	252,1036	56,2212	186,3766
8	192,1361	53,9821	201,3566	220,73	92,5383	216,5091	252,1248	56,2416	186,3922
9	192,1144	53,8683	201,3424	220,7437	92,4069	216,473	252,1059	56,0627	186,379
10	192,1363	53,8606	201,3604	220,6852	92,4503	216,5119	252,1157	56,2038	186,3715
11	192,1317	53,9307	201,3506	220,7163	92,5012	216,4839	252,1171	56,2029	186,3747
12	192,1216	53,8773	201,3579	220,7221	92,4358	216,4922	252,1098	56,1216	186,3887
13	192,1176	53,8905	201,3506	220,7613	92,4169	216,4848	252,1156	56,0515	186,4082
14	192,122	53,8626	201,3735	220,6879	92,459	216,476	252,1013	56,1628	186,3776
15	192,1363	53,7966	201,3549	220,719	92,3554	216,5218	252,121	56,0862	186,379
16	192,1191	53,966	201,3555	220,7409	92,5082	216,4913	252,1094	56,176	186,3894
17	192,1399	53,8603	201,3819	220,6875	92,4715	216,4814	252,1168	56,1911	186,3806
18	192,1524	53,8429	201,3646	220,7544	92,4007	216,4977	252,1363	56,0936	186,3795
19	192,1143	53,9233	201,3516	220,7221	92,4697	216,5026	252,1032	56,1617	186,3846
20	192,1249	53,9366	201,3486	220,733	92,4981	216,4605	252,1143	56,1589	186,3806
21	192,1168	53,9053	201,3437	220,7324	92,4437	216,5003	252,1061	56,1338	186,377
22	192,1193	53,8861	201,3405	220,7083	92,4448	216,496	252,1054	56,1596	186,3672
23	192,1393	53,9307	201,3488	220,7391	92,4734	216,5243	252,1256	56,1962	186,375
24	192,1139	53,8261	201,3542	220,765	92,3335	216,5225	252,1078	55,9982	186,3978
25	192,1432	53,8322	201,3587	220,7397	92,4037	216,4671	252,1338	56,0665	186,398
26	192,1309	53,8469	201,3704	220,6937	92,4449	216,4751	252,1104	56,1526	186,3754
27	192,1233	53,873	201,3724	220,719	92,457	216,4508	252,1096	56,107	186,3938
28	192,106	53,8668	201,3653	220,7459	92,4037	216,4799	252,0978	56,0388	186,4003
29	192,1364	53,8288	201,3582	220,7377	92,3826	216,5025	252,124	56,0772	186,387
30	192,1306	53,9114	201,332	220,7404	92,4472	216,5066	252,118	56,1598	186,3604

Tableau A X-23 Essai 17

Pièces	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,0836	54,0403	201,3493	220,715	92,5731	216,4903	252,0744	56,2367	186,3839
2	192,1086	53,8953	201,3461	220,699	92,4564	216,4928	252,0942	56,1644	186,3703
3	192,0814	54,0356	201,3492	220,7204	92,553	216,515	252,0682	56,2402	186,3683
4	192,108	53,9907	201,3675	220,6513	92,5849	216,5184	252,0814	56,3552	186,3575
5	192,0966	54,0691	201,3468	220,6838	92,6177	216,5313	252,0807	56,3613	186,3677
6	192,1019	53,9626	201,3733	220,6955	92,5358	216,4832	252,0886	56,2103	186,3991
7	192,09	53,9586	201,372	220,6806	92,5285	216,4956	252,073	56,2238	186,3855
8	192,1049	54,0293	201,3583	220,6701	92,6115	216,4988	252,0849	56,3441	186,367
9	192,0933	53,9891	201,377	220,677	92,5616	216,5073	252,0767	56,266	186,3939
10	192,0925	54,0564	201,3632	220,6566	92,6424	216,496	252,0724	56,3701	186,3712
11	192,0892	53,9993	201,3708	220,691	92,5656	216,4828	252,0734	56,2418	186,3853
12	192,1143	53,9552	201,3688	220,719	92,5119	216,4991	252,1002	56,1967	186,3898
13	192,1004	53,8729	201,3604	220,6724	92,4542	216,4904	252,0815	56,1717	186,3709
14	192,0905	54,0425	201,3547	220,6924	92,5905	216,5129	252,0749	56,3024	186,3723
15	192,1198	53,9417	201,3679	220,6887	92,5165	216,5199	252,0981	56,2595	186,3703
16	192,0905	53,9375	201,3468	220,7187	92,4754	216,4811	252,0786	56,1425	186,3711
17	192,0989	53,97	201,3335	220,7203	92,5108	216,473	252,0902	56,1795	186,3714
18	192,1157	53,9062	201,3385	220,6727	92,4843	216,5046	252,0924	56,25	186,3384
19	192,1056	54,0111	201,371	220,7148	92,5632	216,5049	252,0907	56,2495	186,3885
20	192,0985	53,9701	201,3638	220,6659	92,5505	216,5046	252,0766	56,2861	186,3651
21	192,0987	53,9783	201,3427	220,7176	92,5167	216,4931	252,0875	56,201	186,3726
22	192,0886	53,9671	201,3612	220,7027	92,5017	216,5306	252,0727	56,2146	186,376
23	192,1246	53,9117	201,3522	220,7035	92,4857	216,4876	252,1067	56,2002	186,3656
24	192,1085	53,9326	201,3626	220,6793	92,5154	216,4908	252,0898	56,2317	186,3742
25	192,0991	54,0116	201,3182	220,6922	92,5478	216,5228	252,0815	56,3066	186,3332
26	192,0897	53,9464	201,3608	220,691	92,5113	216,4767	252,0736	56,1913	186,3749
27	192,1023	53,9937	201,3738	220,6749	92,5848	216,4779	252,0846	56,2791	186,3869
28	192,0995	53,9748	201,342	220,6978	92,5284	216,4929	252,0842	56,2366	186,3613
29	192,1045	53,9499	201,338	220,7075	92,5037	216,4794	252,093	56,193	186,3694
30	192,0988	53,9624	201,3585	220,6817	92,5311	216,5001	252,081	56,2479	186,3712

Tableau A X-24 Essai 18

	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
Pièces	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,1397	53,9579	201,3508	220,7231	92,5089	216,5365	252,126	56,2508	186,3812
2	192,1201	53,9125	201,3839	220,7168	92,4881	216,4811	252,1077	56,1488	186,4115
3	192,1397	53,8337	201,3598	220,689	92,4077	216,5508	252,1213	56,1876	186,3807
4	192,1175	53,8677	201,3743	220,6871	92,424	216,5725	252,1013	56,1908	186,3991
5	192,1259	53,8775	201,3683	220,7011	92,4544	216,5036	252,1091	56,1694	186,3859
6	192,1334	53,9715	201,3534	220,7245	92,5162	216,5405	252,1201	56,253	186,3838
7	192,1341	53,8884	201,3646	220,7044	92,4575	216,5288	252,1159	56,201	186,3808
8	192,1341	53,9043	201,367	220,7261	92,4635	216,5152	252,1192	56,1725	186,3893
9	192,1554	53,9142	201,3659	220,7007	92,5082	216,5138	252,1371	56,2568	186,3854
10	192,1453	53,8973	201,3596	220,7126	92,4668	216,5277	252,131	56,2074	186,3903
11	192,1262	53,9062	201,3474	220,7006	92,4699	216,5176	252,1097	56,2119	186,3686
12	192,1522	53,8591	201,3709	220,6742	92,4767	216,5024	252,1273	56,2427	186,3704
13	192,129	53,9949	201,3677	220,7288	92,5353	216,5493	252,117	56,2589	186,4007
14	192,1381	53,8524	201,348	220,673	92,4452	216,5186	252,1192	56,2201	186,369
15	192,1324	53,844	201,3525	220,7012	92,4248	216,4897	252,1183	56,1397	186,3818
16	192,1342	53,9099	201,3704	220,7016	92,491	216,5091	252,1169	56,215	186,3882
17	192,1304	53,8412	201,3732	220,6711	92,4512	216,489	252,11	56,1824	186,3841
18	192,1494	53,8981	201,3721	220,6973	92,481	216,5437	252,1307	56,247	186,3913
19	192,1413	53,875	201,3794	220,7312	92,4434	216,5085	252,1266	56,1384	186,4021
20	192,1424	54,0289	201,3543	220,7339	92,578	216,529	252,1313	56,3003	186,3919
21	192,1224	53,9802	201,3741	220,7407	92,5234	216,5134	252,1131	56,195	186,411
22	192,1312	53,8842	201,3706	220,7031	92,4543	216,529	252,115	56,1879	186,3932
23	192,1492	53,8763	201,3811	220,7011	92,4676	216,5233	252,1325	56,2036	186,4047
24	192,1402	53,8938	201,3605	220,695	92,468	216,5413	252,1246	56,2298	186,3899
25	192,1209	53,8593	201,3425	220,7175	92,4067	216,5122	252,1099	56,121	186,3794
26	192,132	53,9653	201,3686	220,6834	92,5449	216,5417	252,1138	56,3086	186,3889
27	192,151	53,8973	201,3507	220,6692	92,4978	216,5332	252,1316	56,2937	186,3752
28	192,1485	53,9252	201,3758	220,7209	92,4978	216,5271	252,1337	56,2229	186,4023
29	192,1378	53,8759	201,3839	220,7237	92,446	216,5163	252,1229	56,1473	186,406
30	192,1319	53,8866	201,3871	220,7064	92,4621	216,5271	252,1126	56,1863	186,3965

Tableau A X-25 Essai 19

Pièces	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,1221	53,8974	201,3825	220,6899	92,4841	216,5063	252,1046	56,1966	186,3988
2	192,1035	53,8808	201,3807	220,7144	92,4312	216,5161	252,09	56,1145	186,4029
3	192,1292	53,9214	201,374	220,6937	92,4969	216,5329	252,1097	56,2434	186,3859
4	192,1159	53,9374	201,3798	220,69	92,516	216,5119	252,0997	56,2276	186,4003
5	192,1192	53,9026	201,3782	220,7179	92,4639	216,5088	252,1053	56,1527	186,4013
6	192,1374	53,8775	201,3926	220,6875	92,4851	216,4964	252,1174	56,1994	186,4025
7	192,1092	53,8659	201,4058	220,6881	92,4609	216,4874	252,0908	56,1347	186,4143
8	192,1119	53,8934	201,3855	220,6884	92,4706	216,5175	252,0951	56,1819	186,4034
9	192,1398	53,8746	201,3874	220,6626	92,4843	216,5378	252,1173	56,2593	186,3966
10	192,1119	53,8869	201,3706	220,7295	92,4308	216,5098	252,0999	56,1096	186,3969
11	192,1155	53,904	201,3845	220,7234	92,4572	216,5178	252,1015	56,1418	186,4059
12	192,1218	53,8639	201,3855	220,6615	92,4724	216,507	252,1008	56,2097	186,3955
13	192,1459	53,8664	201,4042	220,6905	92,4821	216,4978	252,1231	56,1987	186,404
14	192,1269	53,8601	201,3949	220,705	92,4404	216,5159	252,1107	56,1407	186,4136
15	192,1277	53,9278	201,391	220,7054	92,5053	216,5197	252,1111	56,2125	186,409
16	192,1318	53,8766	201,3944	220,6816	92,4721	216,5297	252,1105	56,2138	186,4018
17	192,1231	53,89	201,3997	220,691	92,4885	216,4934	252,1025	56,1842	186,4027
18	192,1283	53,879	201,4062	220,6903	92,4814	216,5013	252,1091	56,1793	186,4157
19	192,1263	53,8425	201,3889	220,669	92,4615	216,4774	252,105	56,1719	186,3947
20	192,1326	53,8873	201,3802	220,6893	92,4822	216,5043	252,1143	56,2044	186,3959
21	192,1398	53,8689	201,3713	220,6797	92,4737	216,5023	252,1223	56,211	186,3939
22	192,1371	53,8794	201,3892	220,6553	92,4951	216,5333	252,1144	56,2687	186,3985
23	192,1387	53,8574	201,3759	220,6774	92,4634	216,5057	252,1199	56,2029	186,3947
24	192,1401	53,8902	201,4064	220,6665	92,5191	216,501	252,1175	56,2484	186,411
25	192,1241	53,9189	201,382	220,7172	92,4842	216,5128	252,1081	56,1814	186,3989
26	192,1243	53,9242	201,3756	220,6879	92,5094	216,5118	252,1101	56,2274	186,4053
27	192,1349	53,9529	201,3825	220,6874	92,5497	216,5092	252,1172	56,275	186,4019
28	192,1141	53,9399	201,3889	220,6978	92,511	216,5228	252,0978	56,2175	186,4072
29	192,1321	53,9144	201,4028	220,6916	92,5071	216,5274	252,1124	56,2307	186,4128
30	192,1542	53,8469	201,3917	220,6431	92,4985	216,4991	252,1305	56,2653	186,4019

Tableau A X-26 Essai 20

	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
Pièces	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,1511	53,7622	201,4068	220,7027	92,3872	216,4637	252,1304	56,0655	186,4111
2	192,1398	53,8568	201,4155	220,6945	92,4978	216,4257	252,1199	56,1359	186,4194
3	192,1205	53,7634	201,4165	220,6426	92,4139	216,4642	252,0927	56,1209	186,4003
4	192,1485	53,8476	201,4001	220,6696	92,4926	216,4637	252,1229	56,2078	186,3931
5	192,1295	53,8093	201,4094	220,7035	92,4277	216,4409	252,1124	56,0632	186,4202
6	192,1206	53,8639	201,3752	220,7194	92,4553	216,4283	252,1082	56,0801	186,3995
7	192,1434	53,8951	201,4032	220,7114	92,5184	216,4333	252,1285	56,1521	186,4237
8	192,1254	53,7858	201,4052	220,6986	92,391	216,4713	252,1122	56,0455	186,4325
9	192,1322	53,8306	201,4101	220,7308	92,4333	216,4347	252,1207	56,0343	186,4359
10	192,1324	53,7636	201,3987	220,7296	92,3544	216,4562	252,1212	55,9812	186,4282
11	192,1273	53,8807	201,3885	220,7118	92,4623	216,494	252,1155	56,1372	186,4203
12	192,128	53,8278	201,3919	220,6859	92,445	216,457	252,1076	56,1248	186,3963
13	192,1329	53,7406	201,4036	220,7134	92,3525	216,4392	252,1193	55,9792	186,4262
14	192,1275	53,852	201,3858	220,6971	92,4614	216,4486	252,1111	56,1227	186,4019
15	192,1554	53,7735	201,4229	220,7369	92,3805	216,4698	252,1398	56,0199	186,4385
16	192,1293	53,8888	201,3819	220,714	92,4844	216,4512	252,1178	56,1301	186,4131
17	192,1458	53,8475	201,4167	220,7065	92,4604	216,4874	252,1249	56,1438	186,4187
18	192,1389	53,7682	201,3914	220,6655	92,4026	216,4714	252,1161	56,121	186,3943
19	192,1403	53,7969	201,402	220,6906	92,4055	216,5033	252,1202	56,1182	186,4109
20	192,1379	53,7407	201,4209	220,6682	92,3909	216,4537	252,113	56,0741	186,4132
21	192,1513	53,7368	201,433	220,6907	92,3791	216,4683	252,1293	56,0518	186,4338
22	192,1452	53,8624	201,4181	220,707	92,4883	216,4535	252,126	56,1401	186,4239
23	192,1609	53,7667	201,4263	220,6701	92,4397	216,4403	252,1305	56,1349	186,4017
24	192,1526	53,7644	201,4272	220,6743	92,4196	216,463	252,1261	56,1148	186,4152
25	192,1303	53,8007	201,384	220,6925	92,419	216,4381	252,1111	56,085	186,3909
26	192,1336	53,8412	201,3899	220,6996	92,4493	216,4628	252,1145	56,127	186,3975
27	192,1392	53,8581	201,3816	220,746	92,4255	216,4806	252,128	56,0778	186,4116
28	192,1213	53,8109	201,3822	220,6982	92,4088	216,4603	252,1035	56,0804	186,3924
29	192,1384	53,7664	201,4091	220,6832	92,4018	216,4519	252,1179	56,0735	186,4145
30	192,1361	53,8489	201,4085	220,7134	92,4621	216,4468	252,1205	56,0974	186,4247



Tableau A X-27 Essai 21

Pièces	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,1204	53,9104	201,4043	220,6679	92,5359	216,4673	252,0963	56,2294	186,397
2	192,1041	53,8875	201,4149	220,6907	92,4903	216,4621	252,0877	56,1279	186,4267
3	192,1002	53,8871	201,4	220,6934	92,4915	216,4306	252,0853	56,1078	186,4154
4	192,1064	53,8948	201,3821	220,6846	92,483	216,4829	252,0863	56,1764	186,3848
5	192,0959	53,9112	201,3835	220,709	92,482	216,4623	252,0847	56,1144	186,411
6	192,115	53,791	201,3946	220,6565	92,4188	216,4632	252,0903	56,122	186,3868
7	192,1071	53,832	201,4065	220,7056	92,4252	216,4559	252,0925	56,0523	186,4227
8	192,1006	53,8638	201,4091	220,7027	92,4642	216,4328	252,0872	56,0664	186,4276
9	192,115	53,8775	201,4093	220,7231	92,4554	216,4796	252,1	56,0933	186,4228
10	192,1026	53,9457	201,3783	220,7185	92,5167	216,4519	252,0936	56,1385	186,4127
11	192,094	53,936	201,3787	220,6744	92,5243	216,4748	252,0746	56,2108	186,3835
12	192,0909	53,8967	201,3805	220,7337	92,4425	216,4667	252,0843	56,0502	186,4187
13	192,123	53,8192	201,3997	220,7053	92,4265	216,4436	252,1098	56,0577	186,4236
14	192,1015	54,0358	201,3717	220,7229	92,5951	216,4639	252,0912	56,2305	186,4009
15	192,0936	53,834	201,3939	220,7107	92,4017	216,4731	252,0793	56,0384	186,409
16	192,0981	53,7563	201,3715	220,6942	92,3307	216,4737	252,0835	56,0007	186,3908
17	192,1051	53,9183	201,4006	220,669	92,5194	216,4953	252,084	56,2198	186,4026
18	192,1174	53,7097	201,3855	220,6816	92,3213	216,4524	252,0997	55,9922	186,3989
19	192,1199	53,9101	201,3903	220,6881	92,5094	216,4816	252,1019	56,1976	186,4023
20	192,1192	53,8785	201,4218	220,7527	92,4672	216,416	252,1117	56,0119	186,4535
21	192,1122	53,8152	201,3871	220,7071	92,3985	216,468	252,097	56,0541	186,4034
22	192,1143	53,9132	201,3838	220,7222	92,4818	216,4778	252,1011	56,134	186,4055
23	192,0909	53,8856	201,394	220,734	92,4536	216,4231	252,0838	56,0184	186,4265
24	192,1059	53,8769	201,4127	220,6908	92,4726	216,4814	252,0886	56,1302	186,4227
25	192,1233	53,789	201,4028	220,7136	92,3838	216,463	252,1061	56,0306	186,4117
26	192,1115	53,9293	201,3855	220,6844	92,5287	216,4674	252,0925	56,2081	186,3931
27	192,1003	53,843	201,3862	220,6957	92,44	216,4318	252,0864	56,065	186,4052
28	192,1109	53,8276	201,3987	220,7208	92,4059	216,4646	252,0968	56,0369	186,4151
29	192,1295	53,799	201,3869	220,7102	92,3857	216,4865	252,1143	56,0651	186,4079
30	192,1065	53,8319	201,4005	220,7461	92,3955	216,4474	252,0982	55,9787	186,4309

Tableau A X-28 Essai 22

	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
Pièces	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,0932	54,0403	201,369	220,6869	92,6241	216,4514	252,08	56,2773	186,3929
2	192,0939	53,9726	201,3697	220,6603	92,5573	216,5014	252,0704	56,2901	186,3648
3	192,0988	53,9131	201,3813	220,6904	92,4988	216,4628	252,0812	56,1624	186,3895
4	192,0857	53,9959	201,361	220,7012	92,5534	216,4693	252,0699	56,2173	186,3723
5	192,12	53,8623	201,3879	220,6644	92,5009	216,4232	252,101	56,1638	186,3984
6	192,0842	53,9077	201,3406	220,7668	92,4131	216,4547	252,082	56,0055	186,3885
7	192,1077	53,8876	201,3801	220,6927	92,4746	216,471	252,0882	56,1539	186,3833
8	192,0795	54,1004	201,3628	220,6864	92,6641	216,4712	252,0642	56,3329	186,378
9	192,0681	54,0514	201,3773	220,6871	92,6259	216,4355	252,0544	56,2439	186,3927
10	192,1039	53,882	201,3686	220,6756	92,4807	216,4543	252,0851	56,1639	186,3768
11	192,1071	53,9353	201,3824	220,677	92,5409	216,4542	252,0888	56,2132	186,3923
12	192,107	53,8951	201,3861	220,6882	92,4884	216,4679	252,0876	56,1629	186,3902
13	192,1041	53,9112	201,3927	220,6926	92,5195	216,4222	252,0912	56,1346	186,4158
14	192,0932	53,9771	201,3645	220,7413	92,5038	216,4897	252,0844	56,1432	186,3957
15	192,0932	54,0174	201,3855	220,6426	92,6272	216,4851	252,0693	56,3472	186,3813
16	192,0884	53,9653	201,3808	220,7054	92,5395	216,4432	252,0782	56,1546	186,4097
17	192,1155	53,891	201,3511	220,6779	92,4795	216,4806	252,0931	56,2106	186,3511
18	192,1055	53,8678	201,3897	220,7046	92,4593	216,442	252,0892	56,0915	186,4
19	192,081	54,0755	201,3602	220,7289	92,6099	216,4661	252,0764	56,2256	186,4053
20	192,0946	53,9788	201,3867	220,7155	92,5482	216,4544	252,0834	56,1669	186,4114
21	192,1134	53,915	201,3854	220,7152	92,497	216,4574	252,0986	56,1396	186,4014
22	192,089	53,9487	201,3717	220,6532	92,5482	216,47	252,0657	56,2561	186,3658
23	192,0929	54,0478	201,3548	220,7122	92,593	216,4873	252,0827	56,2609	186,3874
24	192,0985	53,8908	201,3783	220,6843	92,4759	216,4726	252,0777	56,1603	186,3767
25	192,0891	53,9073	201,371	220,7039	92,4741	216,4567	252,0746	56,1183	186,3858
26	192,0787	54,0029	201,3852	220,6932	92,5774	216,4517	252,0694	56,1953	186,4183
27	192,1097	53,8699	201,3894	220,7058	92,4697	216,4262	252,0938	56,0916	186,4004
28	192,0912	53,9946	201,38	220,6697	92,589	216,4639	252,0734	56,2637	186,3904
29	192,0902	53,9943	201,3686	220,646	92,604	216,4565	252,0665	56,3104	186,3625
30	192,1026	53,949	201,3873	220,7318	92,5203	216,4342	252,0925	56,1146	186,4131

Tableau A X-29 Essai 23

Pièces	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,0986	53,8125	201,3345	220,674	92,366	216,5282	252,0811	56,1277	186,3536
2	192,0853	53,8762	201,3755	220,738	92,4029	216,4916	252,0793	56,026	186,4153
3	192,1262	53,7861	201,3671	220,7199	92,3329	216,544	252,1145	56,0566	186,4022
4	192,1225	53,829	201,3419	220,7119	92,3758	216,5267	252,1137	56,1021	186,3891
5	192,1352	53,8873	201,3856	220,6911	92,4747	216,5301	252,1172	56,2124	186,4041
6	192,1154	53,772	201,3743	220,6949	92,3458	216,5092	252,098	56,0585	186,3894
7	192,1165	53,7804	201,3994	220,6924	92,3557	216,5374	252,1	56,0716	186,4183
8	192,1271	53,8993	201,3648	220,715	92,4614	216,5138	252,114	56,1704	186,3942
9	192,102	53,8911	201,3972	220,7244	92,4385	216,518	252,0897	56,0995	186,4211
10	192,1119	54,0492	201,3539	220,7373	92,5685	216,5408	252,1038	56,2708	186,3955
11	192,1107	53,7882	201,3869	220,7315	92,3442	216,4889	252,1021	55,9844	186,4226
12	192,1307	53,7724	201,3718	220,7135	92,3351	216,5284	252,1167	56,0549	186,4001
13	192,1131	53,805	201,361	220,7148	92,3441	216,5421	252,1035	56,0607	186,4025
14	192,1069	53,8745	201,3568	220,7741	92,3911	216,4718	252,104	55,9968	186,4047
15	192,0838	53,8978	201,3752	220,7574	92,4112	216,4857	252,0856	55,9982	186,4398
16	192,127	53,9234	201,3615	220,7185	92,4646	216,5563	252,1165	56,2012	186,4024
17	192,1269	53,7055	201,3984	220,6948	92,2944	216,5171	252,1098	56,0021	186,4156
18	192,1253	53,9307	201,3697	220,7141	92,4977	216,5043	252,1107	56,1977	186,3929
19	192,1148	53,7666	201,3744	220,685	92,347	216,5097	252,1006	56,0598	186,4027
20	192,1177	53,8253	201,3667	220,6832	92,4113	216,4963	252,1009	56,1285	186,3864
21	192,1321	53,7222	201,3632	220,7254	92,2803	216,5117	252,1186	55,986	186,39
22	192,1184	53,849	201,3738	220,6772	92,4326	216,5227	252,1013	56,1701	186,3948
23	192,0919	53,9241	201,357	220,7437	92,4334	216,5194	252,0839	56,0976	186,3926
24	192,0982	53,9171	201,3376	220,7063	92,4379	216,5534	252,0906	56,173	186,3871
25	192,1226	53,8779	201,3882	220,6905	92,4663	216,5078	252,105	56,1759	186,4036
26	192,1043	53,8786	201,3892	220,7476	92,4005	216,5357	252,0987	56,0526	186,4348
27	192,1401	53,8109	201,3411	220,7046	92,3691	216,5441	252,1251	56,1403	186,372
28	192,1111	53,9106	201,3608	220,7128	92,4478	216,5471	252,1012	56,1693	186,4013
29	192,1394	53,8495	201,3709	220,706	92,4137	216,5543	252,1229	56,1717	186,3944
30	192,1259	53,8357	201,3701	220,7168	92,3972	216,5146	252,112	56,1023	186,3955

Tableau A X-30 Essai 24

	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
Pièces	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,1507	53,9082	201,3738	220,719	92,4864	216,5185	252,1337	56,2133	186,3936
2	192,1335	53,8262	201,3928	220,6986	92,4212	216,5008	252,1113	56,1331	186,3919
3	192,1359	53,769	201,3624	220,6725	92,373	216,5014	252,1072	56,1426	186,346
4	192,137	53,8346	201,3657	220,7005	92,4212	216,4983	252,1158	56,1518	186,3696
5	192,1329	53,8844	201,3807	220,7058	92,4775	216,4785	252,1116	56,1749	186,3801
6	192,1361	53,9366	201,3564	220,7393	92,4862	216,5082	252,1182	56,1972	186,365
7	192,1403	53,8504	201,3934	220,7242	92,4278	216,5108	252,1213	56,1278	186,4
8	192,1463	53,8246	201,3805	220,7237	92,3989	216,5182	252,1285	56,1165	186,3942
9	192,1487	53,8552	201,3571	220,7168	92,4226	216,5299	252,1299	56,176	186,3714
10	192,155	53,8835	201,3711	220,676	92,4863	216,5426	252,1278	56,2893	186,3651
11	192,1437	53,9217	201,3767	220,7181	92,5116	216,4798	252,125	56,2062	186,3859
12	192,1292	53,904	201,3725	220,7224	92,467	216,5091	252,1103	56,1752	186,3789
13	192,1336	53,9024	201,357	220,7382	92,4415	216,5325	252,1172	56,1668	186,3726
14	192,1153	53,8746	201,3913	220,7545	92,4214	216,4817	252,099	56,0561	186,3948
15	192,1443	53,8616	201,3521	220,7343	92,4128	216,5246	252,128	56,1456	186,3709
16	192,1392	53,8471	201,3666	220,7237	92,4168	216,5025	252,1207	56,1291	186,3769
17	192,1287	53,9347	201,4102	220,7092	92,533	216,4806	252,1076	56,2026	186,4079
18	192,1434	53,8258	201,373	220,7124	92,4179	216,481	252,1228	56,1242	186,3764
19	192,1379	53,8329	201,4039	220,6954	92,4365	216,5044	252,1155	56,1482	186,4034
20	192,1478	53,8851	201,3804	220,713	92,4672	216,5211	252,1281	56,1993	186,3905
21	192,155	53,8269	201,3607	220,7082	92,4206	216,4946	252,1363	56,1536	186,3762
22	192,1571	53,8372	201,3931	220,6968	92,4478	216,5091	252,1326	56,1884	186,3897
23	192,1537	53,8152	201,3588	220,7027	92,4011	216,5204	252,1304	56,1689	186,3599
24	192,1185	53,8167	201,3595	220,7165	92,3793	216,4879	252,1	56,0768	186,3656
25	192,1451	53,8455	201,3684	220,6841	92,4422	216,521	252,1211	56,2107	186,3692
26	192,1171	53,8353	201,3755	220,7144	92,4035	216,4909	252,0981	56,0926	186,3792
27	192,1353	53,9032	201,3887	220,7228	92,4741	216,516	252,1137	56,1847	186,3858
28	192,1225	53,8641	201,3606	220,7474	92,4055	216,4922	252,1065	56,0812	186,3709
29	192,1412	53,8348	201,3588	220,7273	92,3953	216,5149	252,1244	56,1194	186,3752
30	192,1357	53,8403	201,3628	220,7083	92,414	216,5106	252,1146	56,1499	186,3661

Tableau A X-31 Essai 25

Pièces	Artefact 1			Artefact 2			Artefact 3		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	192,159	53,7812	201,3771	220,6979	92,3969	216,4816	252,139	56,1193	186,3897
2	192,1354	53,8442	201,3611	220,7348	92,4182	216,4578	252,1251	56,0724	186,3953
3	192,1338	53,8567	201,3509	220,7286	92,4027	216,5277	252,1266	56,1157	186,4023
4	192,1385	53,7324	201,3904	220,6616	92,3622	216,4892	252,1094	56,1105	186,3731
5	192,1301	53,8448	201,3751	220,6939	92,4443	216,474	252,113	56,1393	186,3921
6	192,1313	53,9007	201,3538	220,7408	92,4489	216,4965	252,1235	56,1259	186,3984
7	192,1405	53,7913	201,3766	220,674	92,3964	216,5182	252,12	56,1528	186,3903
8	192,13	53,845	201,3808	220,7531	92,4015	216,477	252,1233	56,031	186,4233
9	192,1527	53,822	201,3727	220,6948	92,4482	216,4447	252,1345	56,1394	186,389
10	192,1317	53,7954	201,3707	220,7173	92,3778	216,4719	252,1197	56,0487	186,4018
11	192,1425	53,819	201,3915	220,7069	92,4242	216,4748	252,1268	56,1036	186,4126
12	192,1353	53,9142	201,3639	220,7486	92,4626	216,4996	252,1308	56,1247	186,4188
13	192,1415	53,874	201,3557	220,7348	92,4378	216,4897	252,1331	56,121	186,4004
14	192,1356	53,8813	201,3659	220,7471	92,438	216,4839	252,1276	56,0952	186,4072
15	192,154	53,7528	201,3853	220,6773	92,366	216,5261	252,1317	56,1324	186,3951
16	192,1483	53,7942	201,3874	220,6941	92,4089	216,4811	252,1288	56,1171	186,3999
17	192,1377	53,8616	201,3516	220,7122	92,4424	216,478	252,1248	56,1422	186,3834
18	192,127	53,8926	201,3532	220,7422	92,441	216,4852	252,1207	56,1028	186,4009
19	192,1436	53,7316	201,3761	220,6906	92,3366	216,4927	252,125	56,06	186,3923
20	192,1421	53,8681	201,3764	220,7778	92,4176	216,4671	252,14	56,024	186,433
21	192,1352	53,8582	201,3801	220,7112	92,4526	216,4689	252,1219	56,123	186,4082
22	192,1364	53,8467	201,3602	220,7044	92,4304	216,4916	252,1213	56,1436	186,3857
23	192,15	53,7522	201,3957	220,7075	92,3543	216,5	252,1353	56,0526	186,4232
24	192,1289	53,78	201,3892	220,7172	92,3652	216,478	252,1154	56,0278	186,4135
25	192,1249	53,7669	201,3993	220,7003	92,36	216,4925	252,1114	56,035	186,4266
26	192,1305	53,7423	201,3717	220,6936	92,328	216,507	252,1157	56,047	186,3993
27	192,1316	53,8629	201,3755	220,7251	92,4371	216,4825	252,1208	56,1042	186,4099
28	192,133	53,8294	201,3595	220,7054	92,4094	216,4917	252,1189	56,1176	186,3882
29	192,1301	53,8941	201,3726	220,7308	92,4646	216,4761	252,1192	56,1245	186,4045
30	192,1537	53,758	201,39	220,6758	92,3649	216,5485	252,1303	56,1485	186,3969

Tableau A X-32 Résultats étude R&amp;R

		Artefact 1		Artefact 2		Artefact 3		Goujon	
Opérateurs	Mesure	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
A	1	169,6378	199,8305	199,4574	237,4311	229,6589	200,0298	199,6534	199,9517
A	2	169,9633	199,9286	199,9308	237,4177	229,9815	199,8925	199,9791	199,934
A	3	169,9833	199,8975	199,8966	237,4197	230,0039	199,9528	199,9991	199,9444
A	4	170,3063	199,8154	200,3669	237,221	230,3269	199,6328	200,3221	199,7441
A	5	169,8728	200,3359	199,9905	237,6945	229,8929	200,0635	199,8885	200,2191
A	6	169,971	199,6288	199,762	237,2468	229,9874	199,889	199,9864	199,7762
A	7	169,9289	200,1936	200,0488	237,5479	229,9474	199,9236	199,9445	200,0761
A	8	170,1125	199,97	200,0271	237,4995	230,1312	200,0193	200,1283	200,0174
A	9	170,0924	199,9564	199,9232	237,5426	230,1102	200,1508	200,108	200,0712
A	10	169,8527	200,0422	199,9045	237,4573	229,8719	199,8755	199,8686	199,9794
B	1	169,7694	200,3921	199,99	237,6677	229,7856	199,9607	199,7846	200,1947
B	2	169,8945	199,9675	199,8973	237,4166	229,9166	199,8773	199,9103	199,9415
B	3	169,7857	200,2844	199,6883	237,8209	229,8056	200,3528	199,8015	200,3405
B	4	170,3678	200,3354	200,5059	237,6779	230,3862	200,0334	200,3834	200,2033
B	5	170,4572	200,4312	200,6085	237,7654	230,4758	200,1042	200,4727	200,288
B	6	169,9802	199,948	200,2451	237,1884	229,9956	199,4454	199,9952	199,7152
B	7	169,948	199,8554	200,1835	237,1173	229,9655	199,3977	199,9631	199,6447
B	8	170,3276	200,3169	200,1897	237,8901	230,3456	200,45	200,3434	200,4068
B	9	169,8553	200,111	199,8178	237,5969	229,8737	200,0902	199,8712	200,1204
B	10	170,3593	200,3567	200,3165	237,8462	230,3751	200,3519	200,3752	200,3727
C	1	170,1955	200,3995	200,3513	237,7334	230,2147	200,0605	200,211	200,2523
C	2	170,1724	200,2459	199,9504	237,8766	230,1908	200,52	200,1878	200,4022
C	3	169,7986	199,4277	199,4318	237,1753	229,8154	199,9297	199,8132	199,6993
C	4	169,6726	199,5453	199,477	237,1533	229,6912	199,7792	199,6882	199,6805
C	5	169,6979	199,5745	199,4926	237,1898	229,7171	199,822	199,7134	199,7167
C	6	169,5402	199,6746	199,3597	237,2719	229,5588	199,8835	199,5558	199,7979
C	7	169,5948	199,5458	199,2418	237,2777	229,6151	200,0236	199,6096	199,8041
C	8	169,6514	199,3937	199,2803	237,1388	229,6696	199,9056	199,666	199,6678
C	9	169,8789	199,5984	199,6312	237,2535	229,8963	199,9116	199,8942	199,7759
C	10	169,9111	199,7733	199,7656	237,3455	229,9279	199,9283	199,9268	199,8702

## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abenham, G. N., Desrochers, A., Tahan, A. S., & Bigeon, J. (2015). A virtual fixture using a FE-based transformation model embedded into a constrained optimization for the dimensional inspection of nonrigid parts. *Computer-Aided Design*, 62, 248-258. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.12.006>
- Automotive Industry Action Group. (2010). Measurement System Analysis. Norme MSA Fourth Edition.
- Bureau International des poids et mesures. (2008a). Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement. Norme JCGM100:2008.
- Bureau International des poids et mesures. (2008b). Supplement 1 to the « Guide to expression of uncertainty in measurement » - Propagation of distributions using a Monte Carlo method. Norme JCGM 101:2008.
- Bureau International des poids et mesures. (2009). An introduction to the « Guide to expression of uncertainty in measurement » and related documents. Norme JCGM 104:2009.
- Chen, Z., & Du, F. (2017). Measuring principle and uncertainty analysis of a large volume measurement network based on the combination of iGPS and portable scanner. *Measurement*, 104, 263-277. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.03.037>
- Chen, Z., Du, F., & Tang, X. (2018). Position and orientation best-fitting based on deterministic theory during large scale assembly. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29(4), 827-837. <https://doi.org/10.1007/s10845-015-1132-7>
- Chen, Z., Du, F., Tang, X., & Zhang, X. (2015). A framework of measurement assisted assembly for wing-fuselage alignment based on key measurement characteristics. *International Journal of Manufacturing Research*, 10(2), 107. <https://doi.org/10.1504/IJMR.2015.069686>
- Creaform. (2021a). Dynamic Tracking Measurements Software | VXtrack by Creaform. Repéré à <https://www.creaform3d.com/en/metrology-solutions/3d-applications-software-platforms/dynamic-tracking-vxtrack>
- Creaform. (2021b). Scanner HandySCAN 3D pour la métrologie 3D. Repéré à <https://www.creaform3d.com/fr/solutions-de-metrologie/scanners-3d-portables-handyscan-3d/specifications-techniques>

- 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>
- Falgarone, H., Thiébaud, F., Coloos, J., & Mathieu, L. (2016). Variation Simulation During Assembly of Non-rigid Components. Realistic Assembly Simulation with ANATOLEFLEX Software. *Procedia CIRP*, 43, 202-207. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.336>
- FARO. (2021). FARO Vantage Laser Trackers: Portable, Large-Scale, High-Accuracy 3D Measurement. Repéré à <https://www.faro.com/en/Products/Hardware/Vantage-Laser-Trackers>
- Forbes, A. B. (2012). Weighting observations from multi-sensor coordinate measuring systems. *Measurement Science and Technology*, 23(2), 025004. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/23/2/025004>
- Franceschini, F., Galetto, M., Maisano, D., & Mastrogiacomio, L. (2016). Combining multiple Large Volume Metrology systems: Competitive versus cooperative data fusion. *Precision Engineering*, 43, 514-524. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.09.014>
- Galetto, M., Mastrogiacomio, L., Maisano, D., & Franceschini, F. (2015). Cooperative fusion of distributed multi-sensor LVM (Large Volume Metrology) systems. *CIRP Annals*, 64(1), 483-486. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.003>
- Galetto, M., Mastrogiacomio, L., Maisano, D., & Franceschini, F. (2016). Uncertainty evaluation of distributed Large-Scale-Metrology systems by a Monte Carlo approach. *CIRP Annals*, 65(1), 491-494. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.017>
- Government of Canada, I. (2003, 13 février). Canadian automotive industry. Innovation, Science and Economic Development Canada. Repéré à <https://www.ic.gc.ca/eic/site/auto-auto.nsf/eng/Home>
- Hexagon AB. (2021). Absolute Tracker solutions. Repéré à <https://www.hexagonmi.com/en-US/products/laser-tracker-systems/about-laser-tracker-systems>



- HUBBS. (2021). Retro-Reflective Photogrammetry Targets. Repéré à [https://hubbsmachine.com/retro-reflective-contrast-photogrammetry-targets/33-dvtv.html#/material-1144\\_steel/a\\_shank\\_diameter-3\\_0000\\_16\\_0000\\_metric/retro\\_reflective\\_or\\_white\\_dot\\_contrast\\_target-r/d\\_dot\\_diameter-10mm](https://hubbsmachine.com/retro-reflective-contrast-photogrammetry-targets/33-dvtv.html#/material-1144_steel/a_shank_diameter-3_0000_16_0000_metric/retro_reflective_or_white_dot_contrast_target-r/d_dot_diameter-10mm)
- Innovation, Sciences et Développement économique Canada, & AIAC. (2019). État de l'industrie aérospatiale canadienne. *Aerospace Industries Association of Canada*. Repéré à <https://aiac.ca/fr/statistiques-sur-lindustrie/>
- ISO. (2009). Spécification géométrique des produits (GPS) - Essais de réception et de vérification périodique des machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) - Partie 2: MMT utilisées pour les mesures de dimensions linéaires. Norme ISO 10360-2:2009.
- Jamshidi, J., Kayani, A., Iravani, P., Maropoulos, P. G., & Summers, M. D. (2010). Manufacturing and assembly automation by integrated metrology systems for aircraft wing fabrication. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 224(1), 25-36. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM1280>
- Kyle, S., Robson, S., Chapman, D., Cross, P., Oldfield, S., & Iliffe, J. (2001). Understanding large scale metrology.
- Li, Y., Qiu, Y., Chen, Y., & Guan, K. (2014). A novel orientation and position measuring system for large & medium scale precision assembly. *Optics and Lasers in Engineering*, 62, 31-37. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2014.05.004>
- Lin, J., Chen, J., Yang, L., Ren, Y., Wang, Z., Keogh, P., & Zhu, J. (2020). Design and development of a ceiling-mounted workshop Measurement Positioning System for large-scale metrology. *Optics and Lasers in Engineering*, 124, 105814. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.105814>
- Liu, W. L., & Li, Y. W. (2017). A novel method for improving the accuracy of coordinate transformation in multiple measurement systems. *Measurement Science and Technology*, 28(9), 095002. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa7b0e>
- Liu, Xia, An, L., Wang, Z., Tan, C., & Wang, X. (2018, 14 novembre). Tolerance Analysis of Over-Constrained Assembly Considering Gravity Influence: Constraints of Multiple Planar Hole-Pin-Hole Pairs. *Mathematical Problems in Engineering*. [Research Article], Hindawi. <https://doi.org/10.1155/2018/2039153>

- Liu, Xueshu, Chang, J., Yang, Y., Wang, Y., Bao, Y., & Gao, H. (2018, 1 octobre). Evaluation of Assembly Gap from 3D Laser Measurements via FEA Simulation. *International Journal of Aerospace Engineering*. [Research Article], Hindawi. <https://doi.org/10.1155/2018/4303105>
- Liu, Y., Pears, N., L. Rosin, P., & Huber, P. (2020). *3D Imaging, Analysis and Applications* (Second). (S.l.) : Springer. Repéré à <https://doi.org/10.1007/978-3-030-44070-1>
- Maisano, D., & Mastrogiacomo, L. (2016). A new methodology to design multi-sensor networks for distributed large-volume metrology systems based on triangulation. *Precision Engineering*, 43, 105-118. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.07.001>
- 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), 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>
- Martin, O. C., Robson, S., Kayani, A., Muelaner, J. E., Dhokia, V., & Maropoulos, P. G. (2016). Comparative Performance between Two Photogrammetric Systems and a Reference Laser Tracker Network for Large-Volume Industrial Measurement. *The Photogrammetric Record*, 31(155), 348-360. <https://doi.org/10.1111/phor.12154>
- Mei, Z., & Maropoulos, P. G. (2014). Review of the application of flexible, measurement-assisted assembly technology in aircraft manufacturing: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. <https://doi.org/10.1177/0954405413517387>
- Ministère de l'Économie et de l'Innovation. (2020). Industrie 4.0 : les défis de la quatrième révolution industrielle. *Ministère de l'Économie et de l'Innovation*. Repéré à <https://www.economie.gouv.qc.ca/bibliotheques/outils/gestion-dune-entreprise/industrie-40/industrie-40-les-defis-de-la-quatrieme-revolution-industrielle/>

- Mitchell, J. P., Spence, A. D., Hoang, M., & Free, A. (2004). Sensor fusion of laser trackers for use in large-scale precision metrology. Dans *Intelligent Manufacturing* (Vol. 5263, pp. 57-65). International Society for Optics and Photonics. <https://doi.org/10.1117/12.515021>
- Muelaner, J. E., Martin, O. C., & Maropoulos, P. G. (2013). Achieving Low Cost and High Quality Aero Structure Assembly through Integrated Digital Metrology Systems. *Procedia CIRP*, 7, 688-693. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.054>
- Muelaner, J., Martin, O., Paul, & Maropoulos, P. (2011). Measurement assisted assembly and the roadmap to part-to-part assembly. *Proceeding of the 7th International Conference on Digital Enterprise Technology*.
- Muralikrishnan, B., Phillips, S., & Sawyer, D. (2016). Laser trackers for large-scale dimensional metrology: A review. *Precision Engineering*, 44, 13-28. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.12.001>
- Nikon Metrology. (2021a). iGPS Large volume metrology, tracking and positioning. Repéré à <https://www.nikonmetrology.com/images/brochures/inspace-en.pdf>
- Nikon Metrology. (2021b). Laser Radar APDIS. Repéré à <https://www.nikonmetrology.com/en-us/3d-metrology/large-volume-metrology-laser-radar-shop-floor-cmm>
- Papadopoulos, C. E., & Yeung, H. (2001). Uncertainty estimation and Monte Carlo simulation method. *Flow Measurement and Instrumentation*, 12(4), 291-298. [https://doi.org/10.1016/S0955-5986\(01\)00015-2](https://doi.org/10.1016/S0955-5986(01)00015-2)
- Pfeifer, T., Montavon, B., Peterek, M., & Hughes, B. (2019). Artifact-free coordinate registration of heterogeneous Large-Scale Metrology systems. *CIRP Annals*, 68(1), 503-506. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.077>
- Schmitt, R., Witte, A., Janßen, M., & Bertelsmeier, F. (2014). Metrology Assisted Assembly of Airplane Structure Elements. *Procedia CIRP*, 23, 116-121. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.10.073>
- SelectUSA. (2018). Automotive Industry Spotlight. Repéré à <https://www.selectusa.gov/automotive-industry-united-states>

- SelectUSA. (2019). Aerospace Industry Spotlight. Repéré à <https://www.selectusa.gov/aerospace-industry-united-states>
- Sims-Waterhouse, D. (2019). *Camera-based close-range coordinate metrology*. University of Nottingham.
- Wang, J., Leach, R. K., & Jiang, X. (2015). Review of the mathematical foundations of data fusion techniques in surface metrology. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 3(2), 023001. <https://doi.org/10.1088/2051-672X/3/2/023001>
- Weckenmann, A., Jiang, X., Sommer, K.-D., Neuschaefer-Rube, U., Seewig, J., Shaw, L., & Estler, T. (2009). Multisensor data fusion in dimensional metrology. *CIRP Annals*, 58(2), 701-721. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.09.008>
- Yang, Z., McWilliam, S., Popov, A. A., & Hussain, T. (2013). A probabilistic approach to variation propagation control for straight build in mechanical assembly. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64(5), 1029-1047. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4071-x>
- Zhao, G., Zhang, P., & Xiao, W. (2018). Coordinate alignment of combined measurement systems using a modified common points method. *Journal of Instrumentation*, 13(03), P03021-P03021. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/03/P03021>
- Zhuang, J., Li, R., Cao, C., & Gao, Y. (2018). A Novel Hand-eye Calibration Method of a Robot-Laser Scanner System for Large-scale Metrology. Dans *2018 13th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)* (pp. 973-978). <https://doi.org/10.1109/WCICA.2018.8630342>