Contribution à l'estimation des incertitudes sur un assemblage assisté par la métrologie tridimensionnelle sans recours à des gabarits

par

Mohamed BELLIL

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 06 OCTOBRE 2022

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC





Cette licence <u>Creative Commons</u> signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

Mme Tasseda Boukherroub, présidente du jury Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

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

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

MONTRÉAL, LE 06 OCTOBRE 2022

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de mémoire, Pr. Antoine Tahan. Je le remercie pour son encadrement, son soutien moral et financier, ses conseils et la confiance qu'il m'a accordé. Je tiens également à remercier les membres de jury Pr. Tasseda Boukherroub et Pr. Louis Rivest qui m'ont honoré en faisant partie du jury de soutenance de mon mémoire.

J'adresse aussi mes remerciements à tous les membres de Amrikart qui m'ont accompagné pendant l'étude de cas et les essais expérimentaux. J'adresse aussi mes sincères remerciements au programme MITACS Accélération et à l'École de technologie supérieure pour le support financier durant le projet.

J'aimerai finalement exprimer ma gratitude envers mon père, ma mère, ma conjointe et mes sœurs pour le soutien inconditionnel durant tout mon parcours. Sans eux, ce travail n'aurait pas été possible.

Contribution à l'estimation des incertitudes sur un assemblage assisté par la métrologie tridimensionnelle sans recours à des gabarits

Mohamed BELLIL

RÉSUMÉ

L'utilisation des systèmes de mesure 3D évolue et remplace les méthodes d'assemblage traditionnelles de composants d'avions de grande taille qui reposent généralement sur l'utilisation de gabarits d'assemblage. Ces derniers sont critiqués pour leurs coûts de fabrication et ne sont pas généralement flexibles : à chaque modification de la conception, des ajustements sont nécessaires, ce qui se traduit par une carence de productivité. Par contre, les instruments 3D garantissent la flexibilité et un processus d'assemblage automatisé. Dans le cadre de l'assemblage assisté par la métrologie 3D (MAA), les incertitudes de mesure des instruments utilisés et leurs propagations dans la chaine de mesure, ainsi que la méthode suivie et l'utilisation des artéfacts ont un rôle important sur le résultat final de l'assemblage. Bien que le processus MAA ait été bien étudié, l'évaluation de l'incertitude et son influence sur le requis fonctionnel demeurent des problématiques peu abordées dans la littérature. Ce travail présente une évaluation de l'incertitude du processus MAA avec l'utilisation de deux systèmes de mesure : un iGPS et un laser de poursuite. Un modèle d'évaluation de l'incertitude basé sur des simulations de type Monte-Carlo, combiné avec le concept du Torseur de Petit Déplacement (TPD) et la Loi de Propagation de l'Incertitude, est présenté et appliqué aux deux dispositifs. Les résultats sont comparés aux résultats de mesure de comparateur à cadran. Les tests de simulation ont démontré une erreur négligeable par rapport aux résultats expérimentaux.

Mots clés : Assemblage assisté par la métrologie 3D, Incertitude de mesure, Torseur des petits déplacements, Simulation Monte-Carlo, *iGPS*, *Laser Tracker*

Contribution to the estimation of uncertainties on an assembly assisted by threedimensional metrology without the use of assembly jigs

Mohamed BELLIL

ABSTRACT

The use of 3D measurement systems is evolving to replace traditional methods of assembling large aircraft components that generally rely on the use of assembly jigs. The latter are criticized for their manufacturing costs and are generally not flexible: each time the design is modified; adjustments are required, which results in a lack of productivity. In contrast, 3D metrology instruments guarantee flexibility and an automated assembly process. In the context of 3D Metrology Assisted Assembly, the measurement uncertainties of the instruments used and their propagation, as well as the method followed and the use of artifacts, have an important role in the final assembly key characteristic. Although the MAA process has been well studied, the evaluation of the uncertainty and its influence on the functional requirement of the assembly remains an ignored issue in the literature. This work presents an uncertainty assessment of the MAA process with the use of two measurement systems: an iGPS and a laser tracker. An uncertainty evaluation model based on Monte Carlo simulations, combined with the concept of the Small Displacement Torsor (SDT) and the Law of Uncertainty Propagation, is presented and applied to both devices. The results are compared to a dial indicator measurement results. Simulation tests showed negligible errors compared to the experimental results.

Keywords: Metrology Assisted Assembly, Measurement Uncertainty, Small Displacement Torsor, Monte-Carlo Simulation, iGPS, Laser Tracker

TABLE DES MATIÈRES

			Page
INTR	CODUCTION	ON	1
СНА	PITRE 1 R	LEVUE DE LITTÉRATURE	5
1.1	Introduc	tion	5
1.2	La métro	ologie à large échelle (LSM)	6
	1.2.1	Classification des instruments de mesure	
	1.2.2	L'iGPS	8
	1.2.3	Le laser tracker	10
1.3	Modélis	ation de l'incertitude	12
	1.3.3	Les erreurs géométriques des instruments de mesure	15
	1.3.4	Évaluation de l'incertitude et calibration	
1.4	L'assem	blage assisté par la métrologie	
	1.4.1	Objectifs du MAA en industrie aéronautique	
	1.4.2	Outillages flexibles et automatisés	
	1.4.3	Fusion des données	
	1.4.4	Combinaison des instruments de mesure et approches innovatrices.	
1.5		s de recherche	
1.6	Conclus	ion du Chapitre 1	26
СНА	PITRE 2 N	MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DE L'INCERTITUDE	27
2.1		tion	
2.2		on de l'incertitude de l'iGPS	
	2.2.1	Incertitude de répétabilité de l'iGPS	31
	2.2.2	Incertitude de calibration	
2.3	Évaluati	on de l'incertitude du laser tracker	36
2.4	Incertitu	de de l'outil d'interface (barre vecteur)	36
2.5	Évaluati	on de l'incertitude d'un système de mesure combiné	38
	2.5.1	Transformation des coordonnées	
	2.5.2	Pondération des mesures	
2.6	Conclus	ion du Chapitre 2	41
СНА	PITRE 3 A	APPLICATION SUR UNE ÉTUDE DE CAS	42
3.1		tion	
3.2		e expérimental	
3.3		s et discussions	
	3.3.1	iGPS	
	3.3.2	Laser Tracker	
	3.3.3	Assemblage combiné (iGPS + Laser Tracker)	
CON	CLUSION		55
RFC	$MM\Delta N\Gamma$	DATIONS	57

ANNEXE I Code Python pour l'évaluation des incertitudes du Laser Tracker et calcul du	
TPD	61
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	73

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 1.1	Comparaison entre IGPS et Laser Tracker	8
Tableau 3.1	Incertitudes du Laser tracker et de l'iGPS	42
Tableau 3.2	Équipement expérimental	43
Tableau 3.3	Incertitudes sur les points mesurés par l'iGPS μm	46
Tableau 3.4	Résultats et incertitudes de l'assemblage assisté par l'iGPS μm	47
Tableau 3.5	Incertitudes sur les points mesurés par le laser tracker μm	49
Tableau 3.6	Résultats et incertitudes de l'assemblage assisté par le laser tracker μr	n50
Tableau 3.7	Incertitudes des points mesurés par le laser tracker et l'iGPS	53

LISTE DES FIGURES

	Pag
Figure 1.1	Les différents domaines de l'état de l'art
Figure 1.2	Définition de LSM par les dimensions nominales et tolérances
Figure 1.3	Étendues de mesure pour des instruments commerciaux
Figure 1.4	Composants de l'iGPS: Transmetteur, Barre vecteur et PCE
Figure 1.5	Géométrie du signal laser de l'émetteur Tirée de Chen and Du (2017, p. 263)
Figure 1.6	Rayon défini par les angles d'azimut et d'élévation Adaptée de Depenthal (2010, p. 4)
Figure 1.7	Principe de mesure du <i>laser tracker</i> Adaptée de Cuypers et al. (2009, p. 292)1
Figure 1.8	Relation entre l'incertitude et la zone de tolérance
Figure 1.9	Influences sur le processus de mesure14
Figure 1.10	Techniques de fusion de données en métrologie2
Figure 1.11	Degrée de réalisation par rapport aux groups d'exigences
Figure 2.1	Propagation de l'incertitude dans l'assemblage assistée par la métrologie
Figure 2.2	Organigramme de la méthodologie de l'évaluation de l'incertitude29
Figure 2.3	Principe de calcul des coordonnées d'un point par l'iGPS, Adaptée de Chen and Du (2017, p. 104)
Figure 2.4	Principe de calcul de biais de calibration3
Figure 2.5	Évaluation des incertitudes de répétabilité et de calibration de l'iGPS3:
Figure 2.6	Spécification de l'outil d'interface3
Figure 3.1	Points nominaux sur la pièce fixe
Figure 3.2	Positionnement des équipements dans l'espace de mesure4
Figure 3.3	Simulations de l'iGPS vs. Indicateur à cadran: Positions #1 au #44

Figure 3.4	Laser tracker vs. Indicateur à cadran: Positions #1 au #4	51
Figure 3.5	Comparaison des déviations pour l'iGPS	52
Figure 3.6	Comparaison des déviations pour le laser tracker	52
Figure 3.7	Comparaisons des résultats: Positions #1 au #4	54

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ASME Société Américaine des Ingénieurs Mécaniciens

American Society of Mechanical Engineers

CAO Conception Assistée par Ordinateur

Computer Aided Design

CMM Machine de mesure des coordonnées

Coordinate Measurement Machine

ERS Système de Référencement Amélioré

Enhanced Referring System

GD&T Tolérancement Géométrique et Dimensionnel

Geometric Dimensioning and Tolerancing

GPS Spécifications géométriques de produit

Geometric Product Specifications

GUM Guide pour l'Expression de l'incertitude de mesure

Guide to the expression of Uncertainty in Measurement

GLSM Méthode des Moindres Carrés Généralisés

Generalized Least Square Method

ISO Organisation Internationale de Standardisation

International Standard Organisation

iGPS Système de Positionnement Global Intérieur

Indoor Global Positioning System

KMC Caractéristiques des mesures clé

Key Measurement Characteristics

LSM Métrologie à Larche Échelle

Large Scale Metrology

MAA Assemblage Assisté par la Mesure

Measurement Assisted Assembly

MPE Erreur Maximale Permise

Maximum Permissible Error

MCS Simulation Monte-Carlo

XVIII

Monte-Carlo Simulation

PCE Élément de calcul de position

Position Computation Element

R&R Répétabilité et Reproductibilité

Repeatability and Reproductibility

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

n_i Vecteur normal

 $p_{3\times 1}$ Vecteur de déplacement

μm Micromètre

 σ Écart-type

 $R_{3\times3}$ Matrice de rotation

Hz Hertz

 α_i Angle entre vecteur normal et vecteur de référentiel

 θ Angle d'élévation

 Φ Angle d'azimut

 $N(\mu, \sigma)$ Distribution aléatoire normale de moyenne μ et d'écart-type σ

U_c Incertitude Standard

d Distance

INTRODUCTION

Actuellement, de nombreux manufacturiers utilisent des gabarits pour effectuer l'assemblage des composants d'avions, de trains ou d'autocars. Le principal avantage de ces gabarits est qu'ils assurent un positionnement précis des composants qui doivent être assemblés (Mei & Maropoulos, 2014; Schlather, Hoesl, Oefele, & Zaeh, 2018). Habituellement, une règle industrielle de 10-20% est appliquée; ces gabarits doivent être cinq à dix fois plus précis que les tolérances exigées sur les pièces à assembler. Cependant, ils sont critiqués pour leurs coûts élevés (incluant la production, la maintenance (inspection et étalonnage) et la mise en œuvre) (Chen, Du, & Tang, 2018; Corrado & Polini, 2017; J. E. Muelaner, Kayani, Martin, & Maropoulos, 2011). De nos jours, les développements technologiques en métrologie 3D offrent un large choix d'appareils pour effectuer des mesures précises de la position spatiale d'une pièce mécanique (par exemple, iGPS, laser tracker, photogrammétrie, etc.). En règle générale, les applications industrielles de la métrologie 3D concernent l'inspection et la vérification dimensionnelles des composants mécaniques.

Le concept de l'assemblage assisté par la mesure (MAA) est présenté dans (Maropoulos, Muelaner, Summers, & Martin, 2014) avec ces outils, ces domaines d'application et les défis technologiques et scientifiques reliés. Ainsi, le processus de mesure précise des coordonnées 3D d'un composant permet de quantifier et d'ajuster sa position spatiale dans un assemblage à l'aide de systèmes flexibles et automatisables (Franceschini, Galetto, Maisano, & Mastrogiacomo, 2014; Kiraci et al., 2017; Li, Qiu, Chen, & Guan, 2014). Dans le processus MAA, on observe la position spatiale des points représentant les caractéristiques critiques pour la mesure (*Key Measurement Characteristics*, KMC). Ces KMC sont mesurés pour analyser et, si nécessaire, ajuster la position spatiale des composants qui doivent être alignés puis assemblés.

Bien que de nombreuses approches ont déjà étudié l'implémentation de l'MAA, il y en a très peu qui ont considéré l'incertitude d'assemblage par rapport à un requis fonctionnel d'assemblage. Dans le Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM) (JCGM,

2008a), l'incertitude de mesure est définie comme « Dans quelle mesure on croit connaître la vraie valeur d'une quantité par ses résultats de mesure ». D'un point de vue mathématique, l'incertitude est l'information probabiliste qui reflète la plage de valeurs autour d'un résultat apparent d'une mesure qui contient, pour un certain niveau de confiance fixé a priori, la valeur vraie. La fonction de densité de probabilité qui est attribuée à un résultat de mesure modélise la dispersion des valeurs. Par rapport à notre étude et d'un point de vue géométrique, si une tolérance géométrique (ex. tolérance de profil) est mesurée, alors l'incertitude relative peut être considérée comme un volume 3D qui contient la vraie surface.

L'estimation de l'incertitude de mesure est donc une opération cruciale pour déterminer dans quelle mesure la caractéristique clé (KC) de l'assemblage est jugée dans une plage acceptable ou non. L'évaluation de l'incertitude peut être une tâche complexe à réaliser, surtout lorsque le mode de mesure est non linéaire (F.-m. Zhang, Qu, & Ye, 2009), ce qui est le cas par exemple, pour un laser tracker ou un iGPS. En général, tous les appareils de mesure 3D basés sur la mesure d'angle et de distance souffrent de la même difficulté lorsqu'il s'agit d'évaluer l'incertitude de mesure. Les erreurs et la façon dont elles se propagent sont généralement complexes et spécifiques à une tâche. La méthode de Monte-Carlo pour l'estimation d'une incertitude de mesure (comme indiqué dans le supplément GUM 1)(JCGM, 2008b), fournit un moyen pour effectuer la tâche (Cox et al., 2001; Wübbeler, Krystek, & Elster, 2008). De plus, il est crucial de distinguer la contribution d'un instrument à l'incertitude d'une mesure (une incertitude de mesure de coordonnées de point) d'une incertitude de mesure induite par l'algorithme employé (ex. incertitude sur l'emplacement de l'axe d'un élément cylindrique avec un défaut de cylindricité) (Yang et al., 2015).

L'objectif de notre projet est de proposer une méthode pour estimer l'incertitude sur un requis fonctionnel d'un assemblage assisté par un iGPS et un laser tracker. Dans le CHAPITRE 1, une revue de la littérature et des travaux de recherches dans le domaine y est présentée. Dans le CHAPITRE 2, une méthodologie de l'évaluation de l'incertitude dans un assemblage assisté par l'iGPS et le laser tracker y est détaillée. Dans le CHAPITRE 3, le modèle est appliqué à un cas d'étude réel à travers un test expérimental en milieu industriel et les résultats sont comparés

à une mesure référence réalisée par un indicateur à cadran pour la validation. Aussi, les résultats y sont discutés et des recommandations sur les futures recherches sur l'évaluation de l'incertitude sont présentées à la fin du mémoire.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Introduction

Le présent projet fait intervenir différentes disciplines, la solution ne peut être obtenue qu'en intégrant des notions propres à différents domaines du génie et de la technologie. Pour chaque domaine que nous avons jugé pertinent pour notre problématique, nous présentons ci-dessous une revue succincte de l'état de l'art tel qu'identifié par nos lectures.

Trois grandes sections y sont présentées, elles sont illustrées dans la figure 1.1. La métrologie à large échelle, la modélisation de l'incertitude et un domaine qui présente une fusion des deux premiers : L'assemblage assisté par la métrologie tridimensionnelle (MAA). Aussi, les bases mathématiques de la modélisation des incertitudes seront abordées.

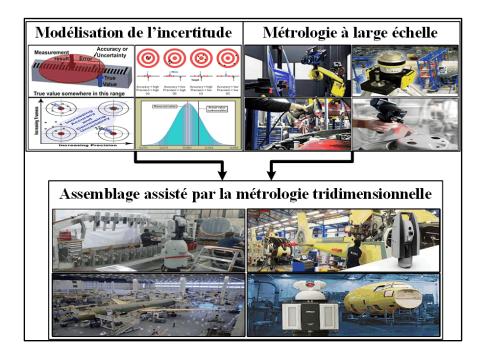


Figure 1.1 Les différents domaines de l'état de l'art

1.2 La métrologie à large échelle (LSM)

La métrologie à large échelle (LSM) est le processus de mesure utilisé dans le domaine de la production technologique pour l'inspection dimensionnelle et géométrique, en accord avec les spécifications géométriques du produit GPS. Elle concerne exclusivement les pièces qui ont des dimensions linéaires s'étendant de quelques mètres à des centaines de mètres (Puttock & Lorenz, 1978).

Dans leur Revue (Schmitt et al., 2016) ont mentionné d'autres attributs à la LSM :

- 1) Les données issues des capteurs (angles et distances) sont liées indirectement aux mesurandes (position des capteurs);
- 2) Des tolérances exigeantes à cause de la grande taille des pièces mesurées (figure 1.2), par exemple, un roulement de 4 m de diamètre possède une tolérance de 20 μm ;
- 3) L'influence de la gravité sur la géométrie des pièces ;
- 4) L'influence de l'environnement (température, lumière, vibration) sur les résultats de mesure ;
- 5) Les méthodes de l'assurance de la qualité classiques (statistiques) et la traçabilité de système de mesure sont difficiles à appliquer. Ce dernier point a été déjà étudié par (Peggs et al., 2009).

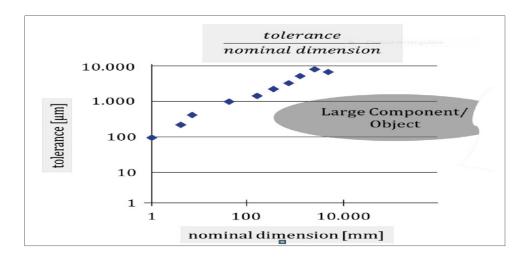


Figure 1.2 Définition de LSM par les dimensions nominales et tolérances Tirée de Schmitt et al. (2016, p. 643)

Certains de ces attributs ne sont exclusifs à la LSM, mais ils donnent une idée sur la complexité du système de mesure LSM.

1.2.1 Classification des instruments de mesure

La littérature scientifique récente montre un grand intérêt pour les instruments de mesure et leurs applications, mais avec des objectifs différents, allants de la simple description des systèmes vers la procédure de caractérisation et d'évaluation de l'incertitude (C. H. Cheng, Huo, Zhang, Dai, & Maropoulos, 2010; J. E. Muelaner & Maropoulos, 2008).

Un article de revue de (Franceschini et al., 2014) propose une méthodologie générale pour analyser et classifier les systèmes de mesure LSM. Cette étude est basée sur une analyse de la littérature scientifique depuis 1995.

Cette recherche indique que la taille et l'étendue de la mesure sont les premiers critères qui feront la différence entre les instruments traditionnels de métrologie dimensionnelle les LSM. En général, la LSM se réfère à des objets allant de 10 à $10^2 m$ de taille, avec des précisions cible autour de 0,1 mm jusqu'à 100 mm. La figure 1.3 montre les étendues de mesure correspondante pour différents systèmes.

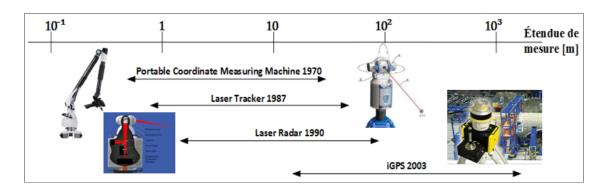


Figure 1.3 Étendues de mesure pour des instruments commerciaux Tirée de (Franceschini et al., 2014)

Les systèmes de mesure peuvent aussi être classifiés selon la typologie de système en centralisée et distribuée comme suggéré par (Maisano et al., 2008). Certains nécessitent un contact direct avec l'objet mesuré comme la machine de mesure de coordonnées (CMM),

d'autres sont capables d'évaluer les caractéristiques dimensionnelles sans avoir besoin d'une sonde pour la toucher comme le radar laser (Kiraci et al., 2017).

À noter que l'assemblage assisté par la métrologie nécessite un appareil qui assure le suivi dynamique et la mesure en temps réel des pièces à assembler. Les deux instruments utilisés dans ce projet (l'*iGPS* et le *Laser Tracker*) sont présentés ci-dessus dans le tableau 1.1.

	iGPS	Laser tracker
Fabriquant	7DK Metrology	Leica Metrology
Étendue de mesure	40 - 60 m	40 m
Précision apparente	$150 - 250 \mu m$	$25 \mu m + 10 \mu m/m$
Logiciel interface	Metris Surveyor	Innovmetric Polyworks

Tableau 1.1 Comparaison entre l'iGPS et le Laser Tracker

1.2.2 L'iGPS

L'iGPS de 7D Kinematic Metrology offre une mesure et un suivi en temps réel d'un nombre théoriquement illimité de cibles dans de grands volumes de mesure. Sa précision statique est bien connue et est d'environ 0,25 mm (Depenthal, 2009; Norman, Schönberg, Gorlach, & Schmitt, 2013), mais il y a un manque d'informations sur la manière d'évaluer l'influence de l'étalonnage dans la détermination de l'incertitude et la répétabilité du système. Il n'existe actuellement aucune norme qui évalue cette performance.

L'iGPS est un système de mesure équipé d'émetteurs, d'un amplificateur de capteurs optiques et d'un élement de calcul de position (PCE) qui sont présentés dans la figure 1.4. Les angles mesurés avec un PCE sont convertis en différentes mesures de position sur un poste de travail à l'aide du logiciel d'interface.



Figure 1.4 Composants de l'iGPS: Transmetteur, Barre vecteur et PCE

Chaque émetteur émet trois signaux différents : un signal stroboscopique et deux signaux en infrarouge inclinés à 30° par rapport à l'axe de rotation et séparés par un angle de 90° sur l'axe horizontal (figure 1.5). Les signaux infrarouges sont émis en continu à travers la tête rotative de l'émetteur avec une fréquence comprise entre 40 et 50 *Hz*.

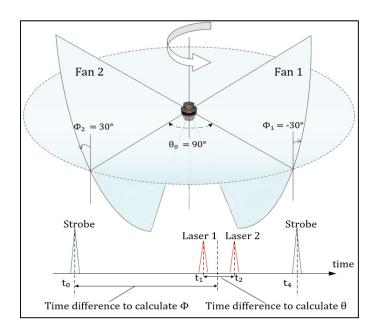


Figure 1.5 Géométrie du signal laser de l'émetteur Tirée de Chen and Du (2017, p. 263)

Les signaux émis par chaque émetteur sont reçus par des capteurs visibles et les temps d'arrivée sont récupérés. Chaque cycle d'émetteur est défini par son temps de signal stroboscopique et le signal interpolé t_0 . Chaque émetteur possède sa propre fréquence de rotation unique. À l'aide de mesures de temps et de la géométrie du signal infrarouge, les angles entre les émetteurs et les capteurs sont déterminés. L'angle d'élévation (θ) est obtenu en fonction de la différence de temps entre les deux faisceaux laser. Pendant ce temps, l'angle d'azimut (Φ) est défini à partir de la différence de temps entre le signal stroboscopique et la moyenne des signaux laser (J. E. Muelaner et al., 2009).

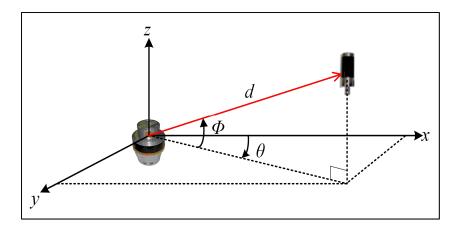


Figure 1.6 Rayon défini par les angles d'azimut et d'élévation Adaptée de Depenthal (2010, p. 4)

Les deux angles mesurés définissent une ligne « rayon » de l'émetteur au capteur. Les distances entre capteurs et émetteurs sont obtenues à l'aide d'un minimum de deux émetteurs (avec des positions connues), ce qui est le principe de mesure de la triangulation. La position du capteur résulte de l'intersection entre deux rayons asymétriques.

1.2.3 Le laser tracker

Un Laser Tracker (LT) est un système de mesure de coordonnées qui mesure la position d'un réflecteur cible et le suit lorsqu'il se déplace à l'aide d'un mécanisme de cardan motorisé (Nasr, Forbes, Hughes, & Lewis, 2012). Le laser tracker mesure et suit la cible p_i en coordonnées sphériques (d,θ,Φ) avec des faisceaux laser en suivant une sonde sphérique en miroir (figure 1.7).

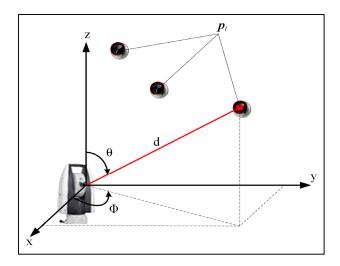


Figure 1.7 Principe de mesure du *laser tracker* Adaptée de Cuypers et al. (2009, p. 292)

La relation entre les mesures du LT et les coordonnées cartésiennes des points p_i est une fonction des coordonnées sphériques :

$$\mathbf{p}_i = f(\mathbf{q}_i) = f(d_i, \theta_i, \varphi_i) \tag{1.1}$$

Les coordonnées sphériques (q_i) sont transformés dans le système de coordonnées cartésiennes (x, y, z) comme suit:

$$\begin{bmatrix} x_{LT} \\ y_{LT} \\ z_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{LT} \cos \theta_{LT} \sin \varphi_{LT} \\ d_{LT} \sin \theta_{LT} \sin \varphi_{LT} \\ d_{LT} \cos \varphi_{LT} \end{bmatrix}$$
(1.2)

1.3 Modélisation de l'incertitude

Selon le Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure GUM (ISO, 1995), l'incertitude est « un paramètre, associé à un résultat de mesure, qui caractérise la dispersion des valeurs qui peuvent être attribuées à la mesurande ». Par conséquent, une mesure doit être accompagnée d'une incertitude de mesure, qui de son côté, doit être accompagnée d'un intervalle de confiance. Par exemple : $a \mu m + b \mu m / m$ (avec un intervalle de confiance de $\pm k\sigma$) avec a, b, σ et k sont des valeurs numériques. Il faut mentionner que dans le cas général, σ doit être considérée comme une fonction de l'équipement ET de la position spatiale dans laquelle la mesure est réalisée.

L'intervalle de confiance est typiquement assigné à un niveau de confiance (ou un risque) de 95,46% ou 99.74% pour 2σ et 3σ respectivement.

Le GUM classifie l'incertitude en deux groupes : Type A et Type B. Le Type A est une incertitude qui varie aléatoirement et qui ne peut être analysée que statistiquement à partir des observations (Bell, 1999). Le Type B est une incertitude évaluée en utilisant d'autres méthodes, comme les certificats de calibration ou la connaissance a priori d'une loi de probabilité (ex. distribution triangulaire).

L'incertitude standard combinée (U_c) d'une quantité dépendante de plusieurs variables indépendantes x_i tel que $f(x_i, ... x_i, ... x_N)$ ($\mathbb{R}^N \to \mathbb{R}$) est approximée dans le voisinage d'un point donné $(x_i, ... x_i, ... x_n)$ dans \mathbb{R}^n par une combinaison linéaire de toutes les incertitudes U_{x_i} :

$$U_c^2(y) \approx \sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta f}{\delta x_i}\right)^2 U^2(x_i)$$
 (1.3)

1.3.1 Relation entre incertitude et tolérance

Il est important de quantifier l'incertitude durant le processus de mesure (ou l'assemblage) pour s'assurer que la tolérance est respectée. Cependant, l'incertitude est un paramètre statistique, donc un intervalle de confiance est typiquement exigé pour s'assurer que la tolérance est respectée. Si on considère que la zone de tolérance est supérieure à l'incertitude de mesure, on aura quatre cas comme l'exemple de la figure 1.8.

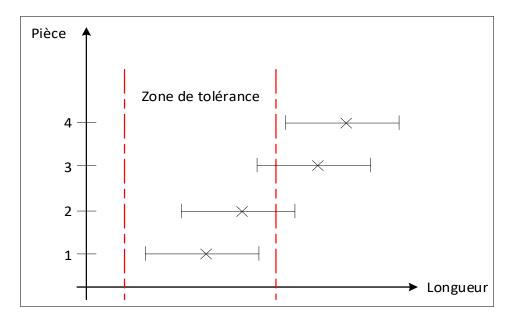


Figure 1.8 Relation entre l'incertitude et la zone de tolérance

- 1) Dans la tolérance : la valeur mesurée et l'incertitude associée sont dans la zone de tolérance. C'est le cas idéal.
- 2) Indéterminée : la valeur mesurée est dans la tolérance, mais la valeur de l'incertitude associée chevauche la limite de la tolérance.
- 3) Indéterminée : la valeur mesurée est en dehors de la tolérance, mais l'incertitude associée chevauche la limite de la tolérance.
- 4) En dehors de tolérance : la valeur mesurée et l'incertitude associée sont en dehors de la tolérance. On est certain que la tolérance n'est pas respectée.

Il est donc nécessaire de prendre en compte l'incertitude de mesure par rapport aux tolérances pour s'assurer que les composants (ou assemblages) qui sont en dehors des spécifications soient rejetés, et que les composants (ou assemblages) qui se situent à l'intérieur de la tolérance retenus. Cependant, dans les opérations de LSM, les processus de mesure liés aux instruments présentent une incertitude de mesure combinée qui consomme une grande partie du budget de tolérance.

1.3.2 Incertitude sur le processus de mesure

Le processus de mesure est influencé par différents facteurs qui sont présentés à la figure 1.9.

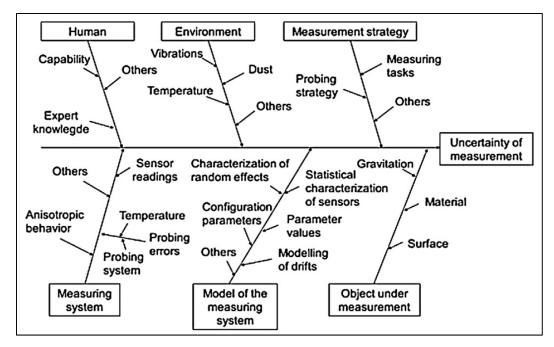


Figure 1.9 Influences sur le processus de mesure Tirée de Schmitt et al. (2016, p. 643)

Les systèmes de mesure sont généralement influencés par des facteurs comme la température et les vibrations. Mais ils sont entachés par une incertitude interne qui va aboutir à des erreurs géométriques. Ce facteur peut identifier la capabilité d'un système pour localiser avec une grande précision, une cible dans l'espace.

1.3.3 Les erreurs géométriques des instruments de mesure

Les erreurs géométriques d'un système de mesure proviennent de limites sur la précision durant le processus de mesure (Schmitt et al., 2016). Ces erreurs sont les défauts d'alignement, excentricités, non-linéarités et les compensations des propriétés mécaniques et optiques des composants.

Dans le cadre d'une recherche réalisée pour Boeing (Loser & Kyle, 1999), des séries de tests sont effectuées pour déterminer les paramètres du modèle d'erreurs géométriques du *laser tracker*. Leur modèle comprend quinze paramètres qui prennent en compte les décalages et les inclinaisons de miroir et de faisceau ainsi que les décalages des axes des codeurs horizontaux et verticaux. L'erreur de position angulaire du codeur vertical est également prise en compte, tout comme les déplacements du faisceau par rapport à l'axe vertical.

(Ben Hughes et al., 2011) ont analysé les erreurs géométriques des *lasers trackers* avec une géométrie de type théodolite. Cette géométrie consiste à 15 cibles fixes, et c'est la position de *lasers trackers* qui change à chaque mesure. C'est un modèle alternatif qui n'utilise pas de linéarisation, de sorte que les effets non linéaires sont traités sans approximations significatives. Ce modèle prend également en charge les mesures effectuées en face avant et en face arrière et exploite cette fonction pour déterminer les paramètres d'erreurs géométriques avec une plus grande sensibilité.

(Balasubramanian Muralikrishnan et al., 2015) ont développé un modèle d'un scanneur laser de grand volume utilisant un prisme tournant sur une tête rotative. Ils ont proposé une série de tests qui ont prouvé une sensibilité à 14 parmi les 18 paramètres du modèle. Ces paramètres ont une influence sur les distances et les angles mesurés. Ces types de tests contribuent à développer la documentation pour l'évaluation des performances des scanneurs laser.

1.3.4 Évaluation de l'incertitude et calibration

Le développement des instruments de mesure, combiné à une puissance de calcul accrue, a permis de nouvelles solutions pour le domaine de la métrologie tridimensionnelle. Les configurations de systèmes de mesures innovantes ont augmenté les performances des processus de mesure. En outre, la modélisation mathématique du processus de mesure et des approches pour l'évaluation des données peuvent aider à assurer la traçabilité et à mieux estimer l'incertitude de mesure.

L'évaluation des performances des machines à mesurer tridimensionnelles conventionnelles est établie dans la norme ISO 10360-2. Cette évaluation comprend une série de mesures d'un artefact de longueur calibrée positionné à plusieurs endroits et orientations (I. ISO, 2010). Si toutes les mesures de l'artefact correspondent à l'erreur maximale tolérée (MPE) spécifiée de l'instrument, le test est réussi. En pratique, le volume sur lequel ce test peut être effectué est limité par la longueur physique de l'artefact de référence. La longueur limite des artefacts tels que les barres étalons est de 1 m. Pour éliminer cette limitation, la dernière révision de l'ISO 10360-2 permet d'utiliser un interféromètre comme artefact de longueur virtuelle.

L'ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) a créé une norme pour l'évaluation de la performance des lasers trackers (ASME, 2006). Le B89 comprend des tests de mesure d'une barre d'étalonnage de longueur de 2,3 m. Cette barre est orientée verticalement, horizontalement et sur les diagonales de droite et de gauche. Les mesures se font sur trois distances et à quatre rotations différentes, et l'instrument passe le test s'il correspond à l'erreur maximale permissible.

L'Institut National des Standards et de la Technologie (NIST), basé aux États-Unis, a évalué la norme B89. (Balasubramanian Muralikrishnan et al., 2008) identifie les domaines à améliorer dans les tests et les analyses pour assurer l'identification des erreurs géométriques et systématiques.

Dans le même contexte, le Département de la Conception et de l'ingénierie de la production (EINA) en Espagne, propose un modèle cinématique pour l'évaluation des performances de laser tracker (Conte, Majarena, Acero, Santolaria, & Aguilar, 2015). Ce modèle est basé sur la méthode de *Denavit-Hartenberg*. Les paramètres du modèle sont déterminés en mesurant l'emplacement d'un certain nombre de cibles à partir de plusieurs emplacements de laser

tracker. Les positions nominales des cibles ont été déterminées par un CMM placé dans cinq positions différentes.

Contrairement à la norme B89, ce modèle cinématique a été comparé avec le modèle géométrique basé sur les erreurs physiques. Une analyse de sensibilité a été effectuée pour définir la meilleure configuration des tests de mesure.

1.4 L'assemblage assisté par la métrologie

L'assemblage assisté par la métrologie (MAA) est défini par l'utilisation de la métrologie pour guider les opérations de l'assemblage (J. Muelaner, Martin, & Maropoulos, 2013). La MAA est adoptée par les industries aérospatiales pour améliorer le processus d'assemblage de grands composants mécaniques. Dans un premier temps, le système de mesure sert à localiser les pièces à assembler. Deuxièmement, leur position optimale est calculée à l'aide du « logiciel Best Fit » comme (*Spatial Analyzer, Polyworks, Smartfit 3D*). Enfin les points hors tolérance sont définis par rapport au modèle CAO (Marguet & Ribere, 2003). Cette approche produit les avantages suivants (Rüscher & Mayländer, 2001; Williams, Chalupa, & Rahhal, 2000):

- Réduire le temps de l'installation de l'outillage et de positionnement des pièces.
- Effectuer des opérations d'assemblage plus reproductibles.
- Réduire le coût de fabrication et de certification des gabarits.
- Améliorer la précision d'assemblage et respecter des tolérances.

Ces avantages ont rendu l'implication de la MAA de plus en plus courante dans l'industrie aéronautique, dans le but d'atteindre une multitude d'objectifs.

1.4.1 Objectifs du MAA en industrie aéronautique

En industrie aéronautique, l'intégration du MAA dans le processus d'assemblage final est réalisée par plusieurs industriels comme Airbus, Boeing et Bombardier (J. Muelaner et al., 2013). Le but de cette intégration est l'élimination des gabarits d'assemblage traditionnels qui sont caractérisés par des coûts de fabrication élevés et l'absence de flexibilité (Martin et al.,

2011). De plus, la réalisation d'un assemblage rapide en utilisant des pièces interchangeables est quasi exclue à cause des tolérances exigeantes et de la grande taille des composants. Aussi, plusieurs aspects peuvent contribuer à procurer des objectifs à la MAA en industrie aéronautique (Maropoulos et al., 2014).

Élimination de l'excès de poids

L'utilisation des cales dans l'assemblage aéronautique provoque un excès de poids pour l'aéronef. Les opérations de calage doivent être éliminées et une meilleure précision devrait réduire les facteurs de sécurité requise.

Des outillages flexibles et automatisés moins chers

Les outillages d'assemblage comme les gabarits et les dispositifs de fixation doivent être remplacés par des outillages reconfigurables ce qui permettra de réduire les coûts. Les gabarits sont utilisés pour le contrôle de la forme de l'assemblage et aussi comme une jauge de vérification (Martin et al., 2011). Leur remplacement ne doit pas affecter la qualité de l'assemblage.

Profils aérodynamiques plus précis

Des tolérances réduites sont susceptibles d'être requises afin d'améliorer les performances aérodynamiques de l'aéronef. Ceci imposera des exigences supplémentaires sur les requis relatifs à l'assemblage (contraintes de symétrie) et à la traçabilité des mesures.

Assurance de la qualité traçable

Les mesures et les incertitudes doivent être traçables pour construire une référence utile lors des opérations d'assemblage. De plus, l'analyse des tolérances et l'étude de capabilité de système de mesure doivent être appliquées. Ces applications permettront de s'assurer que l'assemblage respecte les requis fonctionnels et avec une précision améliorée des profils aérodynamiques.

Ce dernier objectif représente le défi le plus critique pour l'assemblage assisté par la métrologie. Les requis fonctionnels d'un assemblage sont réalisés au moyen de contrôle de la qualité, qui est l'inspection finale du produit assemblé (Raisinghani, Ette, Pierce, Cannon, & Daripaly, 2005). L'acceptation des pièces est effectuée selon la conformité de ces mesures avec les tolérances exigées. La capabilité des instruments est déterminée par la calibration et à travers des études de capabilité et de reproductibilité (R&R). Le but est de s'assurer que le rapport de la mesure de variabilité et la tolérance $\binom{P}{T}$ est inférieur à 10 %(ISO, 2002).

Une approche plus rigoureuse se trouve dans la série des normes ISO Spécifications géométriques des produits (GPS). Il s'agit des règles de décision pour prouver la conformité avec les spécifications (ISO, 1998). Selon cette approche chaque mesure doit être accompagnée par une évaluation de son incertitude. L'intégration des incertitudes permet de fournir une estimation des tolérances sur l'assemblage final en se basant sur les dernières mesures disponibles et d'y fournir une estimation de l'incertitude associée à cette opération. C'est précisément le point central du présent projet.

1.4.2 Outillages flexibles et automatisés

Le MAA est basé sur l'intégration de gabarits flexibles et de techniques de métrologie numérique pour assurer la précision de l'assemblage et l'assurance qualité (Jayaweera, Webb, & Johnson, 2010; Mei & Maropoulos, 2014). Plusieurs recherches sur l'assemblage assisté par mesure se sont principalement concentrées sur la conception d'outillages flexibles, de gabarits intelligents et l'application de techniques de métrologie automatisée (Moehring, Wiederkehr, Gonzalo, & Kolar, 2018). L'intégration des systèmes de métrologie utilisant la technologie laser a été utilisée dans un projet de la compagnie allemande (*Dürr Systems Gmb H*) en 2011. Dans le cadre de ce projet un article publié par (Mbarek, Meissner, & Biyiklioglu, 2011) présente un système de positionnement pour l'assemblage d'aéronefs pour remplacer les gabarits d'assemblage par des positionneurs, qui sont en effet des robots industriels combinés avec des *lasers trackers*. (Li et al., 2014) ont développé un système de positionnement et de mesure pour assister les assemblages à grandes et moyennes échelles. Le système est composé de quatre scènes motorisées, un télémètre laser, un autocollimateur et une caméra. Leur

prototype est jugé très efficace en matière de précision d'assemblage ce qui prouve l'intérêt de tels systèmes dans l'assistance de l'assemblage. (Maropoulos et al., 2014) proposent qu'une partie des gabarits puissent être remplacés par des blocs de gabarits robotisés assistés par des instruments de mesure. Toutefois, l'exigence d'un niveau de stabilité métrologique élevée présente un inconvénient dans ce cas. Dans le cadre de la MAA, (Chen, Du, Tang, & Zhang, 2015) ont présenté une méthode d'assemblage de l'aile avec le fuselage (*Joining*) en déployant un laser tracker et sept gabarits reconfigurables et programmables appelés POGO, qui remplacent plusieurs gabarits de fixations traditionnels . (Zeng, Huang, Li, & Deng, 2019) ont présenté un système d'alignement des grands composants en opération d'assemblage. Un iGPS est utilisé pour guider le positionneur puis un système composé de capteurs laser assure le préalignement à haute précision pour la pièce à assembler. La précision du positionnement atteinte est de $0.209 \ mm$ en translation et $3.15 \times 10^{-5} \ degr$ é en orientation.

1.4.3 Fusion des données

La fusion de données de mesure issues de différents instruments est originaire des méthodes mathématiques et statistiques utilisées en intelligence artificielle et dans l'approche de fusion bayésienne (Weckenmann et al., 2009). Ces chercheurs ont présenté un aperçu de la fusion de données pour la métrologie dimensionnelle multi-capteurs. Les techniques de fusion utilisées pour le système multi-capteurs dépendent de l'application et du type de données de capteur tel qu'illustré dans la figure 1.10 .

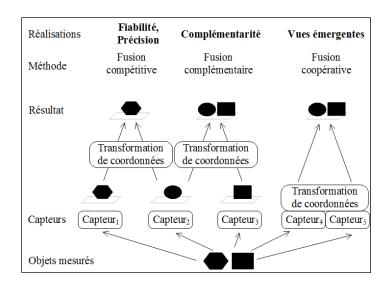


Figure 1.10 Techniques de fusion de données en métrologie Adaptée de Weckenmann et al. (2009, p. 701)

En fonction de leurs configurations et de leurs caractéristiques, Durrant-Whyte classe la fusion de capteurs en méthodes complémentaires, compétitives et coopératives :

- 1) Fusion complémentaire : les capteurs ne dépendent pas directement les uns des autres. Ils peuvent être combinés pour donner une image plus complète de l'objet observé. Cette technique permet d'éviter le problème des données incomplètes. Un exemple étant des captures de caméras photogrammétriques de différents endroits qui sont fusionnées pour donner l'image complète finale (Müller, Krüger, & Saur, 2007).
- 2) Fusion compétitive : chaque capteur délivre sa propre mesure indépendamment des autres capteurs. Les données résultantes sont obtenues en évaluant la moyenne des observations de chaque capteur ou en pondérant chaque capteur avec son incertitude (Heizmann & León, 2007).
- 3) Fusion coopérative : les mesures fournies par des capteurs indépendants sont utilisées pour dériver une nouvelle mesure qui ne serait pas disponible à partir des capteurs individuellement. Un exemple pratique serait le cas d'un système comprenant un laser tracker et des caméras photogrammétriques. Pour les lasers trackers, les erreurs des axes de rotation sont plus élevées que les erreurs radiales (Bala Muralikrishnan,

Phillips, & Sawyer, 2016). Les coordonnées des cibles peuvent être estimées à l'aide de mesures d'angle à partir de caméras et de mesures radiales à partir d'un laser tracker.

Les mesures provenant de plusieurs emplacements d'instruments sont combinées pour obtenir des estimateurs plus précis des positions des cibles. (F. Zhang & Qu, 2012) ont proposé une méthode de fusion de données pour estimer la position la mieux adaptée des cibles fournies par un radar laser et deux lasers tracker. Les points mesurés ont été fusionnés à l'aide d'une matrice des moyennes pondérées et l'incertitude globale a été estimée à l'aide de la méthode de propagation des erreurs basée sur la MCS. (Galetto, Mastrogiacomo, Maisano, & Franceschini, 2015) ont proposé une approche de fusion coopérative basée sur la combinaison de données angulaires et de distance mesurées par un système de mesure composé d'un laser tracker et de trois caméras photogrammétriques. En utilisant ce même système de mesure combiné (Galetto, Mastrogiacomo, Maisano, & Franceschini, 2016a) ont développé un modèle de localisation de cible en utilisant la méthode des moindres carrés généralisée et la simulation MC reposant sur une approche de fusion coopérative. (Franceschini, Galetto, Maisano, & Mastrogiacomo, 2016) ont comparé les performances métrologiques de l'approche coopérative avec les approches concurrentielles classiques. L'incertitude est réduite lors de l'utilisation de systèmes de mesure avec des capteurs redondants tels que des caméras photogrammétriques.

1.4.4 Combinaison des instruments de mesure et approches innovatrices

Plusieurs chercheurs ont étudié les défis liés à l'évaluation d'incertitude d'une combinaison de systèmes de mesure principalement basés sur des méthodes analytiques, statistiques et de Monte-Carlo (MC). L'alignement de différents systèmes de métrologie se fait généralement en utilisant des points communs ERS (*Enhanced Referring System Points*) pour intégrer les coordonnées locales avant la mesure. L'accumulation d'erreurs d'alignement et de positionnement réduit considérablement la précision globale et doit donc être minimisée. (Calkins, 2004) a quantifié l'incertitude des coordonnées de différents systèmes de mesure basés sur la simulation de Monte-Carlo. (Mitchell, Spence, Hoang, & Free, 2004) ont utilisé des techniques d'ajustement de faisceaux (*Bundle Adjsutement Techniques*) pour réduire les

données d'incertitude d'un système de mesure composé de multilaser trackers. (Predmore, 2010) a proposé une méthode d'ajustement du faisceau combiné avec la distance de Mahalanobis pour optimiser l'incertitude du système de mesure multilaser trackers, dans laquelle une technique de best-fit est appliquée à chaque point physique commun. (Ben Hughes et al., 2011) ont analysé les paramètres géométriques inertiels du laser tracker avec le mode de mesure multistations. À l'aide d'un réseau de lasers trackers et de cibles fixes, les erreurs géométriques sont compensées avec une grande sensibilité. (Forbes, 2012) a présenté une approche bayésienne généralisée pour combiner des observations provenant d'un laser tracker, dans laquelle les paramètres de bruit de mesure sont traités comme des inconnues, mais associés à des distributions connues. (Chen & Du, 2017) ont analysé l'incertitude et le principe de mesure du réseau LSM construit par iGPS et scanneur laser portable. (Liu & Li, 2017) ont présenté une méthode reposant sur un réseau de neurones à fonction de base radiale (RBF) pour optimiser la précision des mesures en réduisant l'incertitude de la transformation des coordonnées à l'aide d'un CMM et d'un laser tracker. (Deng, Li, & Huang, 2018) ont proposé une méthode analytique pour l'évaluation des incertitudes des paramètres de transformation. La nouvelle méthode prend en compte à la fois les erreurs de mesure et les erreurs de répartition des points dans l'espace, ce qui se traduit par l'optimisation de la précision de mesure. (Zhuang, Li, Cao, & Gao, 2018) ont proposé une nouvelle méthode pour calibrer un système de mesure combinant un scanneur 3D portable et un robot. La calibration est d'abord effectuée par un laser tracker, puis optimisée pour calculer la valeur moyenne des résultats de calibration primaires. Récemment (Zhao, Zhang, & Xiao, 2018) ont combiné différentes erreurs d'un système de mesure composé de laser tracker et iGPS. La précision globale est améliorée en incluant des contraintes géométriques dérivées des modèles d'incertitude des instruments. Une transformation rigide est utilisée pour calculer les paramètres d'alignement entre les deux instruments. Au lieu d'utiliser des artefacts calibrés ou des points communs (Pfeifer, Montavon, Peterek, & Hughes, 2019) introduit une méthode de recalage utilisant une barre de calibration équipée de deux cibles fixées à son extrémité. En déplaçant la barre sur une trajectoire aléatoire, cette méthode permet de calculer les paramètres de transformation, y compris la propagation des incertitudes du système de mesure composé de laser tracker et iGPS. (Y. Cheng, Xu, Huang, & Wang, 2020) ont étudié la relation entre la

précision du système de mesure et la répartition des points communs sur l'espace de travail. Les auteurs suggèrent que le nombre de points communs doit être supérieur à sept et peut être augmenté en fonction de la zone de mesure. La précision de mesure la plus élevée est liée à la région formée par les points ERS, et leur distribution spatiale assure l'uniformité des mesures. Pour améliorer les performances des systèmes de métrologie actuels, (Lin et al., 2020) ont conçu un système de mesure d'atelier monté au plafond (Ceiling-Mounted Workshop *Measurement System C-wMPS*). Ce nouveau système est développé pour éviter les problèmes de capacité de couverture, de précision de mesure et d'efficacité. L'ensemble du processus de mesure et la traçabilité de la procédure de calibration sont étudiés. Le principe utilisé est similaire à iGPS, il est donc important de comparer les performances des deux systèmes de mesure.(Gai et al., 2020) ont proposé un système de mesure composé de quatre lasers trackers pour assembler les panneaux de fuselage d'un avion. En combinant la technique d'ajustement par faisceaux (Bundle Adjustment) et la photogrammétrie, l'incertitude de mesure du système a considérablement diminué par rapport aux mesures individuelles du laser tracker. (Peng, Ji, Xue, & Sun, 2021) ont présenté une méthodologie pour évaluer la capabilité des systèmes de mesures en assemblage à grande échelle. Les facteurs les plus importants utilisés dans cette étude sont l'incertitude de mesure, mesure simultanée, mesure dynamique et robustesse du système. Il en résulte que la combinaison de différents systèmes de mesure est indispensable pour la réalisation de l'assemblage aéronautique avec haute précision.

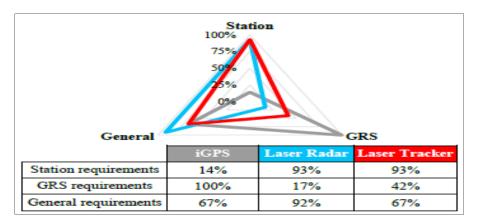


Figure 1.11 Degré de réalisation par rapport aux groupes d'exigences Tirée de Peng et al. (2021, p. 108)

(Jia, Liang, Liu, & Ma, 2021) ont présenté une méthode de surveillance des microdéplacements 3D en temps réel. Le système est basé sur des mesures des distances issues des quatre capteurs magnétiques distribués sur l'espace de mesure. L'application sur l'assemblage de l'empennage d'un avion a donné une précision de $\pm 72 \ \mu m$.

1.5 Objectifs de recherche

Le projet a pour but de contribuer à l'implantation industrielle d'une méthodologie qui permettra à estimer l'incertitude sur le requis fonctionnel d'un assemblage assisté par la métrologie industrielle sans recours à des gabarits. L'évaluation des incertitudes est cruciale pour permettre l'intégration des solutions issues de la métrologie 3D dans les opérations d'assemblage. L'application industrielle ciblée est celle de l'assemblage de deux pièces en utilisant un iGPS et un laser tracker.

Les objectifs spécifiques du projet sont :

- Développer un outil de simulation permettant l'estimation précise de l'incertitude dimensionnelle associée à l'assemblage par le laser tracker et l'iGPS.
- Simuler l'incertitude de répétabilité du laser tracker compte tenu des spécifications sur les mesures d'angles et distances communiqués par le fabricant
- Simuler l'incertitude de répétabilité et de calibration de l'iGPS compte tenu de nombre des émetteurs et détecteurs utilisés ainsi que les erreurs sur les positions de monuments mesurés par le laser tracker.
- Dresser un bilan des incertitudes en tenant compte des incertitudes intrinsèques à l'équipement (instrument) utilisé incluant son erreur d'étalonnage, de l'outillage d'interface et des artéfacts mis en place et de la méthodologie proposée.
- Propager les déviations estimées à partir des mesures des points sur l'étendue de la surface fonctionnelle en utilisant le torseur des petits déplacements.
- Exprimer l'incertitude résultante sur la surface fonctionnelle en se basant sur le principe de propagation des incertitudes et la calculer numériquement par des simulations Monte-Carlo.

1.6 Conclusion du Chapitre 1

Dans ce premier chapitre, les différents domaines du projet ont été présentés. En partant du domaine de la métrologie tridimensionnelle qui a été utilisé principalement pour l'inspection et le contrôle de la qualité. Les chercheurs ont combiné, au cours des deux dernières décennies, les techniques de fusion de données, la transformation des cordonnées et l'automatisation des gabarits, pour inventer des systèmes dédiés à l'assemblage assisté par la mesure. Les systèmes développés précédemment ne présentent pas un instrument de mesure unique bien circonscrit et complètement identifié où les incertitudes de mesure pourraient être caractérisées par des méthodes classiques comme l'analyse de répétabilité et de reproductibilité (*Gage R&R*). L'utilisation d'un réseau complexe comprenant une multitude d'instruments de mesure, un système mécanique, un logiciel de mesure et une interface personne-machine nécessitent toujours le développent d'un outil de calibration spécifique. De plus, le but est de créer un assemblage mécanique qui requière un niveau de tolérance parfois proche de l'incertitude inhérente à l'équipement et où le contrôle de la position et l'orientation présentent un défi.

Après avoir effectué une revue de littérature concernant les différentes parties du projet, on peut conclure que :

Comme l'a démontré notre revue de l'état de l'art dans le domaine, quelques travaux ont été réalisés dans le domaine qui ont mené à des solutions industrielles comme le « *Joining Wing-Fuselage* ». Toutefois, ces solutions demeurent limitées à des pièces spécifiques et à des cas bien précis. Aucune approche générale n'a été proposée encore.

Malgré l'attention considérable qui est portée récemment aux systèmes métrologiques à grande échelle dans l'industrie aérospatiale, la plupart des recherches publiées s'intéressent à créer des systèmes de mesures combinés et les méthodes de fusion de données, mais les chercheurs ont commencé à exploiter les instruments de métrologie 3D pour les opérations d'assemblage, ont négligés l'influence des incertitudes sur le requis fonctionnel, ce qui justifie l'importance du projet dans le domaine de l'assemblage assisté par la métrologie.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DE L'INCERTITUDE

2.1 Introduction

Dans ce chapitre on présente une méthodologie pour atteindre les objectifs fixés sur une opération d'assemblage sans gabarit, les hypothèses de travail ainsi que les étapes pour réaliser les objectifs du projet y seront présentées. La méthodologie proposé dans ce travail pour évaluer l'incertitude est basée sur les aspects suivants :

- 1) Nous considérons uniquement des pièces parfaitement rigides (pas de déformations élastiques à l'état libre) et nous considérons également que l'erreur de forme est négligeable.
- Deux instruments sont étudiés : le Laser tracker de Leica Metrology et l'iGPS de 7D Kinematics.
- 3) Les instruments de mesure sont déployés à la fin de la séquence d'assemblage, lors des opérations d'ajustements, pour assister l'opérateur à aligner les surfaces fonctionnelles.
- 4) L'incertitude inhérente à chaque équipement de mesure est considérée comme celle communiquée par le fabricant de l'équipement. Elle sera considérée comme gaussienne et sera injectés dans les simulations Monte-Carlo.
- 5) L'outillage d'interface utilisé est une barre vectorielle (Vector Bar) composé de deux SMR pour le laser tracker et un deux détecteurs pour l'iGPS.
- 6) Un montage expérimental est proposé pour l'étude expérimental et un indicateur à cadran est utilisé pour les travaux de validation.
- 7) La propagation des incertitudes, à cause de la complexité de la fonction de mesure, est réalisée numériquement par des simulations du type Monte-Carlo.
- 8) Le torseur des petits déplacements est employé pour propager les déviations sur l'étendue des surfaces fonctionnelles.

Le problème de la propagation de l'incertitude dans l'opération d'assemblage est illustré schématiquement à la figure 2.1.

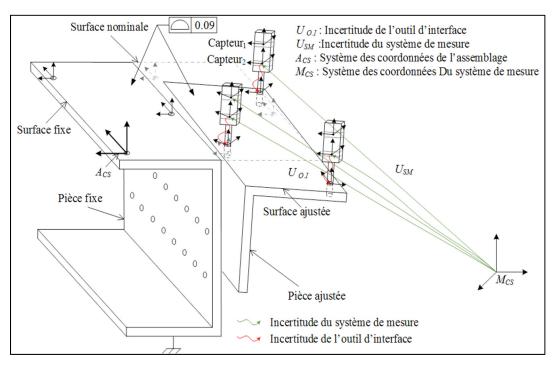


Figure 2.1 Propagation de l'incertitude dans l'assemblage assistée par la métrologie

Le composant à droite de la figure (pièce ajustée) doit être assemblé à la pièce fixe (pièce à gauche). Le requis fonctionnel est une tolérance de profil appliquée aux deux surfaces des pièces. Les résultats des simulations Monte-Carlo de l'assemblage par notre méthodologie (m_{MC}) ainsi que leur incertitude expansée (U_{totale}) sont comparés aux résultats expérimentaux réalisés par un indicateur à cadran (m_{IC}) et qui possède une meilleure précision que l'iGPS et le laser tracker (par conséquent, son incertitude est négligée $u_{IC} \approx 0$). L'indicateur à cadran est utilisé alors pour mesurer la co-planéité des deux surfaces (gap maximal). Les résultats des simulations sont validés s'ils sont inférieurs aux mesures effectuées par un indicateur à cadran (m_{IC}) comme l'indique l'équation (2.1):

$$m_{MC} \pm U_{totale} \le m_{IC}$$
 (2.1)

L'incertitude totale U_{totale} décrit l'incertitude expansée du système de mesure (le laser tracker, l'iGPS ou la combinaison des deux instruments).

Les outils d'interface utilisés dans ce projet sont constitués de deux capteurs (ou cibles) définissant un vecteur le long duquel est projeté le point résultant. Chaque capteur possède son erreur de mesure ce qui va influencer la position du point résultant ($U_{O,I}$ qui doit être estimée). Un organigramme détaillé de la méthodologie utilisée pour évaluer l'incertitude globale des caractéristiques clés présentées dans la figure 2.2.

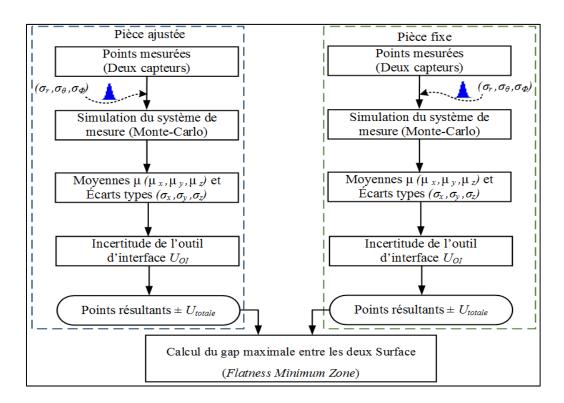


Figure 2.2 Organigramme de la méthodologie de l'évaluation de l'incertitude

La méthodologie est vérifiée sur une étude de cas pour valider les résultats de la simulation. Plusieurs hypothèses de travail sont retenues :

 Les défauts de forme des pièces fabriquées sont mesurés par un laser tracker puis soustraits du résultat de mesure

- L'incertitude des porte-cibles due à leur fabrication est petite selon le fabricant donc sera négligeable;
- Les pièces à assembler sont considérées comme parfaitement rigides et il n'y a pas de déformations élastiques significatives à l'état libre et sous l'effet de la pesanteur;
- Les exigences de dimensionnement et de tolérancement géométriques sont définies par la norme ASME-Y14.5;
- Les performances métrologiques du laser tracker sont évaluées conformément à la norme B89.47.19-2006.
- Les études de cas vont être appliquées sur un assemblage aéronautique, les pièces seront fournies par le partenaire industriel Amrikart et le laboratoire de l'ÉTS (LIPPS).

2.2 Évaluation de l'incertitude de l'iGPS

Selon le principe de l'iGPS, les points mesurés sont déduits (calculés) à partir de mesures d'angle et de temps de vol. En utilisant le principe de la triangulation, le détecteur est ainsi localisé à l'aide de N transmetteurs ($N \ge 2$). Le modèle de localisation de l'iGPS a été étudié en détail dans la littérature (Chen & Du, 2017; Depenthal, 2009; J. E. Muelaner et al., 2009). (Ferri, Mastrogiacomo, & Faraway, 2010) ont qualifié les sources de variabilité des configurations sur l'iGPS. Le principe de mesure consiste à utiliser différents transmetteurs et détecteurs simultanément, donc différentes configurations (Setups). Il en résulte une variabilité importante causée par la multitude de points utilisés lors de la phase de calibration. Différentes configurations du système peuvent être testées, et la sensibilité de la méthode doit être analysée en fonction de chaque configuration. (J. E. Muelaner et al., 2009) ont étudié l'incertitude des mesures d'angle de l'iGPS en réalisant des Simulations Monte-Carlo (MCS). Il a été conclu que l'incertitude diminue avec l'augmentation de la durée d'échantillonnage et elle demeure relativement constante dans le volume de travail.

Une méthodologie générale pour évaluer l'incertitude d'un système de métrologie distribuée a été présentée par (Galetto, Mastrogiacomo, Maisano, & Franceschini, 2016b). L'approche est basée sur une combinaison de la loi multivariée de propagation de l'incertitude et la méthode de Simulation Monte-Carlo (MCS). (Nasr et al., 2012) ont présenté un modèle pour

cartographier et évaluer l'incertitude sur la localisation de cible dans le volume de travail. Le modèle est basé sur un modèle paramétrique dont les paramètres sont identifiés par une méthode des moindres carrés généralisée (GLSM). Les résultats démontrent un écart acceptable entre les expériences et les simulations.

2.2.1 Incertitude de répétabilité de l'iGPS

Comme le montre la figure 2.3, N transmetteurs T_i $\{i = 1, ..., N\}$ sont utilisés pour déterminer la position du détecteur. La position de chaque transmetteur i est connue comme le vecteur $\mathbf{T_i} = [T_{x_i} \quad T_{y_i} \quad T_{z_i}]^T$. Un *vector-bar* est représenté par le point $\mathbf{P} = [P_x \quad P_y \quad P_z]^T$ avec une position inconnue. Le vecteur distance est noté $\mathbf{d_i}$ et l'angle d'élévation et d'azimut sont respectivement Φ_i et θ_i . À noter que les paramètres d'incertitude seront calculés dans le système cartésien de coordonnées (x, y, z).

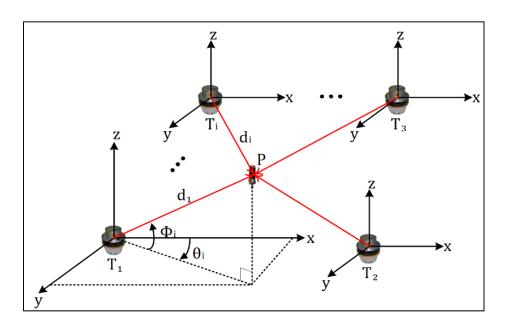


Figure 2.3 Principe de calcul des coordonnées d'un point par l'iGPS, Adaptée de Chen and Du (2017, p. 104)

La relation entre \mathbf{T}_i et \mathbf{P} est:

$$\mathbf{P} = \mathbf{T}_i + \mathbf{d}_i \tag{2.2}$$

En utilisant les angles d'azimut et d'élévation, le vecteur \boldsymbol{d}_i est:

$$\mathbf{d}_{i} = \begin{bmatrix} d_{x}(i) \\ d_{y}(i) \\ d_{z}(i) \end{bmatrix} = \|\mathbf{d}_{i}\| \begin{bmatrix} \cos \Phi_{i} \cos \theta_{i} \\ \cos \Phi_{i} \sin \theta_{i} \\ \sin \Phi_{i} \end{bmatrix}$$
(2.3)

En multipliant (2.2) par un vecteur unitaire orthogonal \mathbf{a}_i avec $\mathbf{a}_i^{\mathrm{T}} \perp \mathbf{d}_i$:

$$\boldsymbol{a}_{i}^{T}.\mathbf{P} = \boldsymbol{a}_{i}^{T}.\mathbf{T_{i}} \tag{2.4}$$

Avec a_i sous la forme :

$$\mathbf{a}_{i} \begin{bmatrix} \cos(\Phi_{i} + \pi/2)\cos\theta_{i} \\ \cos(\Phi_{i} + \pi/2)\sin\theta_{i} \\ \sin(\Phi_{i} + \pi/2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\Phi_{i}\cos\theta_{i} \\ -\sin\Phi_{i}\sin\theta_{i} \\ \cos\Phi_{i} \end{bmatrix}$$
(2.5)

Pour calculer les angles d'azimut et d'élévation, on a :

$$\theta_i = atan \frac{d_y(i)}{d_x(i)}; \ \Phi_i = asin \frac{d_z(i)}{\|\boldsymbol{d}_i\|}$$
 (2.6)

Pour N transmetteurs, l'équation (2.4) s'écrit comme suit:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{a}_{1}^{T} \\ \vdots \\ \boldsymbol{a}_{N}^{T} \end{bmatrix} P = \begin{bmatrix} \boldsymbol{a}_{1}^{T}.T_{1} \\ \vdots \\ \boldsymbol{a}_{N}^{T}.T_{N} \end{bmatrix}$$

$$(2.7)$$

Soient **A** et **B** les matrices de conception et les observations, mesurées et calculées respectivement par :

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{a}_1^T \\ \vdots \\ \boldsymbol{a}_N^T \end{bmatrix}; \ \boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{a}_1^T.T_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{a}_N^T.T_N \end{bmatrix}$$
 (2.8)

Les coordonnées de \mathbf{P} sont obtenues en inversant la matrice \mathbf{A} qui n'est pas carrée. La solution est de procéder à un pseudo-inverse qualifié de « surdéterminé » où il y a plus de paramètres connus (N, \mathbf{T}) que d'inconnues (\mathbf{P}) . La résolution s'effectue donc en utilisant la méthode des moindres carrés, et le vecteur \mathbf{P} peut s'écrire :

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = (\boldsymbol{A}^T \cdot \boldsymbol{A})^{-1} \cdot \boldsymbol{A}^T \cdot \boldsymbol{B}$$
 (2.9)

En pratique, les angles sont obtenus à partir de mesures, ils sont donc censés avoir des erreurs. Pour simuler leurs valeurs, on injecte un bruit gaussien aux valeurs nominales.

$$\theta_i = \hat{\theta}_i + \varepsilon_{\theta_i}; \ \Phi_i = \hat{\Phi}_i + \varepsilon_{\Phi_i}$$
 (2.10)

Où $\varepsilon_{\theta_i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2_{\theta})$ et $\varepsilon_{\Phi_i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2_{\Phi})$ sont censée suivre une distribution normale avec une moyenne nulle et des variances σ^2_{θ} et σ^2_{Φ} . La simulation est répétée suivant une approche Monte-Carlo et l'incertitude de répétabilité est donnée par l'écart type $\left(\sigma_{P_x}, \sigma_{P_y}, \sigma_{P_z}\right)$ lié à chaque résidu de coordonnées cartésiennes.

2.2.2 Incertitude de calibration

Le processus de calibration de l'iGPS est basé sur les positions des monuments et des transmetteurs. Il existe principalement deux méthodes de calibration : la calibration avec la barre étalon (Depenthal, 2010; Norman et al., 2013) et la calibration à l'aide d'un réseau de monuments (calibré à son tour par un autre appareil). Dans le présent projet, le processus de calibration de l'iGPS est basé sur la deuxième méthode où les positions des monuments sont

déterminées à l'aide d'un deuxième appareil, généralement un laser tracker. Les monuments sont fixés au sol ou sur un trépied et sont utilisés comme une référence rigide. Les erreurs de mesure de la position du monument entraînent un biais sur la position des détecteurs mesurés. Il s'agit de l'erreur de calibration de l'iGPS due à la position des monuments. Une formulation mathématique pour cela est mentionnée dans (2.11)

$$Mnt_i = \widehat{Mnt_i} + \varepsilon_{Mnt_i} \tag{2.11}$$

Où $\varepsilon_{Mnt_i} \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2_{Mnt})$ est supposée gaussienne centrée de variance σ^2_{Mnt} . Le principe de la détermination du biais est de choisir une position aléatoire de monument qui est utilisée pour définir l'erreur sur la position du transmetteur (figure 2.4).

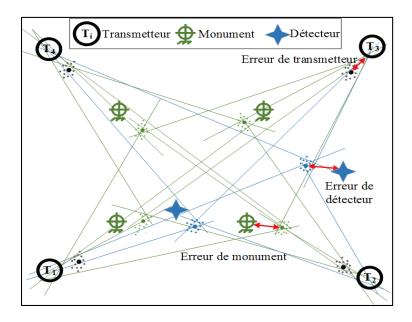


Figure 2.4 Principe de calcul de biais de calibration

L'impact de ce biais sur la position des détecteurs est ensuite évalué comme mentionné dans la figure 2.5. Ce processus est répliqué selon une MCS et le biais de calibration U_{cal} est donné par l'écart type $(\sigma_{P_x}, \sigma_{P_y}, \sigma_{P_z})_{iGPS}$ de toutes les erreurs de mesure liées aux résidus des coordonnées cartésiennes. Un organigramme détaillé du modèle d'évaluation de l'incertitude de l'iGPS est illustré à la figure 2.5.

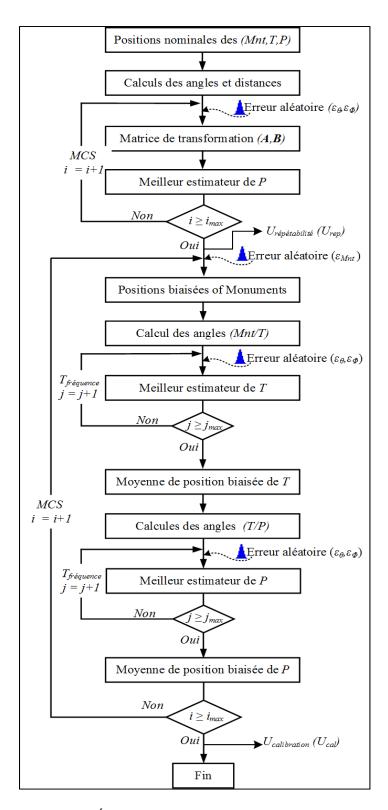


Figure 2.5 Évaluation des incertitudes de répétabilité et de calibration de l'iGPS

2.3 Évaluation de l'incertitude du laser tracker

Dans des conditions nominales, les axes d'azimut et d'élévation sont orthogonaux et se coupent dans l'origine nominale du système de coordonnées. Le faisceau laser émerge à travers le point d'intersection dans une direction orthogonale à l'axe d'élévation. En réalité, le mécanisme d'orientation du faisceau du laser tracker est sujet à des décalages et des désalignements qui conduisent à des incertitudes sur les coordonnées mesurées (B Hughes, Sun, Forbes, & Lewis, 2010). Une mesure de laser tracker avec un bruit additif est représentée comme suit :

$$\widehat{\mathbf{q}} = \mathbf{q} + \varepsilon_{\mathbf{q}} \tag{2.12}$$

Où $\varepsilon_q \sim N(0, \sigma_q^2)$. Cela signifie que l'incertitude est ajoutée aux mesures apparentes de capteur de q, $(d_i, \theta_i, \varphi_i)$ pour donner les meilleurs estimateurs des vrais paramètres de $\hat{q}(\hat{d}_i, \hat{\theta}_i, \hat{\varphi}_i)$. Les approximations des paramètres avec bruit gaussien additif sont données par :

$$\begin{bmatrix} \hat{d}_{LT} \\ \hat{\theta}_{LT} \\ \hat{\varphi}_{LT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{LT} \\ \theta_{LT} \\ \varphi_{LT} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{d_{LT}} \\ \varepsilon_{\theta_{LT}} \\ \varepsilon_{\varphi_{LT}} \end{bmatrix}$$
(2.13)

Les mesures sont répliquées avec la MCS et l'estimateur d'incertitude U_{LT} est donné par l'écart type $(\sigma_{P_X}, \sigma_{P_Y}, \sigma_{P_Z})_{LT}$ de toutes les erreurs de mesure liées aux résidus des coordonnées cartésiennes. Une formulation détaillée de l'évaluation de l'incertitude du laser tracker peut être trouvée dans (Ben Hughes et al., 2011; Bala Muralikrishnan et al., 2016).

2.4 Incertitude de l'outil d'interface (barre vecteur)

Les outils (*Vector Target Adapter*) sont des outils d'interface permettant de créer un vecteur en utilisant deux points mesurés, précisément sur la ligne médiane de l'adaptateur. Les deux réflecteurs du laser tracker sont montés sur une barre vectorielle magnétique pour tenir sur la pièce mesurée comme le montre la figure 2.6 (b). Par contre, un détecteur iGPS de type *i*5 est

lui-même un outil à deux capteurs intégrés distants de 4 pouces (figure 2.6 (c)). Les deux types de supports sont fixés sur la pièce par des trous d'outillage percés avec une tolérance géométrique exigeante (\leq .0005"). En utilisant un logiciel de métrologie assistée par ordinateur (Ex. : *Polyworks, Surveyor*), il est facile d'identifier la localisation du point sur la ligne médiane de la tige qui repose sur la surface de l'objet à mesurer. Si les deux cibles mesurées sont parfaites, le vecteur composé par ces deux cibles coïncide avec l'axe de la tige. Mais puisque les deux points mesurés sont entachés d'une incertitude de mesure (U_1, U_2), la tige peut avoir un angle avec le vecteur des deux cibles. Il y aura alors une déviation entre le point résultant réel et le point à la surface nominale appelée U_r comme le montre la figure 2.6.

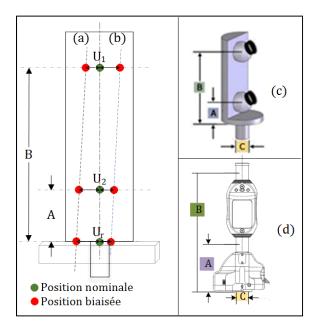


Figure 2.6 Spécification de l'outil d'interface Adaptée de Brunson (2012, p. 47)

La figure 2.6 illustre un schéma représentatif de l'outil d'interface et les erreurs relatifs aux cibles mesurées. Les distances A et B représentent successivement les distances entre le point résultant et la cible en bas et celle en haut. Dans le cas (a), on remarque que U_1 est inférieure à U_2 , la relation entre ces incertitudes et les distances A et B peut s'écrire comme suit :

$$\frac{U_1}{U_r} = \frac{A}{B - A} \tag{2.14}$$

L'incertitude sur le point résultant est alors :

$$U_r = \frac{B - A}{A} \cdot U_1 \tag{2.15}$$

Dans le cas (b), U_1 est supérieure à U_2 , l'équation (2.14) devient alors :

$$\frac{U_1}{U_r} = \frac{B - A}{A} \tag{2.16}$$

L'incertitude sur le point résultant, U_r s'exprime comme suit:

$$U_r = \frac{A}{B - A} \cdot U_1 \tag{2.17}$$

L'incertitude totale peut être supérieure ou inférieure à l'incertitude mesurée en dépendant des incertitudes des deux capteurs.

2.5 Évaluation de l'incertitude d'un système de mesure combiné

Dans le cas d'un assemblage assisté par un système de mesure combiné, deux étapes nécessaires sont ajoutées pour évaluer l'incertitude du système. La première étape est la transformation des cordonnées des instruments sur le système de coordonnées de l'assemblage. La deuxième étape consiste à fusionner les données de mesure des deux instruments pour estimer les résultats finaux du système combiné. Ces deux étapes sont détaillées ci-dessous.

2.5.1 Transformation des coordonnées

L'évaluation de l'incertitude d'un système de mesure combiné nécessite en première étape le recalage des systèmes de coordonnées de mesure (MCS) avec le système de coordonnées de l'assemblage (ACS). Les deux instruments sont capables de localiser les coordonnées des

centres des trous d'outillage sur les surfaces ($\mathbf{P_i} = [X_i \ Y_i \ Z_i]^T$). Chaque instrument possède son propre système de coordonnées $(o-xyz)_i$ et transformé par rapport au système de coordonnées d'assemblage $(O-XYZ)_{ACS}$. La matrice de transformation généralisée du système de coordonnées de l'instrument au système de coordonnées d'assemblage est donnée par :

$$\mathbf{P_i} = \mathbf{R_i} \ p_i + \mathbf{T_i} \ \Rightarrow \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{X_i} \\ R_{Y_i} \\ R_{Z_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_{X_i} \\ T_{Y_i} \\ T_{Z_i} \end{bmatrix}$$
(2.18)

Avec $p_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$ sont les coordonnées de $\mathbf{P_i}$ dans le repère local du $i^{ème}$ instrument. $\mathbf{T_i} = [T_{X_i} \ T_{Y_i} \ T_{Z_i}]^T$ est le vecteur de translation de l'origine de $o_i - x_i y_i z_i$, et $\mathbf{R_i}$ est une matrice de rotation dont les éléments font référence aux angles d'Euler $(\omega_i, \Phi_i, \kappa_i)$ (Franceschini et al., 2016):

$$\mathbf{R_{i}} = \begin{bmatrix} C_{\omega_{i}} C_{\Phi_{i}} C_{\kappa_{i}} - S_{\omega_{i}} S_{\kappa_{i}} & -C_{\omega_{i}} C_{\Phi_{i}} S_{\kappa_{i}} - S_{\omega_{i}} C_{\kappa_{i}} & C_{\omega_{i}} C_{\Phi_{i}} \\ S_{\omega_{i}} C_{\Phi_{i}} C_{\kappa_{i}} - S_{\omega_{i}} S_{\kappa_{i}} & -S_{\omega_{i}} C_{\Phi_{i}} S_{\kappa_{i}} - C_{\omega_{i}} C_{\kappa_{i}} & C_{\omega_{i}} C_{\Phi_{i}} \\ -S_{\Phi_{i}} C_{\kappa_{i}} & S_{\Phi_{i}} S_{\kappa_{i}} & C_{\Phi_{i}} \end{bmatrix}$$
(2.19)

Avec C et S sont les sinus et cosinus respectivement.

Les six paramètres de position/orientation liés au $i^{ème}$ instrument $(X_i, Y_i, Z_i, \omega_i, \Phi_i, \kappa_i)$ ne sont jamais connus, mais peuvent être estimés à partir du processus d'étalonnage initial $(\hat{X}_i, \hat{Y}_i, \hat{Z}_i, \widehat{\omega}_i, \widehat{\Phi}_i, \hat{\kappa}_i)$. De même les valeurs de la mesure angulaire et de distance $(d_{LT}, \theta_{LT}, \varphi_{LT})$ et $(\theta_{iGPS}, \varphi_{iGPS})$ qui peuvent être estimés par la cible $(\widehat{\theta}_{iGPS}, \widehat{\varphi}_{iGPS})$ et $(\widehat{d}_{LT}, \widehat{\theta}_{LT}, \widehat{\varphi}_{LT})$ (Galetto et al., 2015).

2.5.2 Pondération des mesures

En considérant l'approche compétitive, l'estimation de la position de \hat{P} peut être obtenue en résolvant l'équation :

$$\mathbf{A}\,\widehat{P} = \mathbf{B} \tag{2.20}$$

Le système de l'équation (2.20) est résolu en donnant un poids plus faible aux mesures de l'instrument qui produisent des valeurs d'erreur plus élevées et vice versa. En appliquant l'estimateur des moindres carrés généralisé, la position tridimensionnelle de **P** est obtenue comme suit :

$$\begin{bmatrix} \widehat{P}_{\chi} \\ \widehat{P}_{y} \\ \widehat{P}_{z} \end{bmatrix} = (\mathbf{A}^{\mathsf{T}} \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^{\mathsf{T}} \mathbf{W} \mathbf{B}$$
 (2.21)

Soit Σ_P la matrice de covariance liée aux observations de chaque système de mesure, la matrice de pondération \mathbf{W} est calculée inversement proportionnelle aux erreurs de mesure des points d'intérêt comme :

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \Sigma_{\hat{P}_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \Sigma_{\hat{P}_2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \Sigma_{\hat{P}_N} \end{bmatrix}$$
 (2.22)

Puisque **W** est une matrice diagonale par blocs, l'approche la plus appropriée pour calculer \hat{P} en appliquant la loi multivariée de propagation de l'incertitude (BIPM, 2008) est d'estimer l'inverse de chaque matrice de covariance comme :

$$\widehat{\boldsymbol{\Sigma}}_{P} = (\mathbf{A}^{\mathsf{T}}\mathbf{W}\mathbf{A})^{-1} \tag{2.23}$$

L'estimateur d'incertitude des coordonnées de **P** est calculé en considérant les éléments diagonaux de la matrice de covariance $\widehat{\Sigma}_P$:

$$U_P = k \sqrt{diag(\hat{\Sigma}_P)}$$
 (2.24)

Où k est le facteur d'élargissement, l'équation (2.24) s'exprime sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix}
U_{P_x} \\
U_{P_y} \\
U_{P_z}
\end{bmatrix} = k \begin{bmatrix}
\sqrt{\widehat{\Sigma}_{P,11}} \\
\sqrt{\widehat{\Sigma}_{P,22}} \\
\sqrt{\widehat{\Sigma}_{P,33}}
\end{bmatrix}$$
(2.25)

2.6 Conclusion du Chapitre 2

Dans ce chapitre, une méthodologie d'estimation d'incertitude basé sur la simulation Monte-Carlo et la propagation des incertitudes est présenté pour évaluer l'incertitude sur un assemblage mécanique simple. Pour aboutir à l'incertitude totale, les principes de mesure de l'iGPS et du laser tracker sont modélisés. De plus, l'erreur de mesure issue de la barre vectorielle contenant les cibles est quantifiée. Le modèle permettant de quantifier l'incertitude sur un assemblage assisté par un instrument de mesure individuel est ensuite modifié pour combiner deux ou plusieurs instruments de mesure. En utilisant les techniques d'alignement des systèmes de coordonnées à travers la mesure des points en commun et les techniques de fusion de données, un assemblage assisté par l'iGPS et le laser tracker est réalisé. L'incertitude liée à cet assemblage est aussi simulée et comparée aux résultats expérimentaux.

CHAPITRE 3

APPLICATION SUR UNE ÉTUDE DE CAS

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, une étude de cas, inspirée d'une application industrielle, est étudiée pour prouver l'efficacité et l'applicabilité de la méthodologie de l'estimation d'incertitude. Les simulations et les expériences sont effectuées en cohérence avec l'ordre suivi dans la méthodologie telle que présentée dans le chapitre précédent. Le premier assemblage est assisté par l'iGPS et le deuxième et assisté par le laser tracker. Le dernier assemblage est basé sur la combinaison du laser tracker et l'iGPS. Les codes informatiques sont développés avec le langage Python.

3.2 Protocole expérimental

Dans cette étude de cas, nous simulons l'assemblage de deux pièces à l'aide d'iGPS de 7D *Kinematic Metrology Inc* et d'un laser tracker de *Leica Metrology* dans l'espace de mesure chez Amrikart. Les instruments sont étalonnés et que les erreurs systématiques sont inférieures à la limite tolérable de certification de l'équipement de mesure. Les écarts-types injectés au MCS sont définis en tenant compte des spécifications métrologiques des instruments définis par leurs fabricants (Tableau 3.7) et par la littérature scientifique associée (Chen & Du, 2017; Geosystems, 2003).

Tableau 3.1 Incertitudes du Laser tracker et de l'iGPS

L	iGPS			
$\sigma_{d_{LT}}$	$\sigma_{ heta_{LT}}$	$\sigma_{arphi_{LT}}$	$\sigma_{ heta_{iGPS}}$	$\sigma_{arphi_{iGPS}}$
$2,5.10^{-3}d_{LT}(mm)$	0.14 arcsec	0.14 arcsec	0.8 arcsec	0.3 arcsec

Generated Points 269,41 10 6 266,5 0 7 410,52 -8,940 -9,32 -41 0 8 432,38 -41 99,95 -9,14 0 533 155,58 -41 0 10 543 <u>,6</u> 4 8 9 9 9 9 0 0 Θ Θ 9 9 9 9

Pour la surface nominale, 10 points sont générés comme le montre la figure 3.1.

Figure 3.1 Points nominaux sur la pièce fixe

D'un point de vue mathématique, trois points suffisent pour définir une entité plane. Le nombre minimum recommandé de points de contact est de 9 points (Flack, 2001; Papananias, 2018). Un total de dix (10) points est supposé approprié pour couvrir la surface fonctionnelle. Pour la surface réelle, puisque nous n'avons que trois points mesurés, sept autres points sont générés pour couvrir toute la surface. Les coordonnées et les incertitudes associées sont ensuite utilisées comme données d'entrée pour la simulation de position et d'orientation. Les covariances sont supposées nulles et le traitement des données est effectué sur *Python*. Les incertitudes de mesure des observations sont estimées par MCS avec 1000 répétitions pour chaque point. Le nombre de répétitions a été retenu après validation pour s'assurer de la convergence numérique. Les équipements utilisés dans ces expériences sont présentés dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 Équipement expérimental

IGPS	Laser tracker
$4 \times \text{transmetteurs } iGPS$	Leica laser tracker LTD 800
$4 \times$ Monuments <i>iGPS</i> fixes	SMR ؽ pouce
$3 \times$ Metris barre vectorielle (G6)	Barre vectorielle pour SMR
Metris Surveyor Software	Innovmetric Polyworks Software

Comme le montre la figure 3.2, les distances entre les transmetteurs sont entre 5 m et 9 m et la distance entre les monuments est de l'ordre de 2 m.

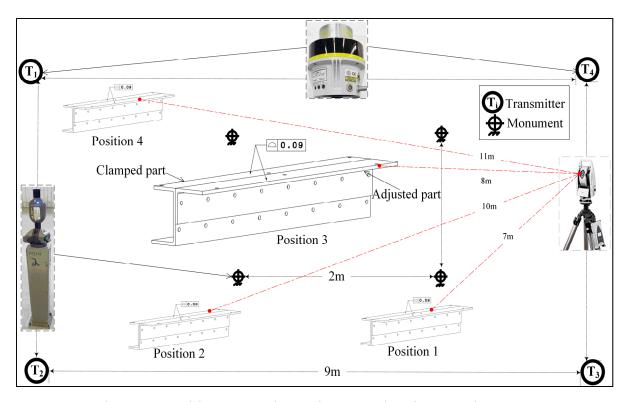


Figure 3.2 Positionnement des équipements dans l'espace de mesure

L'expérience commence par la calibration de l'iGPS à l'aide du logiciel Surveyor en se basant sur quatre (4) monuments fixes mesurés au préalable à l'aide d'un laser tracker. (Depenthal, 2009) a prouvé que la précision la plus élevée d'un iGPS utilisant quatre transmetteurs est atteinte lorsque les points mesurés sont centrés dans une configuration rectangulaire. Le laser tracker est généralement positionné à 4 m de l'objet mesuré afin de couvrir la plupart des points mesurés et donc sans repositionnement supplémentaire (Galetto et al., 2015).

La pièce fixe est serrée sur une table en marbre et calée selon les mesures de l'indicateur à cadran pour obtenir une mesure constante sur la surface, qui sera définie comme surface nominale (z=0). Les centres des trous d'outillage sur la pièce fixe sont mesurés à l'aide du premier instrument. La pièce ajustée est assemblée à la pièce serrée à l'aide de pinces après réglage et positionnement pour atteindre les exigences d'assemblage. L'ajustement est effectué à l'aide des mesures des barres vectorielles fixées sur les trous d'outillage. Puis on valide l'assemblage à l'aide d'une règle pour vérifier l'absence d'écart entre les deux surfaces.

La dernière étape consiste à mesurer l'écart maximal entre les deux surfaces en utilisant l'indicateur à cadran. Ces étapes sont répétées après pour la mesure avec le deuxième instrument et la mesure combinée. La transformation de coordonnées est la première étape qui a été effectuée pour procéder à l'assemblage combiné. Pour la mesure combinée, 12 points sont distribués dans l'espace de travail aléatoirement et qui seront mesuré par les deux instruments de mesure.

3.3 Résultats et discussions

Dans ce travail, la tâche d'assemblage a été réalisée dans quatre (4) positions réparties dans l'espace de mesure. La mesure de l'alignement a été définie comme l'accouplement des deux pièces pour atteindre la tolérance requise. Pour chaque position d'assemblage, quatre (4) répétitions (test) sont effectuées. Les tests 1 et 2 sont réalisés dans les limites de tolérance, mais les tests 3 et 4 sont réalisés volontairement hors tolérance. Le but ici est de valider la capacité de l'algorithme à prédire les incertitudes, quelle que soit la qualité de l'assemblage. L'objectif de cette étude n'est pas de réaliser un assemblage parfait, mais de démontrer la justesse de l'estimation de l'incertitude, quelles que soient les exigences de qualité. Toutes les composantes d'incertitude sont liées à la direction normale à la surface tolérancée et qui se confond avec l'axe Z selon le montage expérimental retenu.

3.3.1 iGPS

Les résultats de la simulation de l'incertitude sur les points mesurés par l'iGPS sont présentés dans le tableau 3.3

Sur l'ensemble des seize tests effectués, on remarque que l'incertitude tridimensionnelle varie entre $24 \,\mu m$ et $55 \,\mu m$. La variation est grande et c'est lié aux composantes x et y. Les incertitudes sur les coordonnées en x et y ont une variation remarquable due à l'incertitude de la barre vectorielle. L'incertitude selon x varie entre $12 \,\mu m$ et $36 \,\mu m$ et l'incertitude selon y varie entre $13 \,\mu m$ et $39 \,\mu m$. Contrairement à ces deux composantes , l'incertitude selon l'axe

z est quasiment stable pour tous les test. Elle varie entre $14 \mu m$ et $15 \mu m$ et représente la composante qui a la plus petite incertitude.

Tableau 3.3 Incertitudes sur les points mesurés par l'iGPS (μm)

	Point 1				Point 2				Point 3			
Test	x	у	Z	3 <i>D</i>	х	y	Z	3 <i>D</i>	x	у	Z	3 <i>D</i>
#1.1	12,3	38	14,7	43,7	12,7	39,2	14,8	43,8	35,7	14,1	14,7	41,1
#1.2	12,4	38,2	14,7	42,8	35	13,8	14,7	40,4	12,8	14,2	14,7	24,1
#1.3	34,7	13,7	14,6	40,1	12,6	38,5	14,7	43,1	35,4	39	14,7	54,7
#1.4	12,3	13,6	14,7	23,5	35	14	14,7	40,5	35,3	14,4	14,8	40,9
#2.1	34,6	37,7	15	53,3	35,7	38,7	15	54,7	36	14,1	15,1	41,5
#2.2	12,4	13,4	15	23,6	35,4	38,8	15	54,6	36,1	14	15,1	41,6
#2.3	12,5	13,7	15,1	23,9	35	13,9	15,1	40,6	35,8	14,3	15,1	41,4
#2.4	12,4	13,6	15	23,7	12,7	13,9	15	24,1	13,1	38,5	15,1	43,4
#3.1	12,2	37,5	14,8	42,1	34,5	13,5	14,8	39,9	12,7	13,8	14,9	24,0
#3.2	34	37,6	14,8	52,8	34,9	37,9	14,8	53,6	35	38,4	14,9	54,1
#3.3	12,4	36,6	14,8	41,4	12,6	13,6	14,8	23,7	12,8	14	14,9	24,1
#3.4	34,2	13,3	14,9	39,6	34,7	13,5	14,9	40,1	12,8	13,9	14,9	24,1
#4.1	12,6	13,5	14,9	23,7	35,4	13,6	14,9	40,7	13	14	15	24,3
#4.2	34,7	13,7	14,9	40,2	12,6	13,7	14,8	23,8	12,9	39,2	14,9	43,9
#4.3	12,6	34,8	14,8	39,9	12,8	14,1	14,9	24,2	13,1	14,1	14,9	24,3
#4.4	12,6	37,8	14,9	42,5	12,8	38,7	14,9	43,4	13	13,9	14,9	24,2

Comme présenté dans la méthodologie, les mesures des points et leurs incertitudes sont utilisées pour estimer l'incertitude sur le résultat de l'assemblage en utilisant le torseur des petits déplacements. Les résultats de ces simulations sont présentés dans le tableau 3.4. Le niveau de décalage maximal entre les deux surfaces assemblées (Gap Maximal) mesuré par l'indicateur à cadran est comparé à celui simulé à partir des mesures de l'iGPS. L'incertitude pour les deux instruments de mesure est représentée par deux fois l'écart-type des mesures (2σ) . La valeur de Δ_{IC} est l'erreur du Gap mesuré par l'iGPS par rapport à celui mesuré par l'indicateur à cadran.

Tableau 3.4 Résultats et incertitudes de l'assemblage assisté par l'iGPS (μm)

	Indic	ateur	iGPS			
Test	Gap	Gap 2\sigma		2σ	Δ_{IC}	
#1.1	38	10	11	67	27	
#1.2	32	10	22	67	10	
#1.3	374	10	363	68	11	
#1.4	302	10	293	68	9	
#2.1	28	10	20	64	8	
#2.2	12	10	7	67	5	
#2.3	274	10	280	66	6	
#2.4	295	10	287	68	8	
#3.1	22	10	17	62	5	
#3.2	29	10	22	68	7	
#3.3	294	10	285	65	9	
#3.4	310	10	301	66	9	
#4.1	27	10	22	67	5	
#4.2	26	10	18	66	8	
#4.3	380	10	373	69	7	
#4.4	372	10	361	68	11	

Le test#1.1 possède la valeur Δ_{IC} maximale de 27 μm . Concernant les autres tests, Δ_{IC} varie entre 5 μm et 11 μm ce qui prouve l'efficacité des simulations.

Pour valider la méthodologie utilisée dans l'évaluation de l'incertitude d'assemblage, la figure 3.3 présente une comparaison visuelle des résultats de l'assemblage combinés avec les barres des incertitudes pour position d'assemblage de la position #1 à la position #4.

En raison de sa haute précision, les mesures du comparateur à cadran sont censées être les mesures de référence. Les résultats de simulations sont généralement acceptables et cohérents par rapport aux mesures de l'indicateur. Vu sa grande incertitude, les résultats de l'iGPS sont à limite de la tolérance pour les tests #1.2, #2.2 et #3.2.

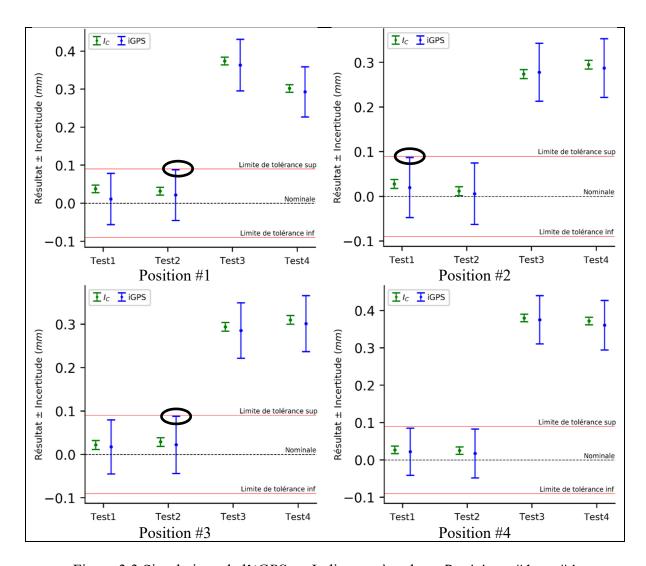


Figure 3.3 Simulations de l'iGPS vs. Indicateur à cadran: Positions #1 au #4

Bien que les intervalles qui se chevauchent montrent que les incertitudes simulées sont validées par les mesures de référence, il est important de voir l'écart entre les deux résultats pour commenter la qualité de l'assemblage. Les comparaisons entre les résultats simulés iGPS et les mesures de l'indicateur à cadran indiquent que la méthode proposée peut prédire la qualité de l'assemblage tout en évaluant les incertitudes.

3.3.2 Laser Tracker

Les résultats des simulations de l'assemblage assisté par le laser tracker sont présentés dans le tableau 3.5.

Tableau 3.5 Incertitudes sur les points mesurés par le laser tracker (μm)

	Point 1				Point 2				Point 3			
Test	х	y	Z	3 <i>D</i>	х	у	Z	3 <i>D</i>	х	у	Z	3 <i>D</i>
#1.1	6,3	37,7	4,9	38,5	4,4	24,4	5,1	25,3	7,4	24,1	5,1	25,7
#1.2	6,4	23,4	5	24,8	4,4	24,8	5,1	25,7	7,6	24,1	5,3	25,8
#1.3	6,3	23,6	4,7	24,9	4,3	37,7	4,8	38,2	5,0	23,4	5,2	24,5
#1.4	4,1	23,4	4,9	24,3	7	24,3	5	25,8	4,8	24,9	4,9	25,8
#2.1	24,7	16	4,5	29,8	24,4	26,5	4,8	36,3	14,2	16,5	4,5	22,2
#2.2	15,4	15,7	4,5	22,4	15,4	16,7	4,6	23,2	24,4	26,1	4,7	36,0
#2.3	16	16,1	4,4	23,1	24	25,8	4,6	35,5	22,8	26,5	4,4	35,2
#2.4	24,3	24,5	4,6	34,8	15,5	16,8	4,5	23,3	15,3	17,4	4,5	23,6
#3.1	25,8	4,6	5,3	26,7	25,5	4,3	5,2	26,4	37,4	4,1	5,1	38,0
#3.2	38,3	4,5	5,2	38,9	38,4	4,3	5,3	39,0	37,4	4,1	5,1	38,0
#3.3	24,7	4,5	5,1	25,6	37,9	6,5	5	38,8	24,4	6,3	5	25,7
#3.4	25	7	5,2	26,5	39	6,7	5,1	39,9	25,1	6,2	4,9	26,3
#4.1	52,6	16,8	8,3	55,8	54,1	17,7	7,6	57,4	13	14	15	24,3
#4.2	52,5	16,7	7,6	55,6	32,4	10,9	7,5	35,0	12,9	39,2	14,9	43,9
#4.3	51,9	16,3	7,9	55,0	34,6	11,7	7,6	37,3	13,1	14,1	14,9	24,3
#4.4	33,9	10,2	7,6	36,2	53,6	17,4	7,7	56,9	13	13,9	14,9	24,2

Les mesures réalisées par le laser tracker ont généralement la même allure que celles de l'iGPS. On constate une grande variation selon les axes x (entre $4 \mu m$ et $52 \mu m$) et y (entre $4 \mu m$ et $39 \mu m$). Pour l'axe z, les mesures sont stables et varient entre $4 \mu m$ et $8 \mu m$). Les résultats des tests d'assemblage réalisés par le laser tracker et leurs incertitudes sont présentés dans le tableau 3.6. Tous les tests sont dans l'intervalle de tolérance et il n'y a aucun test qui s'approche de la limite. Cela est expliqué par la valeur d'incertitude de l'instrument qui est plus petite par rapport à l'iGPS

Tableau 3.6 Résultats et incertitudes de l'assemblage assisté par le laser tracker (μm)

	Indic	ateur	Laser tracker				
Test	Gap	2σ	Gap	2σ	Δ_{IC}		
#1.1	14	10	11	22	3		
#1.2	24	10	15	23	9		
#1.3	408	10	404	21	4		
#1.4	351	10	342	23	9		
#2.1	20	10	16	21	4		
#2.2	15	10	10	20	5		
#2.3	380	10	374	20	6		
#2.4	391	10	379	20	12		
#3.1	22	10	18	23	4		
#3.2	21	10	14	23	7		
#3.3	450	10	443	21	7		
#3.4	255	10	247	22	8		
#4.1	21	10	17	34	4		
#4.2	32	10	26	35	6		
#4.3	391	10	384	384 34			
#4.4	368	10	373	34	5		

La comparaison visuelle entre les résultats simulés du laser tracker et les mesures du comparateur à cadran est illustrée à la

Figure 3.4.

Pour le test#1.4, une partie de la barre d'incertitude de l'indicateur a cadran est l'extérieur de celle du laser tracker. Dans ce cas, on ne peut pas conclure que l'assemblage se situe à l'intérieur ou pas de la tolérance exigée. Les autres tests démontrent la capacité de l'algorithme à prédire l'incertitude totale de la tâche d'assemblage en utilisant le laser tracker.

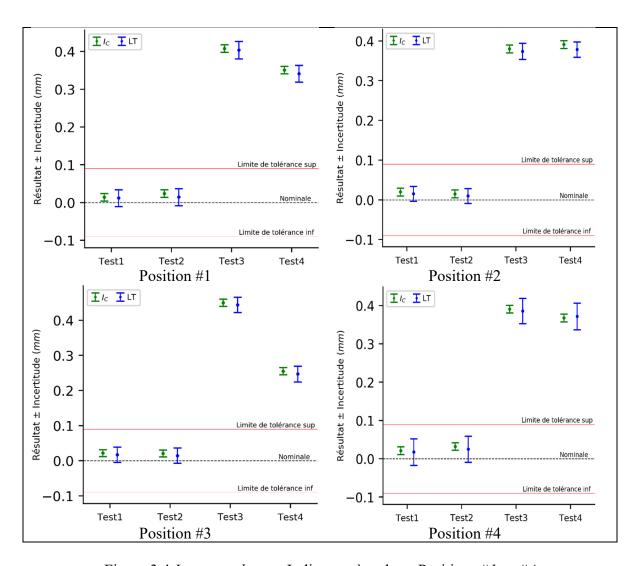


Figure 3.4 Laser tracker vs. Indicateur à cadran: Positions #1 au #4

Globalement, les tests effectués par le laser tracker ont une meilleure précisons que l'iGPS, la section suivante comprendra les résultats de la combinaison des deux instruments.

3.3.3 Assemblage combiné (iGPS + Laser Tracker)

Pour faire le bon choix du nombre de points en commun qui seront utilisés, la déviation sur la position de ces points est estimée après la transformation des coordonnés. Les résultats de l'alignement du système de coordonnées de l'iGPS par rapport à celui de l'assemblage sont présentés dans la figure 3.5.

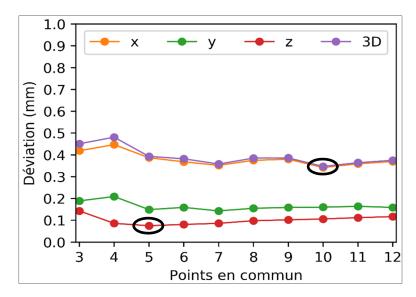


Figure 3.5 Comparaison des déviations pour l'iGPS

La déviation tridimensionnelle est minimale $(0.347 \, mm)$ lorsqu'on utilise 10 points, par contre dans notre étude de cas on s'intéresse à la déviation verticale. La déviation selon z est minimale $(0.075 \, mm)$ pour 5 points en commun.

Les résultats de l'alignement des coordonnés mesurés par le laser tracker sont illustrés dans la figure 3.6.

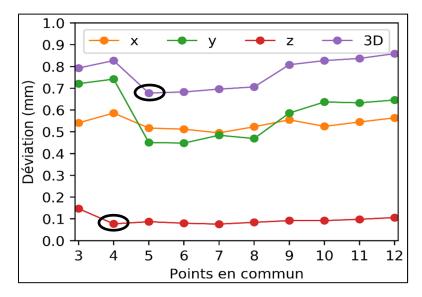


Figure 3.6 Comparaison des déviations pour le laser tracker

L'erreur tridimensionnelle est minimale (0.678 mm) lorsqu'on utilise 5 points pour l'alignement du système de coordonnées du laser tracker. L'erreur verticale est minimale (0.074 mm) si on utilise 4 points en commun. Après avoir aligné les systèmes des coordonnées des instruments, on procède à l'opération de l'assemblage.

Les résultats des simulations de l'assemblage assisté par le laser tracker et l'iGPS sont présentés dans le tableau 3.7.

Tableau 3.7 Incertitudes des points mesurés par le laser tracker et l'iGPS

	Indicateur		Laser tracker			iGPS			Combiné		
Test	Gap	2σ	Gap	2σ	Δ_{IC}	Gap	2σ	Δ_{IC}	Gap	2σ	Δ_{IC}
#1.1	20	10	16	22	4	25	66	5	14	21	6
#1.2	17	10	14	22	3	22	65	5	12	20	5
#1.3	354	10	360	21	6	363	64	9	359	21	5
#1.4	288	10	285	21	3	292	67	4	279	21	9
#2.1	18	10	21	19	3	27	68	9	20	19	2
#2.2	10	10	7	20	3	16	69	6	8	19	2
#2.3	278	10	274	20	4	270	70	8	276	19	2
#2.4	339	10	353	21	4	332	71	7	333	19	6
#3.1	25	10	15	22	10	21	65	6	16	21	9
#3.2	20	10	12	23	8	23	61	2	13	22	3
#3.3	382	10	385	23	3	377	64	5	384	22	2
#3.4	264	10	274	23	10	268	65	4	274	21	10
#4.1	29	10	33	34	4	22	65	7	31	29	2
#4.2	14	10	19	35	5	16	66	2	20	29	6
#4.3	389	10	384	34	5	375	66	9	382	29	7
#4.4	369	10	373	34	4	363	64	6	354	30	15

Dans ce tableau, Δ_{IC} est l'écart entre le gap de référence et le gap simulé par chaque système de mesure. Pour les mesures combinées, Δ_{IC} varie entre 2 μm et 15 μm . Ces valeurs sont parfois supérieures parfois inférieures aux mesures individuelles des instruments.

Par contre, les incertitudes obtenues de la combinaison du laser tracker avec l'iGPS sont inférieures aux mesures individuelles de ces instruments et très proches des incertitudes du laser tracker. Cela s'explique par la méthode de fusion des données utilisée qui est la fusion compétitive et le laser tracker a l'incertitude la plus petite.

La figure 3.7 illustre les résultats d'assemblage à partir des mesures individuelles et combinés ainsi que les barres d'incertitudes liées à ces mesures. On constate que les résultats iGPS sont à la limite de tolérance dans quatre tests et le dépasse légèrement pour les tests #1.2 et #2.1.

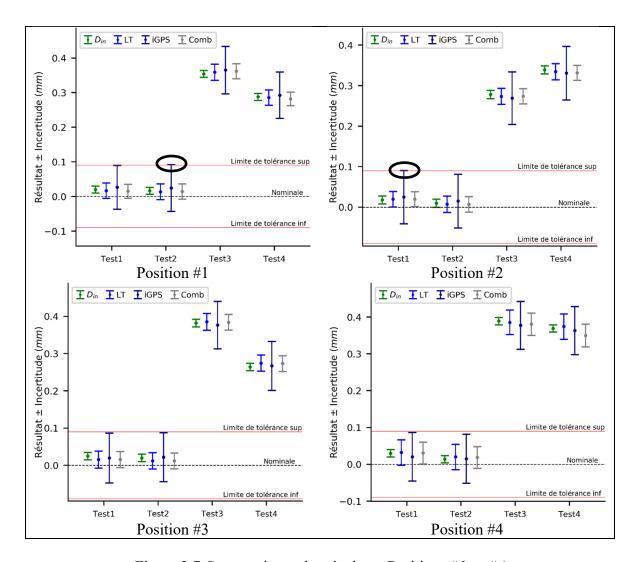


Figure 3.7 Comparaisons des résultats: Positions #1 au #4

Comme mentionné ci-dessus, les mesures combinées sont très proches des mesures individuelles du laser tracker. Étant donné que l'incertitude du système combiné est plus petite que celle du laser tracker, peut conclure que la combinaison de deux systèmes de mesures donne une meilleure estimation sur la qualité d'assemblage.

CONCLUSION

Ce projet propose un modèle d'évaluation d'incertitude qui se base sur des simulations Monte-Carlo pour une caractéristique clé d'assemblage prédéfinie. L'objectif est de quantifier l'incertitude de mesure sur le résultat d'assemblage assisté par un laser tracker et un iGPS. Le modèle est basé sur la loi de propagation de l'incertitude et le concept de torseur de petit déplacement. Ce qui permet de propager l'incertitude de l'instrument et de l'outil d'interface sur les surfaces fonctionnelles. Les expérimentations ont été menées chez Amrikart qui a fourni les instruments de mesures et l'équipement nécessaire pour l'assemblage. La simulation a été automatisée dans un environnement Python capable d'estimer l'incertitude liée à la mesure d'une caractéristique clé d'assemblage.

Les simulations ont été réalisées pour un iGPS et un Laser Tracker comme des instruments individuels. Ensuite une combinaison des deux est déployée pour réaliser l'assemblage et l'incertitude combinée a été estimée.

L'étude de cas présentée montre que les résultats de simulation de la méthode proposée sont adéquats. Les intervalles d'incertitudes du comparateur à cadran et des systèmes de mesure utilisés se chevauchent toujours, ce qui signifie que les résultats de simulation sont validés par les mesure de l'indicateur à cadran.

RECOMMANDATIONS

L'assemblage assisté par la métrologie consiste à utiliser un système de mesure pour assister les opérations de l'assemblage. Ce système doit renseigner l'opérateur sur la position et l'orientation des pièces assemblées et, plus précisément, les informations liées aux requis sur les éléments fonctionnels de ces pièces. Le but principal est de fournir une estimation des incertitudes sur l'assemblage et pas seulement de respecter les exigences fonctionnelles.

Dans notre projet, nous nous intéressons à développer une méthode générique pour réaliser un assemblage sans gabarit et estimer les incertitudes liées à cette opération. Le réseau d'instruments utilisés doit refléter tous les types existants sur le marché pour généraliser la méthodologie développée. Par contre, les instruments de mesure disponibles chez le partenaire industriel sont seulement l'iGPS et le laser de poursuite. Cette limitation n'aura pas une influence sur le projet comme tel, vu que les données issues des instruments sont généralement des angles et distances. En effet, la méthodologie finale doit se baser sur des données variées (angles et distances) pour garantir l'aspect générique.

Le bilan des incertitudes de tout le système de mesure doit comprendre les incertitudes liées aux instruments de mesure comme tels et des artéfacts employés. On s'intéresse aussi à l'incertitude algorithmique sur le calcul des coordonnées des points mesurés. Au final, nous tentons d'exprimer l'incertitude, non pas comme une erreur sur la coordonnée mesurée d'un point, mais plutôt comme une incertitude sur les requis fonctionnels exigés sur les assemblages. Le requis fonctionnel dans notre cas est une tolérance de planéité et l'assemblage effectué est appliqué sur deux surfaces planes. Il sera nécessaire de tester l'efficacité de la méthodologie sur d'autres types de requis fonctionnels et des surfaces plus complexes que celles utilisées dans nos tests.

Considérant que les cibles/artefacts sont des composantes de ce système, les incertitudes sur les positions de ces cibles, leur distribution sur les pièces ainsi que la méthode de fixation seront évaluées. Comme mentionné précédemment, ce projet s'intéresse à l'assemblage de

pièces aéronautiques. Dans ce cas, la taille des pièces peut être grande et cela exige l'utilisation de plusieurs cibles (plus que trois), d'où l'idée d'avoir une certaine redondance pour contourner la problématique imposée par la taille des pièces et par l'accessibilité des cibles/artefacts (ex. dégagement du champ de vision pour le laser de poursuite). Dans notre cas, on s'est limité à trois cibles pour chaque surface mesurée, cela était suffisant vu la taille petite des pièces utilisé mais sera insuffisant pour pièces plus grandes.

De plus, vu la grande taille des pièces, l'utilisation de positionneurs est obligatoire. Des travaux ont été publiés pour la conception et la fabrication de ces gabarits (active tooling)(Bakker, Papastathis, Popov, & Ratchev, 2013; Corona-Castuera, Rios-Cabrera, Lopez-Juarez, & Peña-Cabrera, 2005) montrent que, en en cas d'utilisation de ces positionneurs, une autre incertitude sur la position et l'orientation des pièces assemblées alourdit le bilan d'incertitude finale sur l'assemblage. Dans ce projet, on ne s'intéresse pas aux positionneurs des pièces comme tels, nous considérons que l'incertitude sur le maintien de la position est négligeable.

Concernant les défauts de forme, ils ont été ignorés dans notre hypothèse. En fait, les pièces ont été inspectées par le laser tracker et le défaut de forme maximale a été soustrait du résultat de l'assemblage. Réellement, ce défaut n'est pas constant tout au long de la surface de la pièce et a une influence sur la position des cibles fixes sur les pièces et par conséquent sur les coordonnées des points mesurés. On recommande alors de modéliser le défaut de forme par la méthode du modèle de peau (*Skin Model Shape*) qui servira à mieux simuler les erreurs de mesures et à estimer des résultats réalistes sur tous les points des surfaces fonctionnelles. Ce concept a été développé par (Schleich, Anwer, Mathieu, & Wartzack, 2014). Les formes générées sont des représentants géométriques discrets, telles que les nuages de points et les maillages de surface. Elles sont utilisées dans les simulations d'ingénierie, telles que les analyses d'assemblage ou les simulations de tolérance pour prédire le comportement du produit assemblé.

La fusion de données est une étape importante pour gérer les observations (angles et distances) reçues de différents instruments de système de mesure. On s'est limité dans notre projet à la

méthode de fusion compétitive, mais on recommande de tester aussi la fusion coopérative pour exploiter ses avantages. D'ailleurs, le principal avantage de cette méthode est l'obtention d'une mesure unique qui ne peut pas être calculée par un seul instrument (Galetto et al., 2015). De plus, lorsqu'on utilise un système avec des capteurs de redondance (un système de photogrammétrie avec un grand nombre de caméras, ou bien un ensemble de laser trackers), le résultat de mesure est plus précis que celle de l'approche compétitive (Franceschini et al., 2016).

D'après les essais effectués en études expérimentales, nous recommandons d'utiliser l'iGPS dans ce type d'assemblage pour sa facilité de manipulation. Bien que le laser tracker est caractérisé par sa haute précision par à rapport à l'iGPS, son utilisation reste plus compliquée en opération d'assemblage. En fait à chaque fois qu'il y a un obstacle, comme un poteau ou lors du passage d'un personnel devant le laser tracker, le faisceau laser est perdu. Il faudra alors déplacer la cible vers le faisceau laser pour le relier au laser tracker. Par contre, dans le cas de l'iGPS, le détecteur est relié automatiquement aux émetteurs en cas où il y a un obstacle. Ce facteur rend l'utilisation de l'iGPS en assemblage plus utile et plus flexible.

Finalement, il existe une difficulté scientifique additionnelle causée par la taille des pièces; l'effet de la gravité sur des composants souples. En effet, les pièces souples (ou non rigides) sont très courantes dans l'industrie aéronautique (ex. panneaux de revêtement, grandes pièces à parois minces, etc.) (Lindau, Andersson et al. 2012). L'utilisation des gabarits assure une rigidification des composants. Dès l'élimination du gabarit, il en devient très difficile d'assurer le suivi des composants flexibles. L'opération de conformation devient un problème où l'absence d'une solution unique a déjà été prouvée par d'autres chercheurs (Abenhaim, Tahan et al. 2011, Aidibe, Tahan et al. 2012, Mehrad, Xue et al. 2014). Dans notre projet, vu la contrainte du temps et la difficulté de contourner la problématique des pièces souples, toutes les pièces sont supposées parfaitement rigides. Inclure cet effet fera l'objet de futurs travaux de recherche.

ANNEXE I

Code Python pour l'évaluation des incertitudes du Laser Tracker et calcul du TPD

```
WFirst Step
NUncertainty on measured part: Four tests
%matplotlib inline
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
Wimport numpy, Lingle as to
from numpy import linalg as LA
from math import *
np.set_printoptions(precision=4,suppress=True)
import statistics
# Use: statistics.mean(Liste)
from statistics import mean
N Use: mean(Liste)
NUNCERTAINTIES EVALUATION FOR LASER TRACKER
#Input parameters
N 1) Define the positions of measured points[X,Y,Z] (mm)
P = np.array([[399.249481,-6738.771484,-354.295013],
                     [399.081848,-6738.623047,-385.986908], \
                     [629.500854,-6880.808594,-356.673035],\
                     [629.066528,-6880.743164,-388.440765],\
                     [818.944153,-7070.740723,-359.122375],\
                     [818.656250,-7070.580078,-390.862183],\
                     [488.645721,-6686.315918,-354.923676],\
                     [488.363251,-6686.267578,-386.684540],\
                      651.415833,-6850.734863,-356.917694]
                     [651.041748,-6850.658203,-388.663483],\
                     [848.302490,-6970.924316,-359.415588],\
                     [847.821777,-6970.934082,-391.157410],\
                     [488.618561,-6686.331543,-354.935455],\
                      488.327698,-6686.276855,-386.684265],\
                      651.377075,-6850.729004,-356.884857]
                     [651.012329,-6850.661621,-388.637207],\
                     [848.306274,-6970.927246,-359.300293],\
                     [847.820862,-6970.936523,-391.047363],\
                      488.876495,-6686.488770,-355.185669],\
                     [488.513641,-6686.428223,-386.958069],\
                     [651.592224,-6850.933594,-357.641571],\
                     [651.198914,-6850.872559,-389.332489],\
                     [848.552246,-6971.124512,-360.604645],\
                     [847.980896,-6971.101563,-392.326263],\
                      488.951904,-6686.585938,-354.070038]
                     [488.558105,-6686.448242,-385.796234],\
                     [651.695679,-6850.981934,-357.026154],\
                     [651.260559,-6850.827148,-388.764893],\
                     [848.638428,-6971.163574,-360.544952],
                     [848.028687,-6971.104980,-392.258331]], ).transpose()
W 3) Define the uncertainty of AZIMUTH ANGLE @ 1_SIGMA (ARCS_SEC)
arcsec_AZ = 0.14
N 4) Define the uncertainty of ELEVATION ANGLE @ 1_SIGMA (ARCS_SEC)
arcsec_EL = 0.14
# 5) Define the uncertainty of DISTANCE @ 1_SIGMA (mm)
#d pos1= 7
Urep_LT = 0.00692 #24 wicron @ 2_sigma
Uacc_LT = 0.01443 #50 micron @ 2_sigma
N 8) DEFINE THE NUMBER OF MEASUREMENTS PERFORMED FOR EACH SET OF POINTS
iter = 1000
#DISTANCES ET ANGLES)
R = np.size(P,1)
                     # Nombre des points(SMR) à Localiser
```

```
W Initialisation
d = np.zeros([R])
phi = np.zeros([R])
theta = np.zeros([R])
u_rep = np.zeros([R])
u_acc = np.zeros([R])
u_d = np.zeros([R])
for j in np.arange (0,R):
    # distances LT-SMR
                          d=sqrt(x^{**2} + y^{**2} + z^{**2})
    d[j] = sqrt(P[0,j]**2 + P[1,j]**2 + P[2,j]**2)
    # elevation angles
    P[j] = acos(P[2,j]/(sqrt(P[0,j]**2 + P[1,j]**2 + P[2,j]**2)))
    # azimuth angles
    theta[j] = atan2( (P[1,j]), (P[0,j]))
    u_rep[j]= Urep_LT+ ((d[j]/1000 -2.5)*0.001443)
    u_acc[j]= Uacc_LT+ ((d[j]/1000 -2.5)*0.002886)
u_d[j]=sqrt(u_rep[j]**2 + u_acc[j]**2)
# Repeatability
u_AZ = (arcsec_AZ/3600) * (pi/180) Wincertitude sur L'angle azimuth
u_EL = (arcsec_EL/3600) * (pi/180) Wincertitude sur L'angle elevation
# Initialisation
Pxyz_rep = np.zeros((R,3,iter))
ptCloud=np.zeros((R,3,iter))
form_error=np.zeros((iter))
Walpha=np.zeros((îter))
for k in np.arange (0,iter):
    w = np.random.randn(R) * u_AZ # random angle error
    n = np.random.randn(R) * u_EL
    U_d = np.random.randn(R) * u_d # distance
    for j in np.arange (0,R): # detectors number
         # angles transform
        \label{eq:pxyz_rep[j,:,k] = sin(phi[j]+n[j])*cos(theta[j]+w[j])*(d[j]+U_d[j])} Pxyz\_rep[j,:,k] = sin(phi[j]+n[j])*cos(theta[j]+w[j])*(d[j]+U_d[j])
         sin(phi[j]+n[j])*sin(theta[j]+w[j])*(d[j]+U_d[j]), cos(phi[j]+n[j])*(d[j]+U_d[j])
# Initialisation
Xrec_rep = np.zeros((1,R))
Yrec_rep = np.zeros((1,R))
Zrec_rep = np.zeros((1,R))
ux = np.zeros((1,R))
uy = np.zeros((1,R))
uz = np.zeros((1,R))
for j in np.arange (0,R):
    Zrec_rep[:,j] = np.mean(Pxyz_rep[j,2:3,:]) # Z moyen
    ux[:,j] = np.std(Pxyz\_rep[j,0:1,:]) \quad \# \ incertitude \ type \ en \ X
    uy[:,j] = np.std(Pxyz_rep[j,1:2,:]) # incertitude type en Y
    uz[:,j] = np.std(Pxyz_rep[j,2:3,:]) # incertitude type en Z
Huy = uy / sqrt(2)
Nuz = uz / sqrt(2)
W Coordinates
print(uz)
Prec_rep = [Xrec_rep, Yrec_rep, Zrec_rep]
u_1sig=np.stack((ux,uy,uz))
u\_1sig=u\_1sig.reshape(np.size(P[:,0]),np.size(P[0,:]))
Mu\_1sig= np.array([[ux], \{[uy], \{[uz], \{[np.sqrt(ux**2+ uy**2+uz**2)]\})
# 1 sigma
tux=2*ux
tuy=2*uy
tuz=2*uz
u_2sig = 2*u_1sig
```

```
PM = np.array([[535.087081,0.149985,39.607309],\
                      [535.024793,0.029972,7.914912], \
                      [266.377517,-31.330759,39.759798],\
                      [266.472178,-31.220460,7.989364],\
                      [-0.048873,0.068786,39.606844],\
                      [-0.009706,0.013660,7.865396],\
                      [497.525258,-96.456316,39.645473],\
                      [497.490295,-96.426811,7.883349],\
                      [267.849651,-68.513697,39.628114],\
                      [267.904238,-68.449508,7.880141],\
                      [38.858732,-96.426867,39.290355],\
                      [38.943347,-96.228728,7.545623],\
                      [497.536756,-96.427251,39.633491],\
                      [497.512422,-96.397476,7.883325],\
                      [267.883976,-68.494133,39.660577],\
                      [267.925424,-68.428485,7.906155],\
                      [38.854987,-96.426526,39.405688],\
                      [38.943542,-96.225871,7.655663],\
                      [497.234678,-96.464837,39.386118],\
                      [497.270220,-96.395070,7.611685],\
                      [267.581494,-68.469749,38.986473],\
                      [267.641957,-68.381191,7.213237],\
                      [38.527939,-96.428870,38.104234],\
                      [38.704111,-96.200081,6.378776],\
                      [497.125317,-96.431636,40.502674],\
                      [497.233410,-96.403013,8.773932],\
                      [267.475924,-68.493940,39.522954],\
                      [267.626911,-68.453124,7.781240],\
                      [38.436659,-96.451505,38.164829],\
                     [38.665126,-96.226822,6.447153]], ).transpose()
U_Totale_x=[]
PT=np.size(PM[0,:])
U tot x=np.zeros((1,15))
Wprint(U_tot[0,10])
Wfor m in np.arange (0, PT/2, dtype=int):
for q in np.arange (0, PT, 2, dtype=int):
    if u_1sig[0,q] < u_1sig[0,q+1]:
        U_tot_x=round((u_1sig[0,q+1]*PM[2,q])/(PM[2,q]-PM[2,q+1]),4)
        #print(U_tot)
    else:
        U_{tot_x=round((u_1sig[0,q+1]*(PM[2,q]-PM[2,q+1]))/(PM[2,q]),4)}
        #print(U_tot)
    U_Totale_x.append(U_tot_x)
print(U_Totale_x)
U Totale y=[]
PT=np.size(PM[0,:])
#PX=PT/2
U_tot_y=np.zeros((1,15))
Wprint(U_tot[0,10])
Wfor m in np.arange (0, PT/2, dtype=int):
for q in np.arange (0, PT, 2, dtype=int):
    if u_1sig[1,q]<u_1sig[1,q+1]:
        \label{eq:u_tot_y=round} U\_tot\_y=round((u\_1sig[1,q+1]*PM[2,q])/(PM[2,q]-PM[2,q+1]),4)
        #print(U_tot)
        U_{tot_y=round((u_1sig[1,q+1]*(PM[2,q]-PM[2,q+1]))/(PM[2,q]),4)}
        #print(U_tot)
    U_Totale_y.append(U_tot_y)
U_Totale_z=[]
PT=np.size(PM[0,:])
U_tot_z=np.zeros((1,15))
```

```
%matplotlib inline
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy.matlib
from numpy import linalg as LA
from math import *
np.set_printoptions(precision=4,suppress=True)
import statistics
W Use: statistics.mean(Liste)
from statistics import mean
def Positioning ():
    origin = np.zeros(3)
    FRAME_NOM =np.array([[535,0,0],\
                     [266.5, -31, 0],\
[0, 0, 0]],)
    FRAME_MESS=np.array([[535.009,0,0],\
                     [266.496, -31, 0],\
                     [0, 0, 0]], )
    pts=np.array([[-9.32, -41, 0],\
              [99.95, -9.14, 0],\
              [155.58, -41, 0],\
              [269.41, -10, 0],\
              [410.52, -8.94, 0],\
[432.38, -41, 0],\
              [543, -41, 0]], )
    NDÉTERMINATION DU CENTRE DE MASSE DES FRAMES
    PTS_OBSERV = origin
    # Centre de masse du frame de référence
    barycentre_NOM = np.mean(FRAME_NOM,0)
    #print(barycentre_NOM)
    tranx1 = np.random.randn(1,1)*U Totale x[0]
    tranx2 = np.random.randn(1,1)*U_Totale_x[1]
    tranx3 = np.random.randn(1,1)*U_Totale_x[2]
    tranX = np.concatenate((tranx1,tranx2,tranx3),axis=1)
    #print(tranX)
    trany1 = np.random.randn(1,1)*U_Totale_y[0]
    trany2 = np.random.randn(1,1)*U_Totale_y[1]
    trany3 = np.random.randn(1,1)*U_Totale_y[2]
    tranY = np.concatenate((trany1, trany2, trany3), axis=1)
    #print(trany)
    tranz1 = np.random.randn(1,1)*U_Totale_z[0]
    tranz2 = np.random.randn(1,1)*U_Totale_z[1]
    tranz3 = np.random.randn(1,1)*U_Totale_z[2]
    tranZ = np.concatenate((tranz1,tranz2,tranz3),axis=1)
    #print(tranZ)
    dev = np.concatenate((tranX,tranY,tranZ),axis=0).transpose()
    #print(dev)
       #Composition du frame dévié (mesuré)
    FRAME_MES = FRAME_MESS + dev
    W Centre de masse du frame dévié (mesuré)
    barycentre_MES = np.mean(FRAME_MES,0)
    """ DÉTERMINATION DES MATRICES DE TRANSLATION ET ROTATION"""
    #for i = 1:iter
    # Construction de La matrice de "coût"
    H = np.zeros([3,3])
```

```
%matplotlib inline
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy.matlib
from numpy import linalg as LA
from math import *
np.set_printoptions(precision=4,suppress=True)
import statistics
W Use: statistics.mean(Liste)
from statistics import mean
def Positioning ():
   origin = np.zeros(3)
   FRAME_NOM =np.array([[535,0,0],\
                    [266.5, -31, 0],\
[0, 0, 0]],)
   FRAME_MESS=np.array([[535.889,0,0],\
                     [266.496, -31, 0],\
                     [0, 0, 0]], )
   pts=np.array([[-9.32, -41, 0],\
              [99.95, -9.14, 0],\
              [155.58, -41, 0],\
              [269.41, -10, 0],\
[410.52, -8.94, 0],\
              [432.38, -41, 0],\
              [543, -41, 0]], )
   #DÉTERMINATION DU CENTRE DE MASSE DES FRAMES
   PTS_OBSERV = origin
   # Centre de masse du frame de référence
   barycentre_NOM = np.mean(FRAME_NOM,0)
   #print(barycentre_NOM)
   tranx1 = np.random.randn(1,1)*U Totale x[0]
   tranx2 = np.random.randn(1,1)*U_Totale_x[1]
   tranx3 = np.random.randn(1,1)*U_Totale_x[2]
   tranX = np.concatenate((tranx1,tranx2,tranx3),axis=1)
   #print(tranX)
   trany1 = np.random.randn(1,1)*U_Totale_y[0]
   trany2 = np.random.randn(1,1)*U_Totale_y[1]
   trany3 = np.random.randn(1,1)*U_Totale_y[2]
   tranY = np.concatenate((trany1,trany2,trany3),axis=1)
   #print(tranY)
   tranz1 = np.random.randn(1,1)*U_Totale_z[0]
   tranz2 = np.random.randn(1,1)*U_Totale_z[1]
   tranz3 = np.random.randn(1,1)*U_Totale_z[2]
   tranZ = np.concatenate((tranz1,tranz2,tranz3),axis=1)
   #print(tranZ)
   dev = np.concatenate((tranX,tranY,tranZ),axis=0).transpose()
   #print(dev)
       #Composition du frame dévié (mesuré)
   FRAME_MES = FRAME_MESS + dev
   W Centre de masse du frame dévié (mesuré)
   barycentre_MES = np.mean(FRAME_MES,0)
   """ DÉTERMINATION DES MATRICES DE TRANSLATION ET ROTATION"""
   #for i = 1:iter
   # Construction de La matrice de "coût"
   H = np.zeros([3,3])
```

```
WTORSEUR DES PETITS DÉPLACEMENTS
 W (Points déviés selon une distribution normale, tirages Monte-Carlo)
%matplotlib inline
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy.matlib
from numpy import linalg as LA
from math import *
np.set_printoptions(precision=4,suppress=True)
import statistics
W Use: statistics.mean(Liste)
from statistics import mean
def Positioning ():
   origin = np.zeros(3)
    FRAME_NOM = np.array([[496.42,-96.5,-0.03], \
                      [534.71,-70,-0.03], \
                      [495,-50,-0.03],
                      [266.09, -68.41, 0.114],\
                      [380, -50, 0.114],\
[180, -96.6, 0.114],\
                      [37.95, -96.5,-0.058],\
                      [39, -50, -0.058],\
                      [0.352, -68.41,-0.058]], dtype=float)
    FRAME_MESS = np.array([[496.2,-96.39,-0.454], \
                      [534.1,-70.2,-0.454], \
                      [495.42,-50.2,-0.454], \
                     [266.93, -68.5, -0.855],\
[380.2, -50.2, -0.855],\
[180.2, -96.39, -0.855],\
                      [37.5, -96.22, -1.522],\
                      [39.2, -50.3, -1.522],\
                      [0.52, -68.5, -1.522]], dtype=float)
    ADÉTERMINATION DU CENTRE DE MASSE DES FRAMES
    PTS OBSERV = origin
    # Centre de masse du frame de référence
    barycentre_NOM = np.mean(FRAME_NOM,0)
    Wprint(barycentre_NOM)
    tranx1 = np.random.randn(3,1)*0.019661
    tranx2 = np.random.randn(3,1)*0.019988
    tranx3 = np.random.randn(3,1)*0.020372
    tranX = np.concatenate((tranx1,tranx2,tranx3),axis=0)
    trany1 = np.random.randn(3,1)*0.020780
    trany2 = np.random.randn(3,1)*0.021319
    trany3 = np.random.randn(3,1)*0.021868
    tranY = np.concatenate((trany1,trany2,trany3),axis=0)
    tranz1 = np.random.randn(3,1)*0.014025
    tranz2 = np.random.randn(3,1)*0.013999
    tranz3 = np.random.randn(3,1)*0.014111
    tranZ = np.concatenate((tranz1,tranz2,tranz3),axis=0)
    dev = np.concatenate((tranX,tranY,tranZ),axis=1)
        #Composition du frame dévié (mesuré)
    FRAME_MES = FRAME_MESS + dev
    # Centre de masse du frame dévié (mesuré)
    barycentre_MES = np.mean(FRAME_MES,0)
```

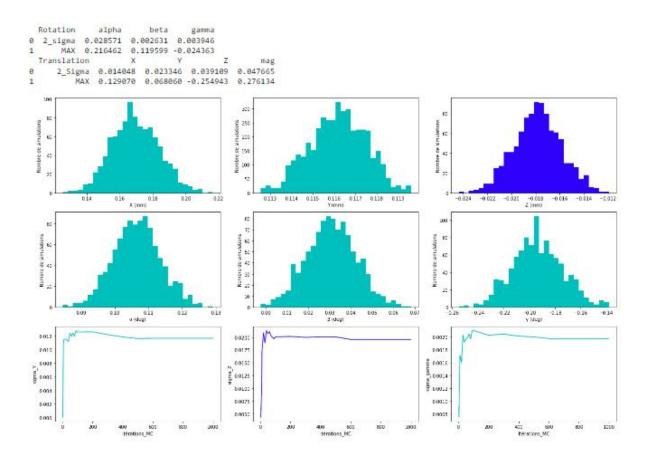
```
""" DÉTERMINATION DES MATRICES DE TRANSLATION ET ROTATION"""
   #for i = 1:iter
   # Construction de La matrice de "coût"
   H = np.zeros([3,3])
   for j in np.arange (0,FRAME_NOM.shape[0]):
        H = H + np.dot(((FRAME_NOM[j,:] - [barycentre_NOM]).transpose()) , (FRAME_MES[j,:] - [barycentre_MES]))
    # Décomposition en valeurs singulières de la matrice de "coût"
    [u,s,v] = np.linalg.svd(H )
    # Matrice de rotation qui minimise le coût (meilleur best-fit)
    R = np.zeros([3,3])
    R =np.matmul(v,u).transpose()
    # Expression de La meilleure transformation globale 4x4
    transform_NOM = np.identity(4)
   transform_MES = np.identity(4)
    transform_R = np.identity(4)
    transform_NOM[0:3,3] = -barycentre_NOM.transpose()
   transform_R[0:3,0:3] = R
    transform_MES[0:3,3] = barycentre_MES
   TRANSFORM_GLOB = np.matmul(transform_MES,np.matmul(transform_R,transform_NOM))
    # Translation du point d'observation (origine du frame)
   \label{eq:trans} Trans = (barycentre\_MES - PTS\_OBSERV) - np.matmul(R \ , \ (barycentre\_NOM - PTS\_OBSERV) . transpose()). transpose()) \\
    # Conversion de La matrice de rotation en angles d'Euler dans le repère de L'avion
   r31 = np.squeeze(R[2,0]) * 180 / pi
   rot_Y = -np.arcsin(r31) # rotation en pitch
   r32 = np.squeeze(R[2,1])
   r33 = np.squeeze(R[2,2])
   rot_X = np.arctan2(r32,r33) * 180 / pi # rotation en roll
   r21 = np.squeeze(R[1,0])
   r11 = np.squeeze(R[0,0])
   rot_Z = np.arctan2(r21,r11) * 180 / pi # rotation en yaw
    rotation=np.zeros([3,1])
   rotation=np.array([[rot_X],[rot_Y],[rot_Z]])
   TR_3D = sqrt(Trans[0]**2 + Trans[1]**2 + Trans[2]**2)
   Trans_resh=np.append(Trans,TR_3D).transpose()
   Translation=Trans_resh.reshape([4,1])
   TPD = np.concatenate((rotation, Translation), axis=0)
   return TPD
tor_statistic = np.zeros([7,1000])
stdv = np.zeros([1,1000])
for i in range(0,1000):
   tor_statistic[:,i] = Positioning()[:,0]
   stdv[:,i]= np.std(tor_statistic[1,0:6])
stdv_rot_X= np.std(tor_statistic[0:1,:])
stdv_rot_Y= np.std(tor_statistic[1:2,:])
stdv_rot_Z= np.std(tor_statistic[2:3,:])
Max_Rot_X=np.max(tor_statistic[0:1,:])
Max_Rot_Y=np.max(tor_statistic[1:2,:])
Max_Rot_Z=np.min(tor_statistic[2:3,:])
stdv_trans_X= np.std(tor_statistic[3:4,:])
stdv_trans_Y= np.std(tor_statistic[4:5,:])
stdv_trans_Z= np.std(tor_statistic[5:6,:])
Magnitude_trans_XYZ= 2*sqrt(stdv_trans_X**2 + stdv_trans_Y**2 + stdv_trans_Z**2)
```

```
Max_Rot_X=np.max(tor_statistic[0:1,:])
Max Rot Y=np.max(tor statistic[1:2,:])
Max_Rot_Z=np.min(tor_statistic[2:3,:])
stdv_trans_X= np.std(tor_statistic[3:4,:])
stdv_trans_Y= np.std(tor_statistic[4:5,:])
stdv_trans_Z= np.std(tor_statistic[5:6,:])
Magnitude_trans_XYZ= 2*sqrt(stdv_trans_X**2 + stdv_trans_Y**2 + stdv_trans_Z**2)
Max_Transl_X=np.max(tor_statistic[3:4,:])
Max_Transl_Y=np.max(tor_statistic[4:5,:])
Max_Transl_Z=np.min(tor_statistic[5:6,:])
Max Transl XYZ=np.max(tor_statistic[6:7,:])
z_min = np.min(tor_statistic[5,:])
z_mean = np.mean(tor_statistic[5,:])
z_max = np.max(tor_statistic[5,:])
from pandas import DataFrame
data = {'Rotation': ['2_sigma', 'MAX'],
        'alpha': [2*stdv_rot_X,Max_Rot_X],
        'beta': [2*stdv_rot_Y,Max_Rot_Y],
        'gamma': [2*stdv_rot_Z,Max_Rot_Z]
df_Rotation = DataFrame(data, columns= ['Rotation', 'alpha', 'beta', 'gamma'])
print (df_Rotation)
from pandas import DataFrame
data = {'Translation': ['2_Sigma', 'MAX'],
        'X': [2*stdv_trans_X,Max_Trans1_X],
        'Y': [2*stdv_trans_Y,Max_Trans1_Y],
        'Z': [2*stdv_trans_Z,Max_Trans1_Z],
        'mag': [Magnitude_trans_XYZ,Max_Trans1_XYZ]
df Translation = DataFrame(data, columns= ['Translation', 'X','Y','Z','mag'])
print (df_Translation)
# funtion
def multiple_dfs(df_list, sheets, file_name, spaces):
    writer = pd.ExcelWriter(file_name,engine='xlsxwriter')
    row = 0
    for dataframe in df_list:
       dataframe.to excel(writer, sheet name=sheets, startrow=row , startcol=0)
       row = row + len(dataframe.index) + spaces + 1
    writer.save()
W List of dataframes
dfs = [df_Rotation,df_Translation]
# run function
multiple_dfs(dfs, 'TR_igps_pos1_defaut1', 'TR_igps_pos1_defaut1.xlsx', 1)
```

```
stdv mc X = np.array([[np.std(tor_statistic[3,0:2])], \
                     [np.std(tor_statistic[3,0:4])], \
[np.std(tor_statistic[3,0:7])], \
                     [np.std(tor_statistic[3,0:10])],
                     [np.std(tor_statistic[3,0:20])],
                     [np.std(tor statistic[3,0:30])],
                     [np.std(tor_statistic[3,0:40])],
                     [np.std(tor_statistic[3,0:50])],
                     [np.std(tor_statistic[3,0:60])],
                     [np.std(tor_statistic[3,0:70])],
[np.std(tor_statistic[3,0:80])],
                     [np.std(tor_statistic[3,0:90])], \
                     [np.std(tor_statistic[3,0:100])], \
                     [np.std(tor_statistic[3,0:200])],
                     [np.std(tor_statistic[3,0:300])],
                     [np.std(tor_statistic[3,0:400])],
                     [np.std(tor_statistic[3,0:500])],
                     [np.std(tor_statistic[3,0:1000])],
                     [np.std(tor_statistic[3,0:4000])],
                     [np.std(tor_statistic[3,0:7000])],
                     [np.std(tor_statistic[3,0:9999])]], dtype=float)
stdv_mc_Y = np.array([[np.std(tor_statistic[4,0:2])], \
                     [np.std(tor_statistic[4,0:4])],
                     [np.std(tor_statistic[4,0:7])], \
                     [np.std(tor_statistic[4,0:10])],
                     [np.std(tor_statistic[4,0:20])],
                     [np.std(tor statistic[4,0:30])],
                     [np.std(tor_statistic[4,0:40])],
                     [np.std(tor_statistic[4,0:50])],
                     [np.std(tor_statistic[4,0:60])],
                     [np.std(tor_statistic[4,0:70])],
                     [np.std(tor_statistic[4,0:80])],
                     [np.std(tor_statistic[4,0:90])],
                     [np.std(tor_statistic[4,0:100])],
                     [np.std(tor_statistic[4,0:200])],
                     [np.std(tor_statistic[4,0:300])],
                     [np.std(tor_statistic[4,0:400])],
                     [np.std(tor_statistic[4,0:500])],
                     [np.std(tor_statistic[4,0:1000])],
                     [np.std(tor_statistic[4,0:4000])], \
                     [np.std(tor_statistic[4,0:7000])],
                     [np.std(tor statistic[4,0:9999])]], dtype=float)
stdv_mc_Z = np.array([[np.std(tor_statistic[5,0:2])], \
                     [np.std(tor_statistic[5,0:4])],
                     [np.std(tor_statistic[5,0:7])], \
                     [np.std(tor_statistic[5,0:10])],
[np.std(tor_statistic[5,0:20])],
                     [np.std(tor_statistic[5,0:30])],
                     [np.std(tor_statistic[5,0:40])],
                     [np.std(tor_statistic[5,0:50])],
                     [np.std(tor_statistic[5,0:60])],
                     [np.std(tor_statistic[5,0:70])],
                     [np.std(tor_statistic[5,0:80])],
                     [np.std(tor_statistic[5,0:90])], \
[np.std(tor_statistic[5,0:100])],
                     [np.std(tor_statistic[5,0:200])],
                     [np.std(tor_statistic[5,0:300])],
                     [np.std(tor_statistic[5,0:400])],
                     [np.std(tor_statistic[5,0:500])], \
                     [np.std(tor_statistic[5,0:1000])], \
                      [np.std(tor_statistic[5,0:4000])],
                     [np.std(tor_statistic[5,0:7000])],
                     [np.std(tor_statistic[5,0:9999])]], dtype=float)
```

```
stdv_mc_alpha = np.array([[np.std(tor_statistic[0,0:2])], \
                     [np.std(tor_statistic[0,0:4])], \
                     [np.std(tor_statistic[0,0:7])],
                     [np.std(tor_statistic[0,0:10])],
                     [np.std(tor_statistic[0,0:20])],
                     [np.std(tor_statistic[0,0:30])],
                     [np.std(tor_statistic[0,0:40])],
                     [np.std(tor_statistic[0,0:50])],
                     [np.std(tor_statistic[0,0:60])],
                     [np.std(tor_statistic[0,0:70])],
                     [np.std(tor_statistic[0,0:80])], \
                     [np.std(tor_statistic[0,0:90])],
                     [np.std(tor_statistic[0,0:100])],
                     [np.std(tor_statistic[0,0:200])], \
                     [np.std(tor_statistic[0,0:300])],
                     [np.std(tor_statistic[0,0:400])], \
                     [np.std(tor_statistic[0,0:500])], \
                     [np.std(tor_statistic[0,0:1000])],
                     [np.std(tor_statistic[0,0:4000])], \
                     [np.std(tor_statistic[0,0:7000])],
                     [np.std(tor_statistic[0,0:9999])]], dtype=float)
stdv_mc_beta = np.array([[np.std(tor_statistic[1,0:2])], \
                     [np.std(tor_statistic[1,0:4])],
                     [np.std(tor_statistic[1,0:7])], \
                     [np.std(tor_statistic[1,0:10])],
                     [np.std(tor_statistic[1,0:20])],
                    [np.std(tor_statistic[1,0:30])],
[np.std(tor_statistic[1,0:40])],
                     [np.std(tor_statistic[1,0:50])],
                     [np.std(tor_statistic[1,0:60])],
                     [np.std(tor_statistic[1,0:70])],
                     [np.std(tor_statistic[1,0:80])],
                     [np.std(tor_statistic[1,0:90])],
                     [np.std(tor_statistic[1,0:100])],
                     [np.std(tor_statistic[1,0:200])], \
                     [np.std(tor statistic[1,0:300])], \
                     [np.std(tor_statistic[1,0:400])],
                     [np.std(tor_statistic[1,0:500])], \
                     [np.std(tor_statistic[1,0:1000])],
                     [np.std(tor_statistic[1,0:4000])], \
                     [np.std(tor_statistic[1,0:7000])],
                     [np.std(tor_statistic[1,0:9999])]], dtype=float)
stdv_mc_gamma = np.array([[np.std(tor_statistic[2,0:2])], \
                     [np.std(tor_statistic[2,0:4])], \
                     [np.std(tor_statistic[2,0:7])], \
                     [np.std(tor_statistic[2,0:10])],
                     [np.std(tor_statistic[2,0:20])],
                     [np.std(tor_statistic[2,0:30])],
                     [np.std(tor_statistic[2,0:40])],
                     [np.std(tor_statistic[2,0:50])],
                     [np.std(tor_statistic[2,0:60])],
                     [np.std(tor_statistic[2,0:70])],
                     [np.std(tor_statistic[2,0:80])],
                     [np.std(tor_statistic[2,0:90])],
                     [np.std(tor_statistic[2,0:100])], \
                     [np.std(tor_statistic[2,0:200])],
                     [np.std(tor_statistic[2,0:300])],
                     [np.std(tor_statistic[2,0:400])], \
                     [np.std(tor_statistic[2,0:500])],
                     [np.std(tor_statistic[2,0:1000])],
                     [np.std(tor_statistic[2,0:4000])], \
                    [np.std(tor_statistic[2,0:7000])], \
[np.std(tor_statistic[2,0:9999])]], dtype=float)
fig_positioning = plt.figure(figsize=(22,13), constrained_layout=False )
```

```
ax = fig positioning.add subplot(3,3,1)
ax.hist(tor_statistic[0,:],30, color="c")
ax.set_xlabel('X (nm)')
ax.set_ylabel('Nombre de simulations')
Wplt.xLim(-0.2, 0.2)
ax = fig_positioning.add_subplot(3,3,2)
ax.hist(tor_statistic[1,:],30, color="c",density=1)
ax.set_xlabel('Y (mm)')
ax.set_ylabel('Nombre de simulations')
ax = fig_positioning.add_subplot(3,3,3)
ax.hist(tor_statistic[2,:],30, color="b")
ax.set xlabel('Z (nm)')
ax.set_ylabel('Nombre de simulations')
Wplt.xlim(-100, 100)
ax = fig_positioning.add_subplot(3,3,4)
ax.hist(tor_statistic[3,:],30, color="c")
ax.set_xlabel('q (deg)')
ax.set_ylabel('Nombre de simulations')
ax = fig_positioning.add_subplot(3,3,5)
ax.hist(tor_statistic[4,:],30, color="c")
ax.set_xlabel('β (deg)')
ax.set ylabel('Nombre de simulations')
ax = fig_positioning.add_subplot(3,3,6)
ax.hist(tor_statistic[5,:],30, color="c")
ax.set_xlabel('y (deg)')
ax.set_ylabel('Nombre de simulations');
ax = fig_positioning.add_subplot(3,3,7)
x = np.array([2, 4, 7, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 999])
y = stdv_mc_Y
plt.plot(x, y, color="c")
plt.ylabel('sigma_Y')
plt.xlabel("Iterations_MC")
ax = fig_positioning.add_subplot(3,3,8)
x = np.array([2, 4, 7, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 999])
y = stdv_mc_Z
plt.plot(x, y, color="b")
plt.ylabel('sigma_Z')
plt.xlabel("Itérations MC")
ax = fig_positioning.add_subplot(3,3,9)
x = np.array([2, 4, 7, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80,
pe, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 999])
y = stdv_mc_gamma
plt.plot(x, y, color="c")
plt.ylabel('sigma_gamma')
plt.xlabel("Iterations MC")
plt.show()
```



LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASME. (2006). Performance Evaluation of Laser-based Spherical Coordinate Measurement Systems: American Society of Mechanical Engineers.
- Bakker, O. J., Papastathis, T., Popov, A. A., & Ratchev, S. (2013). Active fixturing: literature review and future research directions. *International Journal of Production Research*, 51(11), 3171-3190.
- Bell, S. (1999). A beginner's guide to uncertainty of measurement. *Measurement good practice guide*, 11, 1.
- BIPM. (2008). Evaluation of measurement data—guide for the expression of uncertainty in measurement. JCGM 100: 2008. *Citado en las, 167*.
- Brunson. (2012). 2012 Brunson SMR Target Holders & Accessories Catalog. Retrieved from https://www.gfk-leica.ru/files/catfiles/brunson/Brunson SMR Target Holders.pdf
- Calkins, J. M. (2004). Quantifying coordinate uncertainty fields in coupled spatial measurement systems.
- 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.
- 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.
- 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), 107-128.
- Cheng, C. H., Huo, D., Zhang, X., Dai, W., & Maropoulos, P. G. (2010). Large volume metrology process model: measurability analysis with integration of metrology classification model and feature-based selection model. Paper presented at the Proceedings of the 6th CIRP-Sponsored International Conference on Digital Enterprise Technology.
- Cheng, Y., Xu, Y.-h., Huang, X.-l., & Wang, L. (2020). Accuracy Control of Big-scale Space 3D Measurement System in Aircraft Digital Assembly. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Conte, J., Majarena, A., Acero, R., Santolaria, J., & Aguilar, J. (2015). Performance evaluation of laser tracker kinematic models and parameter identification. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77(5-8), 1353-1364.
- Corona-Castuera, J., Rios-Cabrera, R., Lopez-Juarez, I., & Peña-Cabrera, M. (2005). *An approach for intelligent fixtureless assembly: Issues and experiments*. Paper presented at the Mexican International Conference on Artificial Intelligence.
- Corrado, A., & Polini, W. (2017). Assembly design in aeronautic field: From assembly jigs to tolerance analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 231*(14), 2652-2663.
- Cox, M., Dainton, M., Forbes, A., Harris, P., Schwenke, H., Siebert, B., & Wöger, W. (2001). Use of Monte Carlo simulation for uncertainty evaluation in metrology. In *Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology V* (pp. 93-105): World Scientific.

- Cuypers, W., Van Gestel, N., Voet, A., Kruth, J.-P., Mingneau, J., & Bleys, P. (2009). Optical measurement techniques for mobile and large-scale dimensional metrology. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(3-4), 292-300.
- Deng, Z., Li, S., & Huang, X. (2018). Uncertainties evaluation of coordinate transformation parameters in the large-scale measurement for aircraft assembly. *Sensor Review*.
- Depenthal, C. (2009). *IGPS-A new system for static and kinematic measurements*. Paper presented at the Proc. 9th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, July 2009.
- Depenthal, C. (2010). *iGPS used as kinematic measuring system*. Paper presented at the FIG Congress 2010-Facing the Challenges-Building the Capacity.
- Ferri, C., Mastrogiacomo, L., & Faraway, J. (2010). Sources of variability in the set-up of an indoor GPS. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 23(6), 487-499.
- Flack, D. (2001). Measurement Good Practice Guide No. 43. *Callipers and Micrometers*. *National Physical Laboratory*.
- Forbes, A. B. (2012). Weighting observations from multi-sensor coordinate measuring systems. *Measurement science and Technology*, 23(2), 025004.
- Franceschini, F., Galetto, M., Maisano, D., & Mastrogiacomo, L. (2014). Large-scale dimensional metrology (LSDM): from tapes and theodolites to multi-sensor systems. *International journal of precision engineering and manufacturing, 15*(8), 1739-1758.
- Franceschini, F., Galetto, M., Maisano, D., & Mastrogiacomo, L. (2016). Combining multiple Large Volume Metrology systems: Competitive versus cooperative data fusion. *Precision Engineering*, 43, 514-524.
- Gai, Y., Zhang, J., Guo, J., Shi, X., Wu, D., & Chen, K. (2020). Construction and uncertainty evaluation of large-scale measurement system of laser trackers in aircraft assembly. *Measurement*, 165, 108144.
- Galetto, M., Mastrogiacomo, L., Maisano, D., & Franceschini, F. (2015). Cooperative fusion of distributed multi-sensor LVM (Large Volume Metrology) systems. *CIRP annals*, 64(1), 483-486.
- Galetto, M., Mastrogiacomo, L., Maisano, D., & Franceschini, F. (2016a). Uncertainty evaluation of distributed Large-Scale-Metrology systems by a Monte Carlo approach. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 65(1), 491-494.
- Galetto, M., Mastrogiacomo, L., Maisano, D., & Franceschini, F. (2016b). Uncertainty evaluation of distributed Large-Scale-Metrology systems by a Monte Carlo approach. *CIRP annals*, 65(1), 491-494.
- Geosystems, L. (2003). Leica Laser Tracker for Hand-Tools.
- Heizmann, M., & León, F. P. (2007). Fusion von Bildsignalen (Fusion of Image Signals). *tm—Technisches Messen*, 74(3), 130-138.
- Hughes, B., Forbes, A., Lewis, A., Sun, W., Veal, D., & Nasr, K. (2011). Laser tracker error determination using a network measurement. *Measurement science and Technology*, 22(4), 045103.
- Hughes, B., Sun, W., Forbes, A., & Lewis, A. (2010). Determining laser tracker alignment errors using a network measurement. *CMSC Journal*, 26-32.
- ISO. (1995). Guide to the expression of uncertainty in measurement: corrected and reprinted, 1995 (1st ed. 1995. ed.). [Geneva]: International Organization for Standardization.

- ISO. (1998). Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment—Part 1: Decision rules for proving conformance or non-conformance with specifications. *International Standardization Organization, ISO Standard*, 14253-14251.
- ISO. (2002). 16949: 2002—Quality Management System—Particular requirements for the application of ISO9001: 2000 for automotive production and relevant service part organizations. In: Genève—Switzerland.
- ISO, I. (2010). 10360-2: Geometrical Product Specifications (GPS)-Acceptance and Reverification Tests for Coordinate Measuring Machines (CMM)-Part 2: CMMs used for Measuring Linear Dimensions. *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.*
- Jayaweera, N., Webb, P., & Johnson, C. (2010). Measurement assisted robotic assembly of fabricated aero-engine components. *Assembly Automation*, 30(1), 56-65.
- JCGM. (2008a). Evaluation of measurement data Guide to the expression of uncertainty in measurement (Geneva, Switzerland): International Organization for Standardization.
- JCGM. (2008b). Evaluation of measurement data: Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" Propagation of distributions using a Monte Carlo method. In. Genève: International Organization for Standardization.
- Jia, Z., Liang, B., Liu, W., Liu, K., & Ma, J. (2021). 3D Microdisplacement Monitoring of Large Aircraft Assembly with Automated In Situ Calibration. *Engineering*.
- Kiraci, E., Franciosa, P., Turley, G. A., Olifent, A., Attridge, A., & Williams, M. A. (2017). Moving towards in-line metrology: evaluation of a Laser Radar system for in-line dimensional inspection for automotive assembly systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(1-4), 69-78.
- 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.
- 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.
- Liu, W., & Li, Y. (2017). A novel method for improving the accuracy of coordinate transformation in multiple measurement systems. *Measurement science and Technology*, 28(9), 095002.
- Loser, R., & Kyle, S. (1999). *Alignment and field check procedures for the Leica Laser Tracker LTD 500*. Paper presented at the Boeing Large Scale Optical Metrology Seminar.
- Maisano, D. A., Jamshidi, J., Franceschini, F., Maropoulos, P. G., Mastrogiacomo, L., Mileham, A., & Owen, G. (2008). Indoor GPS: system functionality and initial performance evaluation. *International Journal of Manufacturing Research*, 3(3), 335-349.
- Marguet, B., & Ribere, B. (2003). *Measurement-assisted assembly applications on airbus final assembly lines* (0148-7191). Retrieved from
- Maropoulos, P., Muelaner, J., Summers, M., & Martin, O. (2014). A new paradigm in large-scale assembly—research priorities in measurement assisted assembly. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(1-4), 621-633.
- Martin, O. C., Muelaner, J. E., Wang, Z., Kayani, A., Tomlinson, D., Maropoulos, P. G., & Helgasson, P. (2011). *Metrology enhanced tooling for aerospace (META): A live*

- fixturing Wing Box assembly case study. Paper presented at the 7th International Conference on Digital Enterprise Technology.
- Mbarek, T., Meissner, A., & Biyiklioglu, N. (2011). Positioning System for the Aircraft Structural Assembly. *SAE International Journal of Aerospace*, 4(2011-01-2637), 1038-1047.
- 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, 228*(10), 1185-1197.
- Mitchell, J. P., Spence, A. D., Hoang, M., & Free, A. (2004). Sensor fusion of laser trackers for use in large-scale precision metrology. Paper presented at the Intelligent Manufacturing.
- Moehring, H. C., Wiederkehr, P., Gonzalo, O., & Kolar, P. (2018). *Intelligent fixtures for the manufacturing of low rigidity components*: Springer.
- Muelaner, J., Martin, O., & Maropoulos, P. (2013). Achieving low cost and high quality aero structure assembly through integrated digital metrology systems. *Procedia CIRP*, 7, 688-693.
- Muelaner, J. E., Kayani, A., Martin, O., & Maropoulos, P. (2011). *Measurement assisted assembly and the roadmap to part-to-part assembly*. Paper presented at the 7th international conference on digital enterprise technology.
- Muelaner, J. E., & Maropoulos, P. (2008). *Large scale metrology in aerospace assembly*. Paper presented at the 5th international conference on digital enterprise technology.
- Muelaner, J. E., Wang, Z., Jamshidi, J., Maropoulos, P. G., Mileham, A. R., Hughes, E., & Forbes, A. (2009). Study of the uncertainty of angle measurement for a rotary-laser automatic theodolite (R-LAT). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 223*(3), 217-229.
- Müller, M., Krüger, W., & Saur, G. (2007). Robust image registration for fusion. *Information Fusion*, 8(4), 347-353.
- Muralikrishnan, B., Ferrucci, M., Sawyer, D., Gerner, G., Lee, V., Blackburn, C., . . . Astrelin, A. (2015). Volumetric performance evaluation of a laser scanner based on geometric error model. *Precision Engineering*, 40, 139-150.
- Muralikrishnan, B., Phillips, S., & Sawyer, D. (2016). Laser trackers for large-scale dimensional metrology: A review. *Precision Engineering*, 44, 13-28.
- Muralikrishnan, B., Sawyer, D., Blackburn, C., Phillips, S., Borchardt, B., & Estler, W. T. (2008). *Performance evaluation of laser trackers*. Paper presented at the Proceedings of the 8th Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems.
- Nasr, K., Forbes, A., Hughes, B., & Lewis, A. (2012). ASME B89. 4.19 standard for laser tracker verification—experiences and optimisations. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 3(2), 89-95.
- Norman, A. R., Schönberg, A., Gorlach, I. A., & Schmitt, R. (2013). Validation of iGPS as an external measurement system for cooperative robot positioning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64(1-4), 427-446.
- Papananias, M. (2018). Combined numerical and statistical modelling for in-depth uncertainty evaluation of comparative coordinate measurement. University of Huddersfield,

- Peggs, G., Maropoulos, P. G., Hughes, E., Forbes, A., Robson, S., Ziebart, M., & Muralikrishnan, B. (2009). Recent developments in large-scale dimensional metrology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 223(6), 571-595.
- Peng, G., Ji, M., Xue, Y., & Sun, Y. (2021). Development of a novel integrated automated assembly system for large volume components in outdoor environment. *Measurement*, 168, 108294.
- Pfeifer, T., Montavon, B., Peterek, M., & Hughes, B. (2019). Artifact-free coordinate registration of heterogeneous Large-Scale Metrology systems. *CIRP annals*.
- Predmore, C. R. (2010). Bundle adjustment of multi-position measurements using the Mahalanobis distance. *Precision Engineering*, 34(1), 113-123.
- Puttock, M., & Lorenz, G. (1978). Large-scale metrology. Ann. CIRP, 21(1), 351-356.
- Raisinghani, M. S., Ette, H., Pierce, R., Cannon, G., & Daripaly, P. (2005). Six Sigma: concepts, tools, and applications. *Industrial management & Data systems*, 105(4), 491-505.
- Rüscher, O., & Mayländer, H. (2001). Automated alignment and marry-up of aircraft fuselage sections with a final assembly line (0148-7191). Retrieved from
- Schlather, F., Hoesl, V., Oefele, F., & Zaeh, M. F. (2018). Tolerance analysis of compliant, feature-based sheet metal structures for fixtureless assembly. *Journal of manufacturing Systems*, 49, 25-35.
- Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L., & Wartzack, S. (2014). Skin model shapes: A new paradigm shift for geometric variations modelling in mechanical engineering. *Computer-aided design*, 50, 1-15.
- Schmitt, R., Peterek, M., Morse, E., Knapp, W., Galetto, M., Härtig, F., . . . Estler, W. (2016). Advances in large-scale metrology—review and future trends. *CIRP Annals*, 65(2), 643-665.
- 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.
- Williams, G., Chalupa, E., & Rahhal, S. (2000). Automated positioning and alignment systems. *SAE transactions*, 737-745.
- Wübbeler, G., Krystek, M., & Elster, C. (2008). Evaluation of measurement uncertainty and its numerical calculation by a Monte Carlo method. *Measurement science and Technology*, 19(8), 084009.
- Yang, J., Li, G., Wu, B., Gong, J., Wang, J., & Zhang, M. (2015). Efficient methods for evaluating task-specific uncertainty in laser-tracking measurement. *Mapan*, 30(2), 105-117.
- Zeng, Q., Huang, X., Li, S., & Deng, Z. (2019). High-efficiency posture prealignment method for large component assembly via iGPS and laser ranging. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(8), 5497-5510.
- Zhang, F.-m., Qu, X.-h., & Ye, S.-h. (2009). Uncertainty analysis in large-scale measurement based on Monte Carlo simulation method. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 15(1), 184-187.

- Zhang, F., & Qu, X. (2012). Fusion estimation of point sets from multiple stations of spherical coordinate instruments utilizing uncertainty estimation based on Monte Carlo. *Measurement Science Review*, 12(2), 40-45.
- 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.
- 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*. Paper presented at the 2018 13th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA).