



HAL
open science

ATS600 : quelles limites en pratiques ?

Benoît Espanet

► **To cite this version:**

Benoît Espanet. ATS600 : quelles limites en pratiques?. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2021. dumas-03545219

HAL Id: dumas-03545219

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03545219>

Submitted on 27 Jan 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS
ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES

MÉMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM

SPÉCIALITE : Géomètre et Topographe

par

Benoît ESPANET

ATS600 – Quelles limites en pratiques ?

Soutenu le 10 septembre 2021

JURY

Monsieur Jérôme VERDUN
Monsieur Gaël ARCHAMBEAU
Monsieur Stéphane DURAND

Président du jury
Maître de stage
Enseignant référent

Remerciements

Tout d'abord, je remercie mon maître de stage Monsieur Gaël ARCHAMBEAU, pour son encadrement toujours bienveillant, constructif et ses conseils avisés.

Je remercie vivement Monsieur Laurent BLANC, pour m'avoir accueilli au sein de l'effectif du service métrologie de la société SETIS.

Je veux également remercier toutes les personnes que j'ai côtoyées au sein de l'entreprise pour leur accueil chaleureux et leur sympathie tout au long de ce stage.

Enfin, je tiens à remercier ma famille qui a toujours été là pour me soutenir, dans les bons et les mauvais moments, ainsi que mes amis avec qui j'ai partagé de très belles années.

J'ai une pensée pour tous mes professeurs, enseignants et maîtres de stages qui m'ont instruit et aidé durant toute ma scolarité.

Liste des abréviations

3D : Tridimensionnel

ADM : Absolute Distance Meter, distancemètre absolu

AIFM : Absolute Interferometer, interféromètre absolu

AT : Absolute Tracker, tracker absolu

ATS : Absolute Tracker Scanning, scanner tracker absolu

CAD : Computer-Aided Design, conception assistée par ordinateur

GUM : Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure

LT : Laser Tracker, laser de poursuite

NIST : National Institute of Standards and Technology

MMT : Machine à Mesurer Tridimensionnelle

MPE : Maximum Permissible Error, erreur maximale tolérée

OTG : Orient To Gravity, alignement sur la gravité

RMS : Root Mean Square, moyenne quadratique

RRR : Red Ring Reflector, réflecteur à bague rouge

SA : Spatial Analyzer

SMR : Spherically Mounted Reflector, réflecteur sphérique

TP : Tracker Pilot

VCE : Variance Component Estimation, estimation des composantes de la variance

VIM : Vocabulaire international de métrologie

WFD : Wave-Form Digitiser, numériseur de forme d'onde

Table des matières

Remerciements	3
Liste des abréviations	4
Table des matières	5
Introduction	7
I. Qu'est-ce que le laser tracker ?	9
I. A. Historique et présentation des lasers tracker	9
I. B. Présentation de l'ATS600	9
I. B. 1. Caractéristiques générales	9
I. B. 2. Le distancemètre absolu	10
I. B. 3. Le système de mesure angulaire	12
I. B. 4. Le capteur d'inclinaison	12
I. C. Les logiciels associés aux lasers tracker au sein de SETIS	13
I. C. 1. Tracker Pilot	13
I. C. 2. Spatial Analyzer	14
I. D. Les paramètres influençant les incertitudes de mesure	14
I. D. 1. Définition des termes liés au lexique des incertitudes	15
I. D. 2. Modélisation du mesurage	16
I. D. 3. Évaluation de l'incertitude-type	17
I. D. 4. Détermination de l'incertitude-type composée	18
I. D. 5. Détermination de l'incertitude élargie	18
II. Quantification de l'influence des paramètres identifiés sur la qualité des mesures	19
II. A. Influence de l'objet mesuré	19
II. A. 1. Influence de la couleur de l'objet mesuré	19
II. A. 2. Influence de l'angle d'incidence	21
II. B. Influence de la méthode de mesure	27
II. B. 1. Influence du temps de chauffe	27
II. B. 2. Influence de la vitesse de mesure sans contact	30
II. B. 3. Influence du mode de filtrage du signal	34
II. C. Influence de l'appareil	38
II. C. 1. Principe de l'ajustement de réseau avec Spatial Analyzer	38
II. C. 2. Mode opératoire	39
II. C. 3. Détermination et validation des incertitudes de mesures de l'appareil	40
II. D. Conclusions sur les tests réalisés	42
Conclusion	44
Bibliographie	46

Annexe 1 : Résultats du test sur l'angle d'incidence.....	47
Annexe 2 : Résultats du test sur le temps de chauffe	53
Annexe 3 : Résultats du test sur les modes de mesures	58
Annexe 4 : Résultats du calcul des incertitudes expérimentales de l'ATS600 avec un deuxième jeu de données.....	60

Introduction

La société SETIS fait partie du Groupe DEGAUD, fondée en 1967 par Ernest DEGAUD à Grenoble. Elle fait suite à son cabinet de géomètre expert qu'il a créé en 1951. Son cabinet a rapidement grandi grâce à d'importants projets tels que les travaux pour les jeux Olympiques d'hiver de Grenoble en 1968 ou pour le tunnel sous la Manche. En 70 ans, les activités de l'entreprise se sont diversifiées et on distingue aujourd'hui deux filiales du Groupe DEGAUD : AGATE Géomètres experts et SETIS.

Au sein de la société SETIS, il existe plusieurs services dont celui de la « Métrologie dimensionnelle & Mesure Industrielle ». Ce service possède une expérience de plus de 20 ans dans le milieu industriel notamment sur les mesures tridimensionnelles effectuées avec des lasers tracker. Il est référencé sur des projets industriels et scientifiques ou des chantiers de production d'énergie parmi les plus importants d'Europe : CERN, EPR, ITER, ALMA, LMJ, NOEMA... Dans le cadre de sa démarche qualité, les moyens déployés doivent garantir la qualité des prestations et le respect des cahiers des charges des clients. C'est pour cela que SETIS leur propose des solutions innovantes en fonction des évolutions technologiques.

En effet, depuis 1998, SETIS a mis en œuvre toutes les générations de lasers tracker Leica proposées par son distributeur commercial Hexagon : LTD500, LTD800, AT901, AT401, AT402, AT960 et AT403. À ces instruments est venu s'ajouter un ATS600, premier laser tracker à scanning direct au monde et dernier né de chez Leica. Il présente les mêmes possibilités de mesures sur réflecteurs que les meilleurs appareils qui l'ont précédé. Il propose également un mode « scan de surface » qui est très utile pour *la localisation et l'inspection numérique de grandes pièces et de surfaces qui sont inaccessibles pour un scanner laser 3D portable traditionnel, un palpeur tactile ou un réflecteur*. De plus, les paramétrages disponibles sont personnalisables et permettent de trouver *l'équilibre parfait entre la rapidité du processus et le degré de résolution du traitement opéré par le logiciel de métrologie*¹.

Hexagon édite une fiche produit indiquant des spécifications en termes de précisions selon la norme ISO10360-10. SETIS souhaite aller plus loin, en évaluant la capabilité de ce moyen de mesure dans le cadre de ses applications de contrôle dimensionnel en milieu industriel. Ce sujet de recherche a donc pour objectif de confronter les spécifications annoncées par le constructeur aux valeurs que l'on obtient en pratique et aussi, de pouvoir identifier les applications pour lesquelles l'ATS600 est plus efficace que les moyens déjà mis

¹ <https://www.hexagonmi.com/fr-FR/products/laser-tracker-systems/leica-absolute-tracker-ats600>

en œuvre par SETIS. Ceci permettra d'adapter au mieux les propositions faites aux clients et le matériel mobilisé sur chaque mission.

Ce document présentera en premier lieu l'historique et le fonctionnement des laser tracker avant de se focaliser sur l'ATS600, sur sa mise en œuvre au sein du service métrologie de la société SETIS et les facteurs qui influencent les incertitudes de mesures. La deuxième partie détaillera pour chacun des paramètres identifiés les protocoles des expériences réalisées ainsi que les résultats et les conclusions obtenus. Ce mémoire se terminera par une conclusion qui apportera une réflexion supplémentaire sur les résultats obtenus et sur d'éventuelles poursuites de recherches.

I. Qu'est-ce que le laser tracker ?

I. A. Historique et présentation des lasers tracker

Le premier laser tracker fut inventé et conçu en 1987 au National Institute of Standards and Technology (NIST) [1]. Les lasers tracker sont des appareils de mesures de coordonnées tridimensionnelles qui mesurent la position d'un rétro-réflécteur à fixation sphérique (SMR). Le principe de mesure utilisé est le même que pour les stations totales qui sont beaucoup plus répandues auprès des géomètres : l'instrument enregistre la distance à la cible ainsi que deux angles (horizontal et vertical), fournissant ainsi la position dans un système de coordonnées sphériques [2]. Cependant, les lasers tracker permettent d'obtenir de meilleures performances en termes de précision, notamment sur les mesures de distance car ils sont équipés d'un interféromètre.

Depuis 30 ans, la conception générale des lasers tracker n'a pas beaucoup changé. Cependant, les avancées technologiques et les travaux de recherches ont permis de développer les distancemètres absolus (ADM), des accessoires de mesures portatifs, d'améliorer les précisions et d'évaluer les incertitudes ainsi que les sources d'erreurs des instruments. Ces évolutions ont permis aux lasers tracker de s'imposer dans de nombreux types d'industries. Par exemple dans l'aéronautique et l'industrie navale, où ils sont utilisés pour la fabrication et l'assemblage de grands composants tels que les ailes d'avions et les coques de navires, dans l'automobile, ou encore dans l'astronomie et le nucléaire pour l'alignement de grandes optiques et structures [1, 2]. Ainsi, ce ne sont pas les géomètres qui ont été les premiers utilisateurs des lasers tracker mais les mécaniciens.

I. B. Présentation de l'ATS600

I. B. 1. Caractéristiques générales

L'ATS600 est un laser tracker de 15.45 kg avec des dimensions de 258 x 239 x 477 mm (l x L x h). Le contrôleur qui y est associé pèse 1.65 kg pour des dimensions de 249 x 148 x 59 mm. Il se transporte avec une seule valise comme toutes les nouvelles générations de laser tracker (AT9x0, AT40x). Le trépied qui lui est associé pèse quant à lui 14.2 kg. Ces caractéristiques permettent de se rendre compte que même si les nouvelles générations de lasers tracker sont



Figure 1 : AT9600 sur le trépied avec le contrôleur et les batteries ; Source :[4]

bien plus compactes que les anciennes, leur mise en place reste encore plus contraignante qu'une station totale.

Cependant, une fois mis en place et prêts à mesurer, les lasers tracker fournissent les mesures en temps réel car ils sont connectés directement à un ordinateur. On peut donc facilement savoir s'il faut reprendre des mesures, ou s'il en manque à certains endroits. L'ATS600 peut être connecté de deux manières : via une connexion câblée (câble RJ45) qui permet le transfert de beaucoup de données en peu de temps, ou via une connexion sans fil (wifi). Ce moyen de connexion permet une meilleure mobilité et une maniabilité de l'appareil facilitée, lorsqu'il faut le déplacer plusieurs fois pour avoir des mesures qui ne peuvent pas être réalisées depuis une seule position, comme pour la modélisation complète d'une pièce mécanique de grande taille par exemple.

L'alimentation du LT peut se faire soit par un branchement direct sur un réseau électrique avec une tension comprise entre 100 et 240V, soit par un branchement sur batterie ce qui permet également de gagner en mobilité et en maniabilité.

I. B. 2. Le distancemètre absolu

Le système de mesure de distance de l'ATS600 est le tout premier distancemètre absolu à balayage qui permet de localiser un point dans un espace de coordonnées 3D, avec une précision métrologique que ce soit avec ou sans réflecteur.

Il utilise la technologie bien établie du Wave-Form Digitiser (WFD - numériseur de forme d'onde) qui est une technologie de mesure du temps de vol améliorée avec la mesure du décalage de phase. En effet, contrairement à de nombreux systèmes qui utilisent un déclencheur électronique pour lancer l'horloge, la technologie WFD détourne une petite partie du faisceau lumineux émis et la compare au signal retour provenant du réflecteur. La distance est calculée avec la différence de temps qui sépare la réception des deux impulsions.

Ce distancemètre mesure jusqu'à 1 000 distances par seconde (1 kHz), mais un résultat de distance n'est pas le résultat d'une mesure unique. Ce système est capable d'émettre un million d'impulsions lumineuses par seconde (1 MHz), soit mille impulsions pour chaque mesure de distance. « Au lieu de simplement faire la moyenne de ces mille distances, le système accumule en interne 1 000 signaux et évalue le vecteur de signal résultant en un seul calcul. Cette approche augmente considérablement le rapport signal/bruit et permet de détecter de très petits signaux de retour, qui autrement auraient été perdus dans le bruit » [3]. La figure 2 illustre bien ce phénomène.

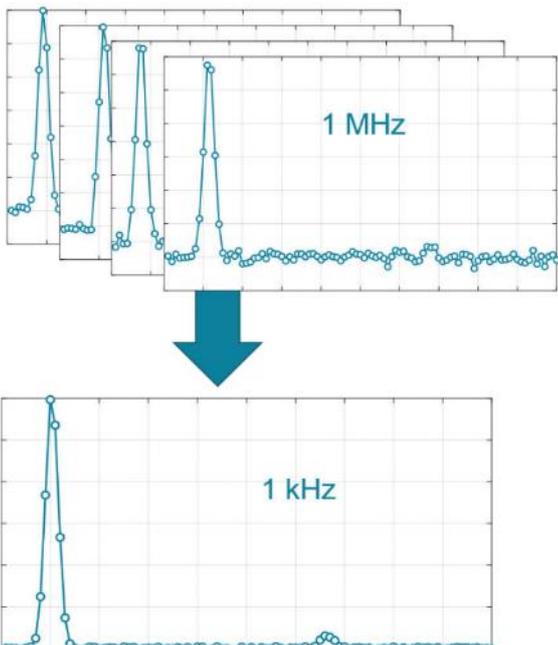


Figure 2: L'accumulation des signaux bruts permet de détecter de très petits signaux de retour.

Source : [3]

En concordance avec la fréquence de mesure de 1 kHz, l'ATS600 accumule chaque impulsion émise dans un délai de 1 milliseconde. Pour augmenter encore la précision, il est possible d'étendre ce temps d'accumulation jusqu'à 250 millisecondes. Cela se fait lors de la sélection des profils de mesure pré-enregistrés et éditables, selon les besoins de l'utilisateur.

Étant capable de mesurer des points sur réflecteurs et des points sans contact, il est justifié de se poser la question : Quelles sont les différences de qualité des mesures de distance en fonction du mode de mesure choisi ? La réponse est expliquée dans le

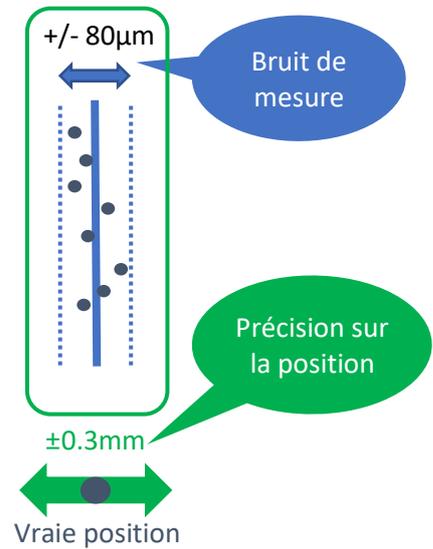
document [3] : « Pour mesurer des points sans utiliser de réflecteur, le système émet un faisceau laser en utilisant un réglage de haute puissance. Si la même intensité était appliquée lors de la mesure sur un réflecteur, le signal de retour serait si fort que le capteur ne serait pas en mesure de traiter les données. Pour surmonter cette limitation, une ouverture est placée dans la trajectoire du faisceau lors de la mesure sur un réflecteur, ne laissant passer qu'une partie définie de la lumière ». Ainsi, nous comprenons que la seule différence notable entre les deux modes de mesure est l'intensité du faisceau lumineux émis.

Concernant les données un peu plus techniques, la longueur d'onde d'émission utilisée est comprise entre 1520 et 1560 nm et la divergence du faisceau laser est de 0,5 mrad soit 28,6 mdeg.

Ce distancemètre est capable de mesurer des distances sur des réflecteurs RRR1.5" allant de 0,8 à 80 mètres et de 2 à 60 mètres lorsque l'option PowerLock est activée. Le PowerLock est une technologie de détection de cible qui permet de rétablir automatiquement la visée lorsqu'elle est interrompue et cela sans que l'opérateur n'ait besoin d'intervenir. Pour les mesures sans contact, l'ATS600 peut mesurer des points uniques ou des nuages de points, configurables par l'opérateur, entre 1,5 et 60 mètres de distance.

Concernant l'incertitude de mesure sur réflecteurs, l'erreur maximale tolérée (MPE - Seuil de confiance : 100%) est de $\pm 75 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m}/\text{m}$ avec un décalage du distancemètre de $25 \mu\text{m}$ (2σ - seuil de confiance : 95%). En mode scan de surface, le constructeur annonce un bruit de mesure de $80 \mu\text{m}$ (1σ) et une précision absolue de $300 \mu\text{m}$ (2σ) [12]. La différence entre ces deux paramètres est illustrée en figure 3.

Figure 3 : Illustration de la différence entre bruit de mesure et erreur sur la position ; Source : [4]



I. B. 3. Le système de mesure angulaire

Le système de mesure angulaire est composé de 4 codeurs angulaires pour chaque cercle de verre. Ces codeurs utilisent une lecture à angle quadruple qui permet de réduire considérablement les erreurs systématiques et périodiques sur les mesures d'angles. C'est la même technologie qui est utilisée sur les lasers tracker qui ont été commercialisés avant l'ATS600, tel que l'AT403 ou encore l'AT960 qui est bien connu. L'ATS600 présente donc les mêmes performances angulaires que ces appareils : $\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$ (2σ) soit 0.34 mdeg .

En revanche, la valeur de l'incertitude sur les lectures angulaires change lorsque le LT est en mode scan de surface. Pour les mesures sans réflecteurs, elle est de $\pm 50 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m}/\text{m}$ (2σ) soit 0.57 mdeg .

I. B. 4. Le capteur d'inclinaison

L'ATS600 possède un capteur d'orientation biaxial selon la gravité qui se situe dans la tête rotative de l'appareil. Ce capteur mesure la déviation entre l'axe vertical du LT et la direction de la gravité. La fonction d'orientation à la gravité (OTG) définit d'abord la valeur initiale de la compensation en déterminant le plan gravitaire du LT. Les valeurs mesurées sont ensuite automatiquement corrigées de cette déviation. L'incertitude de cette opération est de $\pm 15 \mu\text{m} + 8 \mu\text{m}/\text{m}$ (2σ) qui est l'incertitude sur la détermination d'un point 3D lorsque la fonction OTG est active.

Le tableau 1 récapitule les valeurs d'incertitudes des critères de précisions de l'ATS600.

	Critères de précision	Déviatiion Standard (1σ)	Erreur Maximale Tolérée (MPE)
Avec réflecteurs	Précision de l'ADM	$\pm 37.5 \mu\text{m} + 1.5 \mu\text{m/m}$	$\pm 75 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m/m}$
	Décalage de l'ADM	$12.5 \mu\text{m}$	$25 \mu\text{m}$
	Précision angulaire	$\pm 7.5 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m/m}$	$\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$
	Orientation à la gravité (OTG)	$\pm 7.5 \mu\text{m} + 4 \mu\text{m/m}$	$\pm 15 \mu\text{m} + 8 \mu\text{m/m}$
Sans réflecteurs	Précision absolue	$\pm 150 \mu\text{m}$	$\pm 300 \mu\text{m}$
	Bruit de mesure	$\pm 80 \mu\text{m}$	$\pm 160 \mu\text{m}$
	Précision angulaire	$\pm 25 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m/m}$	$\pm 50 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m/m}$

Tableau 1 : Récapitulatif des précisions annoncées par le constructeur ; *Source* : [12]

I. C. Les logiciels associés aux lasers tracker au sein de SETIS

Pour réaliser des mesures avec les LT, il faut utiliser des logiciels installés sur un ordinateur. Avec l'ATS600, j'ai utilisé deux logiciels : *Tracker Pilot ATS600* et *Spatial Analyzer*. Ces deux logiciels ne peuvent pas être utilisés en même temps. Ce paragraphe présente brièvement et dans un ordre chronologique d'utilisation ces deux logiciels.

I. C. 1. Tracker Pilot

Tracker Pilot est un logiciel de gestion des appareils qui s'utilise avant de faire les mesures. Il est développé par Hexagon et chaque type d'appareil a un logiciel Tracker Pilot dédié. La figure 4 reprend l'icône du logiciel Tracker Pilot dédié à l'ATS600.



Figure 4 : Logo du logiciel Tracker Pilot de l'ATS600

Concernant l'ATS600, Tracker Pilot permet de gérer les réflecteurs et les surfaces qui sont associées au LT. Il est possible d'ajouter, de supprimer, de personnaliser et de compenser les constantes de ces cibles. TP permet aussi de contrôler l'appareil en faisant de rapides tests comme le double retournement, la mesure d'une barre ou d'une sphère étalon. Grace à ces contrôles, nous pouvons savoir si l'appareil est prêt pour réaliser les mesures, d'un point de vue de la température des instruments de mesures et des données de calibration des erreurs internes.

En cas de tests non valides, de longs trajets avec des chocs ou d'une chute de l'instrument, il est possible de réaliser une nouvelle compensation. Si cette compensation ne suffit pas, alors il faudra retourner le LT au constructeur pour qu'il soit à nouveau étalonné.

Une fois que les tests sont validés et que l'appareil est prêt à mesurer, il faut changer de logiciel.

I. C. 2. Spatial Analyzer

Spatial Analyzer (SA) est un logiciel de l'entreprise New River Kinematic. Il permet l'acquisition et le traitement de données soit de manière instantanée (avec le LT connecté) soit en post traitement. Ce logiciel est compatible avec de nombreux appareils de plusieurs constructeurs tel que les lasers tracker, les scanners, les stations totales, etc.



Figure 5 : Logo du logiciel Spatial Analyzer

Pour réaliser des mesures sur réflecteurs, la procédure est la même que pour d'autres LT : il faut choisir un mode de mesure, un réflecteur et les mesures seront enregistrées avec le nom et dans la collection spécifiée. Pour des mesures sans contact, le mode opératoire est le même, mais il faudra avant spécifier la zone que l'on souhaite scanner. Une fois les mesures faites, elles sont enregistrées dans le fichier avec l'extension .xit64 qui correspond à l'extension des fichiers Spatial Analyzer.

SA peut traiter plusieurs types de données telles que des mesures ponctuelles sur réflecteurs, des nuages de points ou encore des fichiers CAD. Avec ces données il peut extraire des formes géométriques et comparer des données brutes à des données de référence. Les résultats chiffrés peuvent être exportés sous forme de tableau Excel ou de fichier PDF et les résultats graphiques en tant qu'image ou de fichier PDF. Concernant les données en elles-mêmes, elles peuvent être exportées sous de nombreux formats qui permettent une interopérabilité avec plusieurs autres logiciels.

I. D. Les paramètres influençant les incertitudes de mesure

Le GUM – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure – est un document de référence largement accepté, qui permet de comprendre et de mettre en œuvre les techniques et les procédures adéquates lors de la réalisation et de l'évaluation de données de mesure. Ce guide nous introduit très justement que « lorsqu'on rend compte du résultat d'un mesurage d'une grandeur physique, il faut obligatoirement donner une indication quantitative sur la

qualité du résultat pour que ceux qui l'utiliseront puissent estimer sa fiabilité. En l'absence d'une telle indication, les résultats de mesure ne peuvent pas être comparés, soit entre eux, soit par rapport à des valeurs de référence données dans une spécification ou une norme » [5]. Ce qui est appelé « indication quantitative sur la qualité du résultat » est en fait l'incertitude du mesurage. L'objectif des prochains paragraphes est de présenter la méthode de détermination de l'incertitude de mesurage établie dans le GUM, car la suite de ce travail est largement inspirée de cette méthode.

I. D. 1. Définition des termes liés au lexique des incertitudes

Les définitions qui vont suivre sont des extraits du VIM - Vocabulaire International de Métrologie - dans sa 3^{ème} édition. Sont reprises ici les définitions qui présentent un intérêt pour la compréhension des paragraphes qui vont suivre. Pour consulter les définitions d'autres termes liés au lexique de la métrologie, voir [6].

Le **mesurande** est défini comme la grandeur que l'on veut mesurer. On peut aussi le définir comme une grandeur particulière soumise à **mesurage**. Le mesurage est un ensemble d'opérations ayant pour but de déterminer la **valeur** d'une grandeur.

Il convient de préciser qu'il existe plusieurs types de valeur :

- **La valeur (d'une grandeur)** qui est une « expression quantitative généralement sous la forme d'un nombre et d'une unité de mesure » (par exemple une longueur de 5.34 m).
- **La valeur vraie (d'une grandeur)** est « la valeur que l'on obtiendrait par un mesurage parfait, ce qui est par nature impossible à déterminer ».
- **La valeur conventionnellement vraie (d'une grandeur)** est « une valeur attribuée à une grandeur particulière et reconnue, comme la représentant avec une **incertitude** appropriée pour un usage donné ». Un bon exemple pour illustrer cette définition est la définition du mètre étalon, qui a été déterminée par convention.

Il convient également d'être vigilant avec le terme « **précision** » qui doit être utilisé avec prudence. En effet, la précision est la combinaison de deux paramètres : l'**exactitude** et l'**incertitude** de mesure :

- **L'exactitude** est définie comme l'« étroitesse de l'accord entre une valeur mesurée et la valeur vraie du mesurande ».
- **L'incertitude** quant à elle, est un « paramètre non négatif, qui caractérise la dispersion des valeurs attribuées à un mesurande ».

Enfin, le terme d'**erreur de mesure** définit la différence entre la valeur mesurée d'une grandeur et une valeur de référence. Cette erreur peut se décomposer en deux familles :

- **L'erreur aléatoire** qui « fluctue de manière imprévisible lorsqu'un mesurage est répété dans des conditions constantes » ;
- **L'erreur systématique** qui « est pratiquement constante et qui est prévisible en fonction des conditions de mesurage ».

Il existe d'autres types d'erreurs qui ne seront pas définis ici mais que l'on pourra retrouver dans le document [6].

I. D. 2. Modélisation du mesurage

En général, le résultat d'un mesurage est seulement une estimation de la valeur du mesurande. De ce fait, il n'est complet que lorsqu'il est accompagné par une expression de l'incertitude de cette estimation. Pour la déterminer, il faut d'abord décrire le processus de mesure par un modèle mathématique qui relie, la valeur mesurée y du mesurande Y aux différentes grandeurs (x_1, x_2, \dots, x_N) qui interviennent dans le processus :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$$

Pour cela, il convient de définir le mesurande et l'incertitude qui lui sera associée lors des mesures. Cependant, il arrive souvent que le mesurande ne soit pas mesuré directement, mais qu'il soit calculé à partir de N autres grandeurs d'entrée (x_1, x_2, \dots, x_N) qui interviennent dans le processus de mesure. C'est le cas pour les lasers tracker. Ils fournissent des coordonnées cartésiennes XYZ d'un point 3D lors des mesurages. Ce sont ces coordonnées qui composent le mesurande mais les LT ne les mesurent pas directement. Ils les calculent à partir d'une mesure de distance et de deux mesures d'angles pour chaque point. Chacune de ces observations est alors entachée d'une incertitude-type $u(x_i)$. Pour aller plus loin dans l'illustration de ce processus, on a vu dans le paragraphe sur le distancemètre absolu (I.B.2.), qu'une distance était le fruit de la combinaison de plusieurs mesures de temps écoulé entre deux impulsions. Ceci pourrait potentiellement ajouter des grandeurs d'entrée à notre modèle mathématique.

Il est donc essentiel d'analyser le processus de mesure pour connaître les paramètres qui influencent les observations de l'appareil. L'inventaire de ces paramètres peut être réalisé en s'aidant du diagramme des causes d'incertitudes aussi appelé diagramme des 5M ou diagramme d'Ishikawa (figure 6). Ce diagramme classe les causes d'incertitudes selon leur source, à savoir :

- La méthode de mesure (Méthode)
- L'opérateur (Main d'œuvre).
- L'appareil de mesure (Moyen)
- L'environnement de la mesure (Milieu)
- L'objet mesuré (Matière)

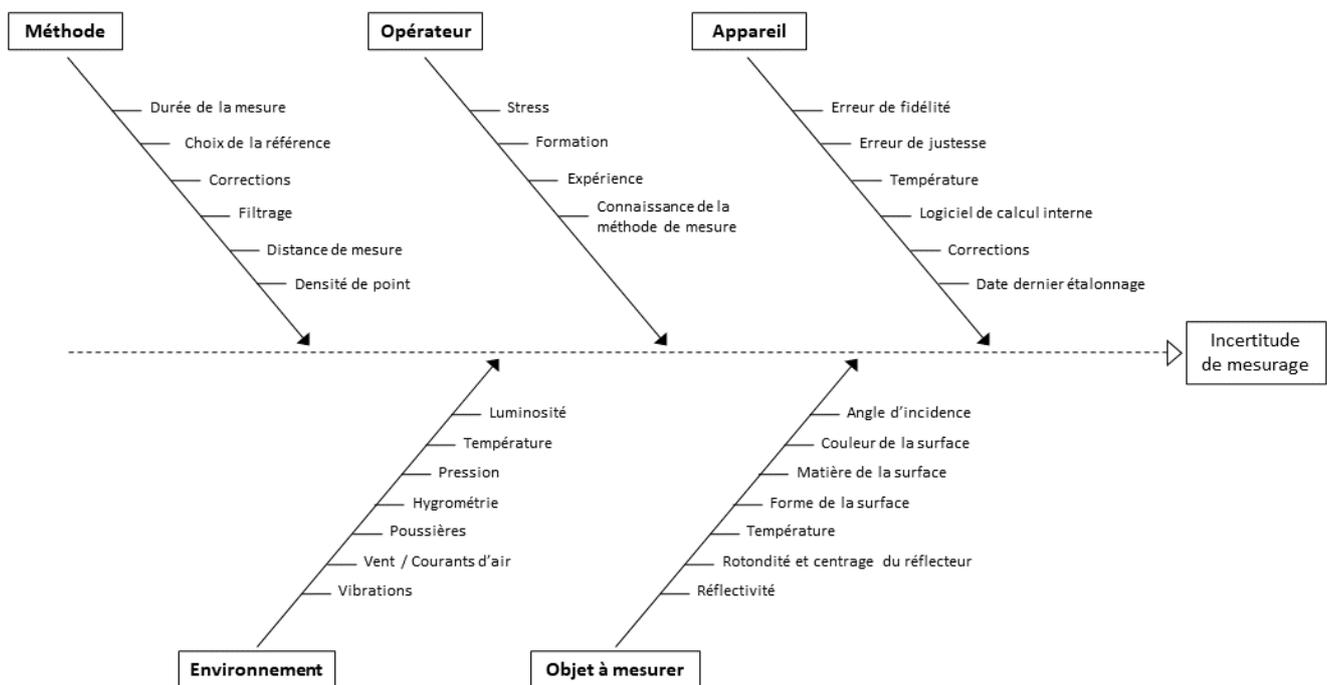


Figure 6 : Diagramme des causes d'incertitudes

Le modèle mathématique doit alors refléter le plus fidèlement possible le processus de mesure et les paramètres d'influence. En ce qui concerne les LT, le processus de mesure est complexe et de nombreux paramètres interviennent dans le résultat de la mesure. Il est donc difficile d'écrire le modèle mathématique traduisant fidèlement la réalité.

I. D. 3. Évaluation de l'incertitude-type

Les incertitudes-types $u(x_i)$ des grandeurs d'entrée x_i peuvent être déterminées de deux façons : selon les méthodes dites de « type A » et de « type B ». L'incertitude-type est caractérisée par la valeur de l'écart-type. La méthode d'évaluation de type A consiste en la réalisation d'une série de mesurages de la grandeur x_i et en l'analyse statistique de ces

observations. La méthode d'évaluation de type B est plus difficile à quantifier. Elle consiste en l'évaluation de l'incertitude par d'autres moyens qu'une évaluation de type A. Ces incertitudes peuvent être déterminées à partir de documents constructeurs, de résultats d'étalonnages, d'une classe d'exactitude, etc.

Dans ce travail de recherche, les incertitudes seront déterminées par la méthode d'évaluation de type A exclusivement.

I. D. 4. Détermination de l'incertitude-type composée

Une fois les incertitudes-types déterminées pour chaque grandeur d'entrée x_i , il est possible de déterminer l'incertitude-type composée. Dans la plupart des cas, il n'y a que des corrections additives et le modèle se simplifie par : $u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N u^2(x_i)$.

I. D. 5. Détermination de l'incertitude élargie

Finalement, l'incertitude $\pm U$ associée au résultat final est déterminée par le produit de l'incertitude-type composée $u_c^2(y)$ par un facteur d'élargissement k .

Le cas le plus fréquent en métrologie est que ces valeurs suivent une loi normale. Le facteur d'élargissement est déterminé en fonction du niveau de confiance choisi :

- 68 % pour $k = 1$
- 95 % pour $k = 2$
- 99,8 % pour $k = 3$

Cependant, l'objectif de cette étude n'est pas de déterminer l'incertitude élargie de l'ATS600, mais d'évaluer ses capacités de mesures en fonction des conditions dans lesquelles il devra évoluer lors des missions sur lesquelles SETIS est amenée à travailler.

En concertation avec SETIS, nous avons décidé de ne pas privilégier les tests sur les erreurs engendrées par l'environnement et par l'opérateur. En effet, l'objectif est d'étudier les limites de l'appareil en le confrontant à des situations que SETIS rencontre sur les chantiers. Les effets de l'environnement ne seront donc pas abordés dans la suite. Il en sera de même concernant l'influence de l'opérateur car comme l'appareil est piloté depuis un ordinateur, les erreurs ou les différences de visées entre deux opérateurs différents sont nulles. Nous nous intéresserons donc à l'influence de la méthode, de l'objet et de l'appareil utilisé.

II. Quantification de l'influence des paramètres identifiés sur la qualité des mesures

II. A. Influence de l'objet mesuré

Lorsque les premiers scanners lasers ont été commercialisés, de nombreuses études ont été menées sur l'influence de l'objet pour des mesures laser sans contact. Elles ont mis en évidence l'influence de la couleur de l'objet et de l'angle d'incidence sur la qualité des mesures. Cette partie traitera donc de ces deux paramètres.

II. A. 1. Influence de la couleur de l'objet mesuré

Au vu des nombreuses études qui ont déjà été menées sur l'influence de la couleur de l'objet lors de mesures lasergrammétriques sans contact, j'ai choisi de reprendre certaines de ces études et de les transposer à l'ATS600. Pour ce faire, j'ai commencé par comparer les caractéristiques de l'appareil avec ceux qui ont été utilisés lors de ces études. Je me suis concentré sur la longueur d'onde utilisée et sur la technologie de mesure de distance.

Dans [7], des tests ont été réalisés avec les scanners lasers Leica P40 et Topcon GLS1500. Cette étude a évalué les capacités de mesure de ces deux scanners lasers pour des distances de mesures et des angles d'incidences allant respectivement de 3 à 90 m et de 0 à 85°. Cette étude montre également l'influence de la couleur et de la rugosité de l'objet que l'on mesure. Huit couleurs ont été testées (blanc, noir, gris, marron, bleu, vert, rouge et jaune) et deux types de surfaces (éclat mat et éclat semi-brillant) car cela influence la réflexion du faisceau laser (réflexion spéculaire, diffuse ou mixte) et ainsi l'intensité retour du signal.

Si nous comparons les caractéristiques techniques de ces deux scanners lasers à celles de l'ATS600, nous constatons qu'ils ont des longueurs d'ondes d'émission du même ordre de grandeur : entre 1520 et 1560 nm. Concernant la technologie de mesure de distance, ces trois appareils utilisent la technologie de mesure du temps de vol [8, 9, 12].

Appareils	Longueur d'onde utilisée [nm]	Technologie du distancemètre
ATS600	1520 - 1560	Temps de vol amélioré
Leica P40	1550	Temps de vol
Topcon GLS-1500	1535	Temps de vol

Dans cette étude, quel que soit l'angle d'incidence, c'est avec la couleur blanche que sont obtenues les meilleures intensités retour du signal (figure 7). Elle a donc été utilisée comme couleur de référence et cette étude a également montré que plus l'angle d'incidence augmente, plus la densité du nuage de points diminue. Cette diminution peut s'illustrer par un chiffre : à 85° d'incidence, la densité est égale à 10 % de celle obtenue à 0° d'incidence.

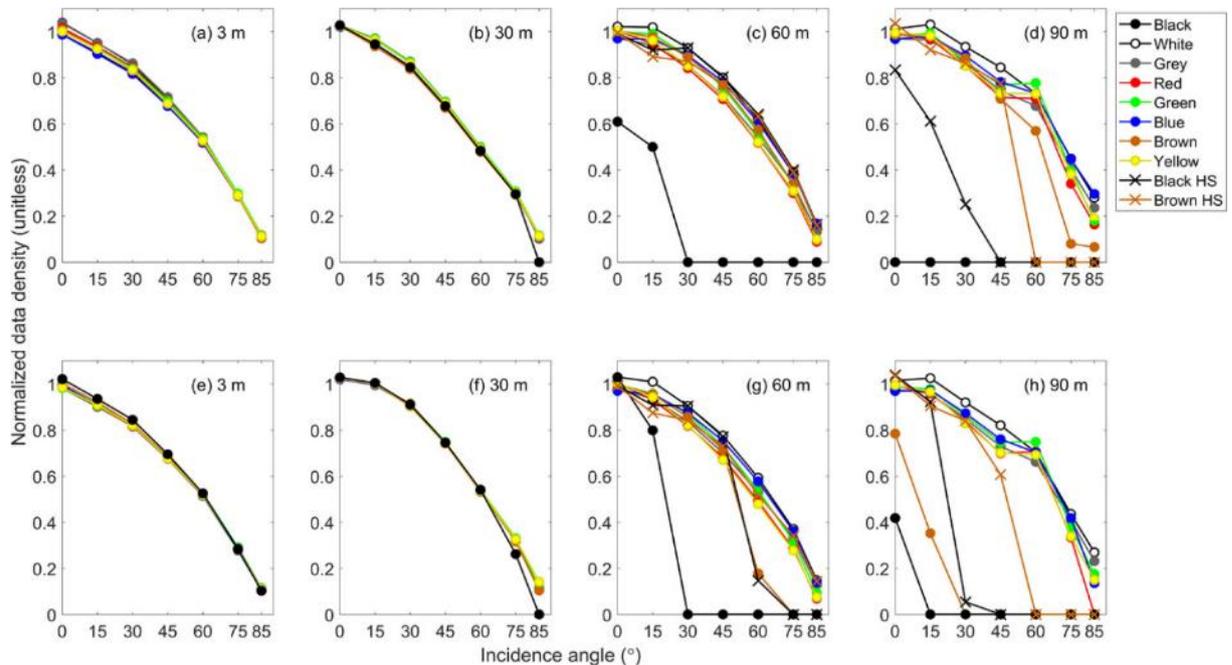


Figure 7 : Variation de la densité de données en fonction de la distance et de l'angle d'incidence pour la Leica P40.

(a) Éclat mat à 3 m ; (b) Éclat mat à 30 m ; (c) Éclat mat à 60 m ; (d) Éclat mat à 90 m ; (e) Éclat semi-brillant à 3 m ; (f) Éclat semi-brillant à 30 m ; (g) Éclat semi-brillant à 60 m ; (h) Éclat semi-brillant à 90 m.

HS dans la légende indique les valeurs obtenues en utilisant l'option haute sensibilité du scanner laser Leica à 60 m et 90 m.

Source : [7]

De plus, les plus mauvais résidus planimétriques ont été relevés pour les cibles de couleurs foncées (noir et marron suivies de grise et bleue) alors que pour les cibles claires, il n'y a pas vraiment de différence notable pour des distances inférieures à 60 m (portée maximale de l'ATS600).

Cette étude a montré que pour des mesures laser, il est préférable d'utiliser des couleurs claires pour conserver une qualité de mesure suffisante. Ainsi, pour la réalisation des tests destinés à évaluer les mesures sans contact de l'ATS600, j'ai choisi d'utiliser une surface blanche avec un éclat mat.

II. A. 2. Influence de l'angle d'incidence

Cette partie a pour objectif d'étudier les effets de l'angle d'incidence sur les mesures sans réflecteur et d'identifier les limites de l'appareil en fonction de ce paramètre.

II. A. 2. i. Protocole expérimental

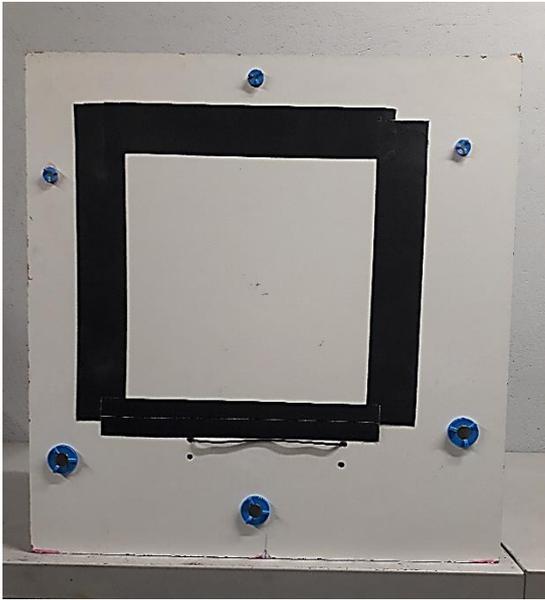


Figure 8 : Photo de la planche utilisée pour le test sur l'angle d'incidence

Pour cela, j'ai matérialisé une zone au centre d'une planche de bois composite peinte en blanc. J'ai aussi fixé 6 supports de prismes entre la zone délimitée et les bords de la planche qui serviront à recaler les nuages de points mesurés à différents angles d'incidence (voir figure 8).

Comme la planche n'est pas un plan parfait, je l'ai mesurée avec le scanner RS6 (figure 9) fixé sur le bras Romer 8525, qui est annoncé avec une précision de $\pm 48 \mu\text{m}$ (2σ) [10]. Ce scanner est donc théoriquement 6x

plus précis que l'ATS600 qui est annoncé à $\pm 300 \mu\text{m}$ (2σ). Pour obtenir une surface de référence, j'ai réalisé le maillage de ce nuage de points avec le logiciel Spatial Analyzer et j'ai déterminé les centres des sphères afin de pouvoir le recaler avec les nuages de points de l'ATS600.

Concernant les mesures avec l'ATS600, la planche a été placée à hauteur de l'appareil. Pour chaque angle d'incidence, les réflecteurs ont tous été mesurés avant de numériser la partie délimitée sur la planche. Une fois le scan terminé, les prismes ont été mesurés une nouvelle fois pour s'assurer que la planche ou l'appareil n'aient pas bougés avant de changer l'angle d'incidence et de recommencer.



Figure 9 : Scanner RS6 fixé au bras Romer ; Source : [10]

Les mesures ont été effectuées pour des angles d'incidence allant de 0 à 85° par pas de 15° et pour les distances de 3, 7 et 14 m en intérieur et de 20 et 40 m en extérieur.

J'ai choisi de réaliser des mesures en extérieur car lors de certaines missions, SETIS est amené à travailler en extérieur à une certaine distance des éléments à mesurer. C'est le cas notamment pour des levés de portes d'écluses qui se font évidemment en extérieur et sans

contrôle possible sur les facteurs environnementaux tel que l'ensoleillement, la température ou le vent.

Après avoir aligné les différents nuages de points et le maillage de référence en utilisant l'outil « Best-fit » de SA, j'ai nettoyé manuellement et de la même manière tous les nuages de points pour ne comparer que les mesures ayant un intérêt. La comparaison avec le maillage de référence a été faite avec l'outil de comparaison « Points Cloud to Object ». Pour avoir des résultats les plus explicites possibles, la composante Y du référentiel a été définie selon la normale à la planche, placée à l'incidence 0°.

II. A. 2. ii. Interprétation des résultats

Pour ne pas alourdir l'interprétation des résultats, cette partie traitera uniquement les résultats obtenus pour les distances de 7 et 20 m (figures 10 et 11 respectivement) car elles sont les plus représentatives des conditions de travail sur les chantiers de SETIS. Le détail des résultats obtenus pour les autres distances pourra être consulté en Annexe 1, mais une synthèse sera faite à la fin de cette partie (figures 13 et 14).

Les mesures à 7 m ont été faites dans un milieu sombre avec une luminosité modérée comme celle que l'on peut trouver dans des parkings souterrains. La température a varié entre 20.0 et 22.3°C, l'humidité entre 75.9 et 79.5 % et la pression était de 987.7 hPa. Les mesures à 20 m en extérieur ont été faites à l'ombre le matin entre 9 et 11h en juillet. La température a varié entre 19.8 et 22.3°C, l'humidité entre 62.9 et 77.4 % et la pression était de 993.2 hPa.

Sur les graphiques, la courbe bleue correspond à la moyenne des erreurs de distance entre le nuage de points et le maillage de référence. Chaque recalage des nuages de points avec la référence est source d'erreur. Les deux courbes rouges en pointillés représentent l'influence des erreurs de recalage (RMS Best-fit vers RS6) par rapport aux valeurs de l'erreur moyenne de distance. La courbe orange représente le bruit de mesure.

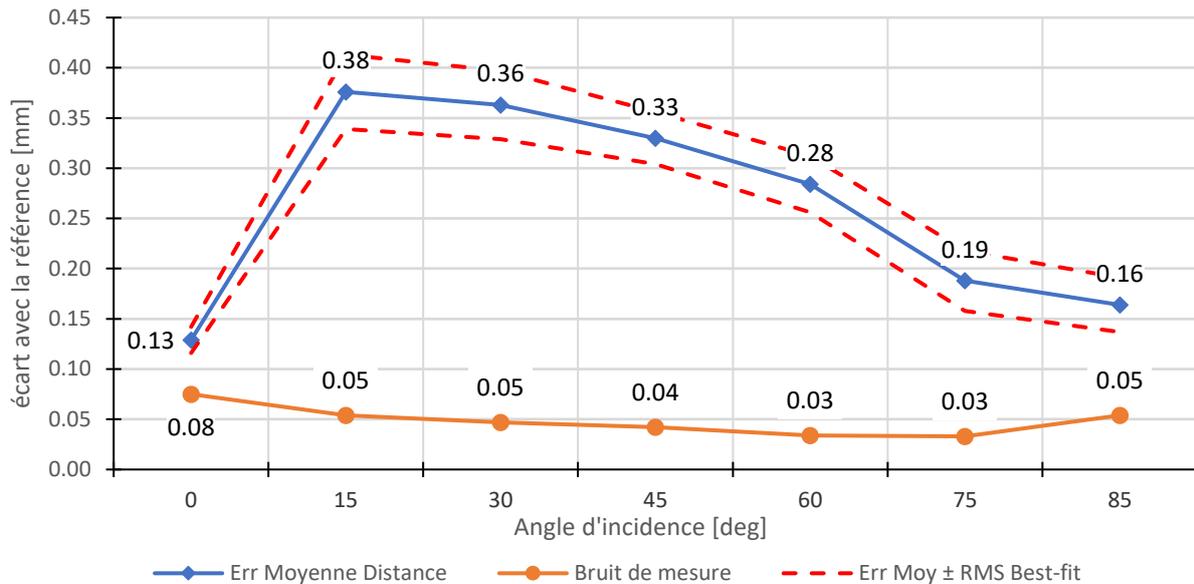


Figure 10 : Effets de l'angle d'incidence à une distance de 7m en intérieur sur la mesure d'un plan

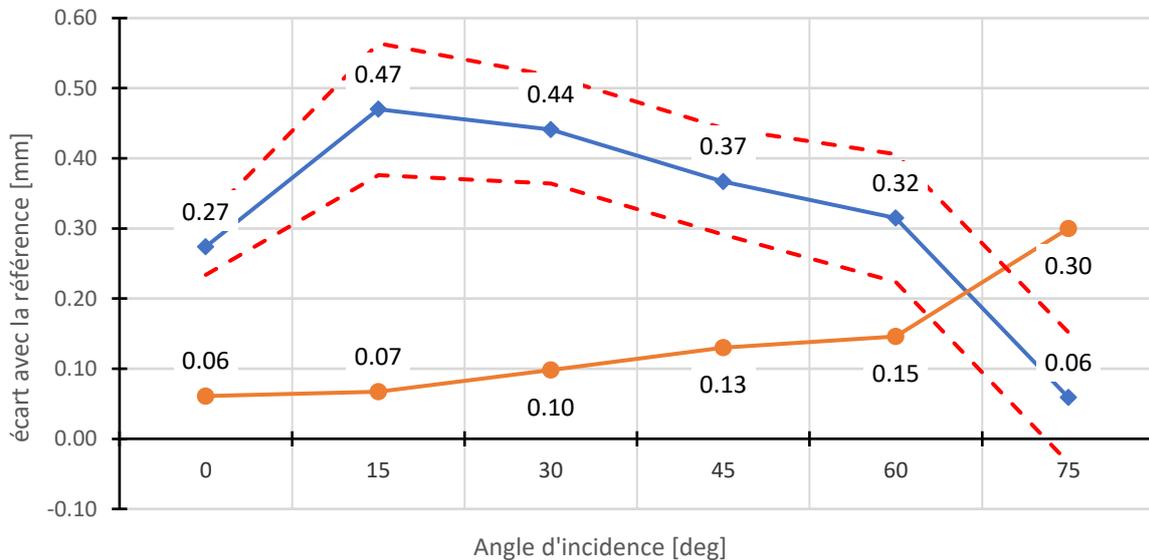


Figure 11 : Effets de l'angle d'incidence à une distance de 20m en extérieur sur la mesure d'un plan

Que ce soit pour la distance de 7 m en intérieur ou de 20 m en extérieur, les deux courbes de l'erreur sur la distance ont la même tendance : pour un angle d'incidence de 0°, les écarts sont conformes aux spécifications annoncées par le constructeur (0.13 et 0.27 mm respectivement pour 0.30 mm annoncé à 2σ). Dès lors que l'angle d'incidence augmente, l'erreur sur la distance augmente elle aussi. Elle atteint son maximum à 15° d'incidence et dépasse dans les deux cas, les spécifications annoncées par le constructeur. Une fois ce maximum atteint, l'erreur diminue en même temps que l'angle d'incidence augmente. Cette erreur redevient même conforme aux spécifications à partir de 60° d'incidence pour les mesures à 7 m et à partir de 75° à 20 m. Cette allure de courbe d'erreur peut être surprenante

mais en la comparant à celle du constructeur sur la figure 12, nous retrouvons la même tendance :

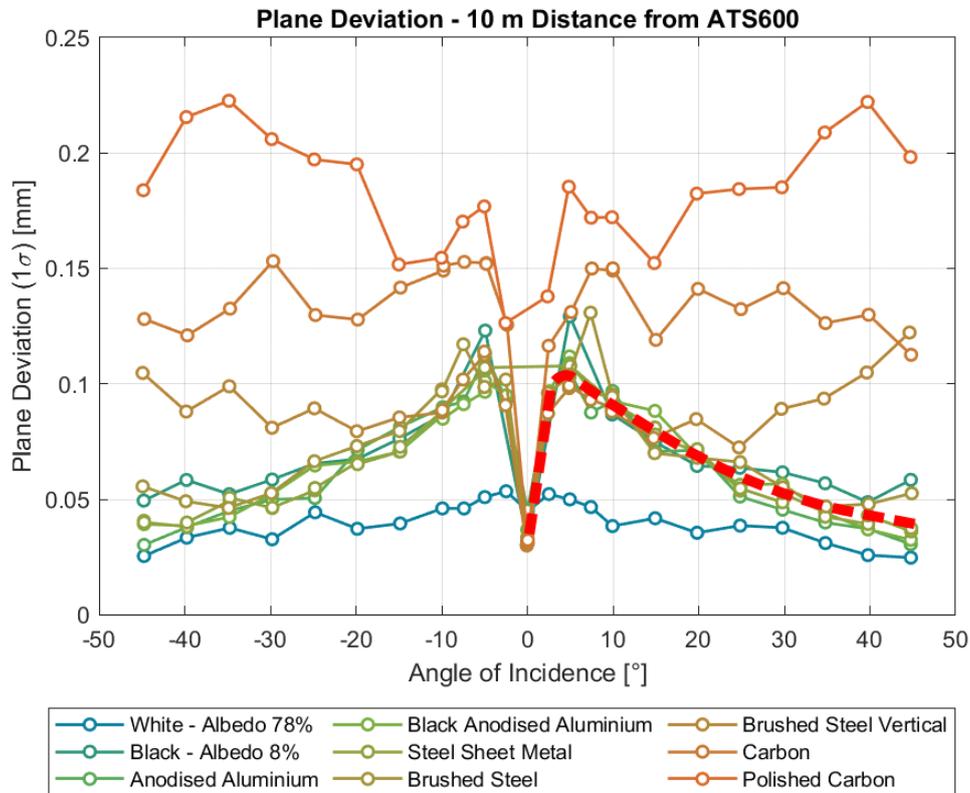


Figure 12 : Écarts planimétriques sur des plans de différents matériaux en fonction de l'angle d'incidence à une distance de 10m ; Source : [3]

Il y a deux différences notables entre nos résultats et ce graphique : les amplitudes des écarts relevés sont tous inférieurs à 0.15 mm si on ne considère pas les matériaux « Carbon » et « Polish Carbon », et le pic de tendance se situe autour de 5° d'incidence et non pas à 15° comme observé avec nos mesures. Nous pouvons donc penser que réaliser des mesures avec un angle d'incidence compris entre 0 et 15° engendrera plus d'erreurs sur la mesure de distance que le maximum que nous avons observé précédemment.

Concernant les contributions des erreurs de recalage, elles peuvent influencer les valeurs obtenues en les augmentant ou en les diminuant de manière légère. En effet, ces erreurs supplémentaires n'influencent que très peu les erreurs réelles de l'appareil pour ces conditions de mesures. Elles ne changent pas la tendance de la courbe des erreurs moyennes.

La figure 13 reprend les résultats obtenus pour les 5 distances de mesures. En intérieur, plus la distance augmente plus les résidus seront importants mais les courbes ont toutes la même allure. Nous retrouvons cette allure pour la distance de 20m en extérieur.

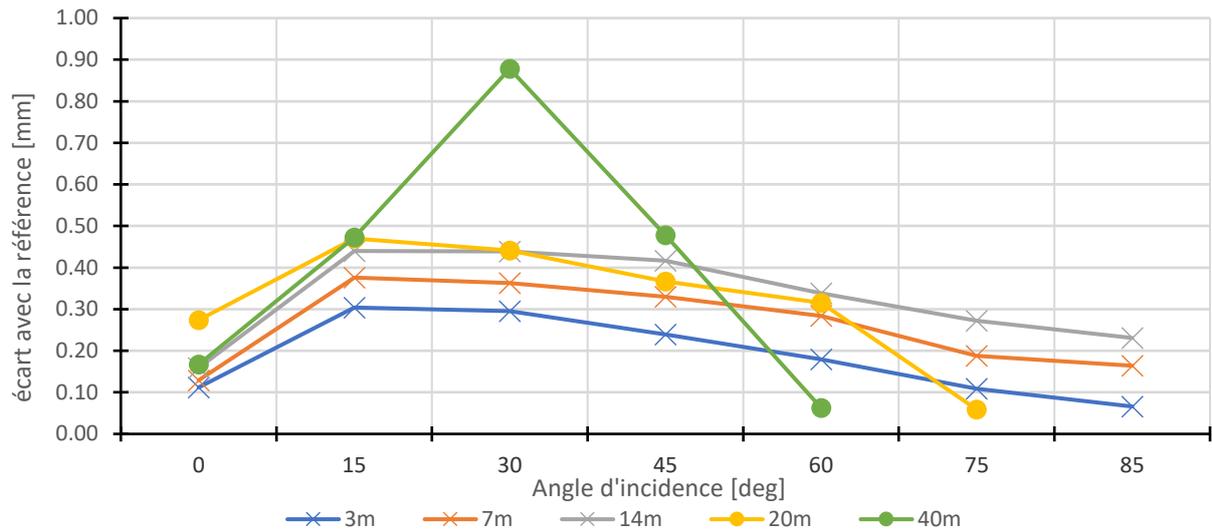


Figure 13 : Synthèse des courbes de l'erreur sur la distance pour les 5 distances de mesure

Enfin, la courbe du bruit de mesure sur la figure 10 est plus homogène : elle oscille entre 0.03 et 0.08 mm. Le maximum correspond à l'angle d'incidence de 0° et le minimum aux angles autour de 60 et 75°. Cependant, les variations sont faibles entre 30 et 75° si l'on considère aussi les mesures faites à 3 et 14 m sur la figure 14. Elles sont toutes à 0.02 mm les unes des autres sans jamais dépasser les 0.08 mm à 1σ annoncés par le constructeur.

Pour les mesures en extérieur, la courbe n'a pas la même tendance. Le bruit de mesure augmente avec l'angle d'incidence mais aussi avec la distance de mesure. À 20 m, la tolérance de 0.08 mm est tenue pour 0 et 15° d'incidence mais pas pour les angles supérieurs. À 40 m, le bruit de mesure minimal est 0.12 mm pour l'incidence normale. Les valeurs obtenues ne correspondent pas aux valeurs du constructeur, cela s'explique par le fait que les mesures ont été effectuées dans un milieu environnemental instable et non contrôlé.

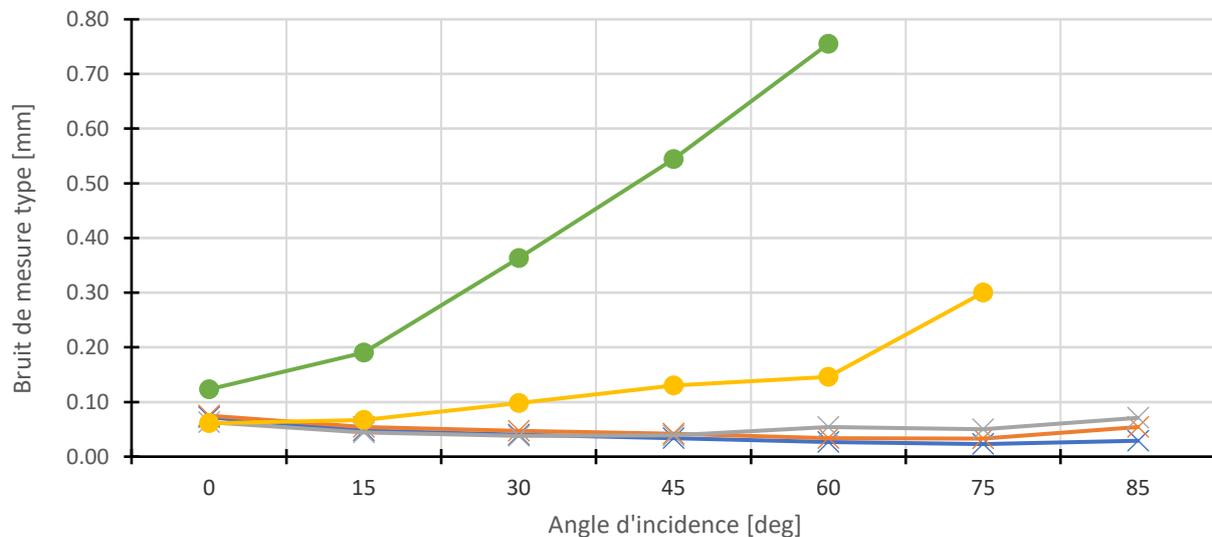


Figure 14 : Synthèse des courbes du bruit de mesure pour les 5 distances de mesure

Néanmoins, ces résultats pourront aider les utilisateurs de l'ATS600 lorsqu'ils devront choisir où positionner l'appareil.

II. A. 2. iii. Conclusion sur les effets de l'angle d'incidence

L'influence de l'angle d'incidence n'est pas négligeable et son impact sur la qualité des mesures peut parfois surprendre. Les protocoles mis en place ont permis de montrer que le bruit de mesure annoncé de l'ATS600 peut se transposer à la réalité lorsque l'environnement est maîtrisé ou ne varie pas brutalement au cours des mesures. Concernant les erreurs sur la distance, l'interprétation est plus difficile. Garantir une précision absolue de ± 0.30 mm à 2σ semble très difficile avec les conditions présentées et le support utilisé.

En mettant ce protocole en place avec des supports de matériaux différents, il serait sûrement possible d'obtenir d'autres valeurs et de pouvoir garantir des incertitudes plus faibles. En effet, les mesures que SETIS est amené à faire sont très souvent sur des pièces métalliques. Pour vérifier cette théorie, j'ai réalisé des mesures d'essais à une distance d'environ 10 mètres sur une des faces plane d'une pièce métallique de couleur noire. Ces mesures ont été réalisées pour avoir une idée du comportement de l'appareil avec un matériau différent. La figure 15 reprend les résultats obtenus.

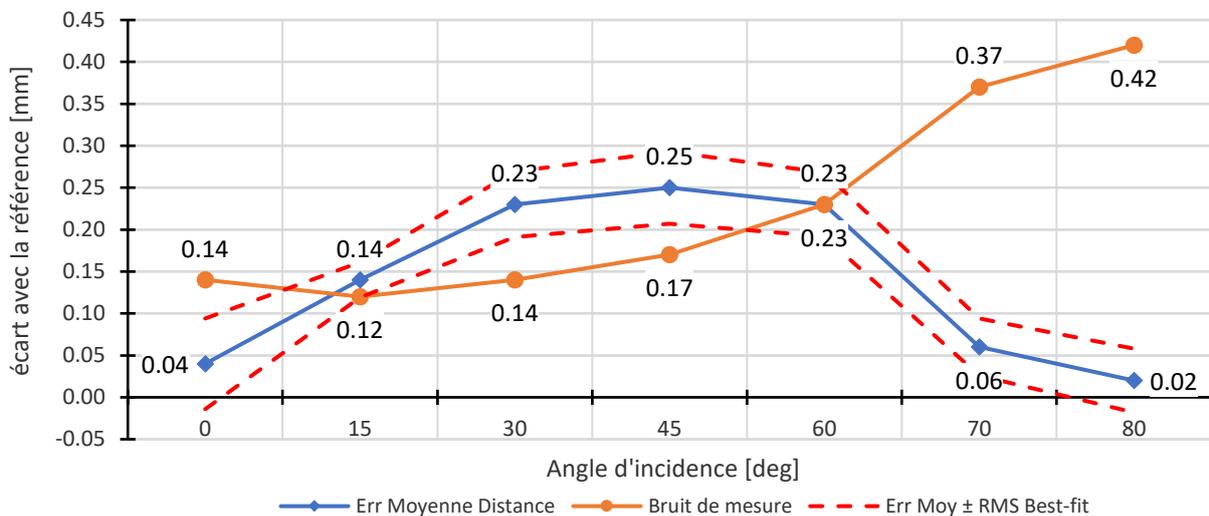


Figure 15 : Résultats obtenus lors du test de l'angle d'incidence avec une pièce métallique noire à une distance de 10 mètres

L'erreur moyenne sur la distance est bien inférieure à 0.30 mm quel que soit l'angle d'incidence avec un maximum de 0.25 mm à 45°. Il convient de noter que l'allure de la courbe est similaire aux résultats présentés précédemment. Le bruit de mesure quant à lui augmente avec l'incidence et est supérieur aux spécifications annoncées (0.08 mm à 1σ) quel que soit l'angle d'incidence également.

Je n'ai pas utilisé ce support car il ne s'agissait pas d'un plan mais d'une pièce cylindrique avec plusieurs trous usinés au travers. Sa complexité aurait demandé plus de temps de traitement pour nettoyer et sélectionner uniquement les points exploitables. Ceci aurait également été une source d'erreur supplémentaire.

II. B. Influence de la méthode de mesure

II. B. 1. Influence du temps de chauffe

II. B. 1. i. Protocole expérimental

Le but de ce test est d'observer l'influence du temps de chauffe de l'appareil sur la qualité des mesures angulaires et de distance. La durée minimale de chauffe de l'appareil nécessaire pour réaliser des mesures sans biais venant de la température des capteurs internes, doit être connue afin d'optimiser l'installation sur chantier et d'anticiper le temps nécessaire à cela avant de commencer les mesures. Je me suis inspiré du travail de R. Choleva et al. [1] pour mettre en place le protocole suivant. Le test se déroule sur une durée de 3h. Trois cibles sont positionnées autour de l'appareil à une distance d'environ 5 mètres. Un réflecteur est positionné à hauteur de l'appareil, un deuxième fixé au plafond et le troisième sur le sol (les angles de mesure par rapport à l'axe vertical de l'appareil sont respectivement de 90° , 77° et 103°). Ils sont aussi positionnés régulièrement autour de l'appareil, tous les 60° d'angle horizontal. Les mesures sont faites en double retournement toutes les 5 minutes après avoir réalisé une initialisation du LT avant chaque série de mesures. La fonction OTG n'est pas utilisée pour ce test.

Le dernier point mesuré est réputé être le moins impacté par un défaut d'échauffement de l'appareil. Il servira de référence afin de normaliser les mesures et de clarifier les écarts obtenus. Les valeurs étudiées sont donc issues de la différence entre les mesures et la dernière mesure.

II. B. 1. ii. Interprétation des résultats

Seuls les résultats du point situé à hauteur de l'appareil seront explicités dans cette partie. Le détail des résultats obtenus pour les deux autres points sont consultables en annexe 2. Une synthèse de ces résultats sera néanmoins faite à la fin de cette partie.

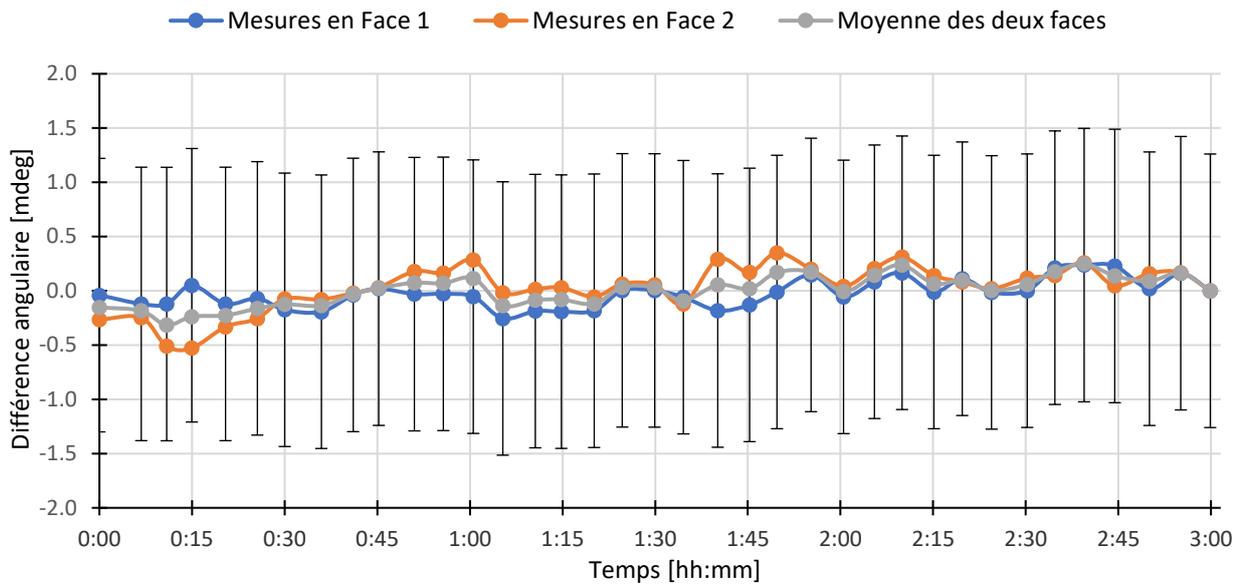


Figure 16 : Différences des mesures d'angle horizontal en double retournement lors des 3 premières heures après la mise en marche de l'appareil

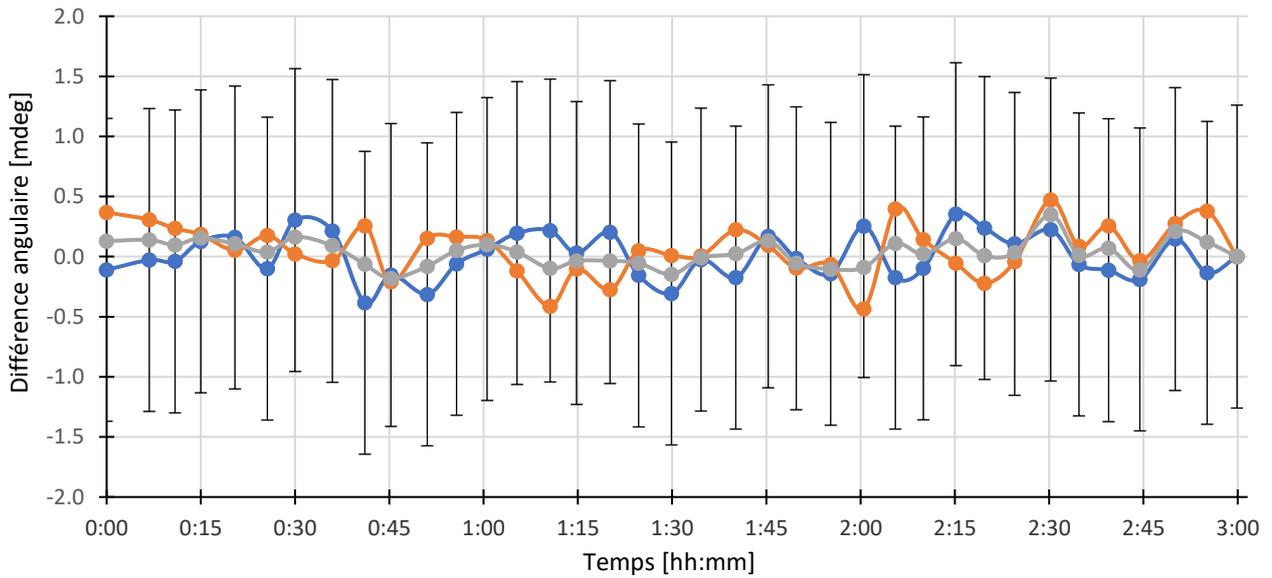


Figure 17 : Différences des mesures d'angle vertical en double retournement lors des 3 premières heures après la mise en marche de l'appareil

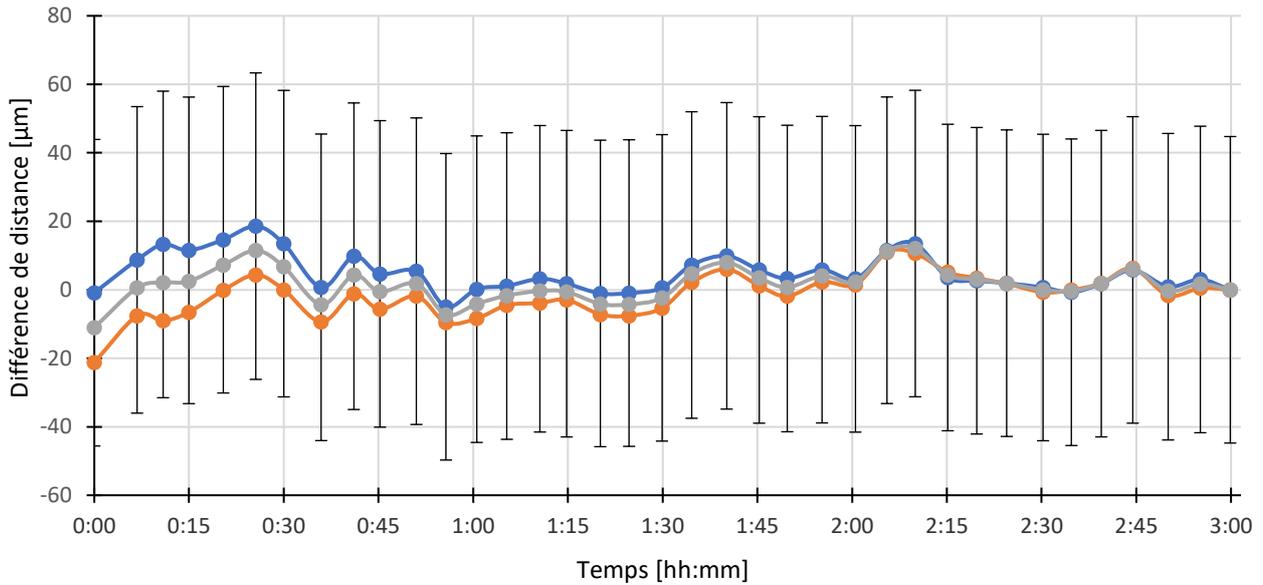


Figure 18 : Différences des mesures de distance en double retournement lors des 3 premières heures après la mise en marche de l'appareil

Les courbes des figures 16 et 17 sur les mesures d'angles sont difficilement exploitables, si l'on considère uniquement leurs allures pour en tirer une quelconque conclusion sur l'effet d'échauffement de l'appareil. Sur la figure 18, on constate une convergence régulière des deux faces. Les barres d'erreurs verticales correspondent aux incertitudes annoncées par le constructeur à 1σ . Elles n'ont été affichées que pour les valeurs de la face 1 et représentent une incertitude de ± 1.26 mdeg pour les mesures d'angles et de ± 44.8 μm pour les mesures de distances.

Ces valeurs ont été calculées de la manière suivante :

- ➔ Performance angulaire annoncée : $\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$ (2σ)
- ➔ Pour une distance de 4.835m, l'incertitude 1σ correspond donc à :

$$(15 + 6 * 4.835) * 0.5 = 22.0 \mu\text{m} (1\sigma)$$
- ➔ En convertissant cette valeur en degrés, on obtient **1.26 mdeg (1σ)**.
- ➔ Performance métrique annoncée : $\pm 75 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m}/\text{m}$ (2σ)
- ➔ Incertitude appliquée à notre cas avec une distance de 4.835m :

$$(75 + 3 * 4.835) * 0.5 = \mathbf{44.8 \mu\text{m} (1\sigma)}$$

Ces barres d'erreurs permettent de se rendre compte que les fluctuations des mesures obtenues pour chaque face ne sont en fait que du bruit de mesure. Concernant l'allure des courbes elles sont plutôt constantes autour de 0 sur l'axe des écarts.

Concernant les résultats obtenus avec les deux autres réflecteurs, les conclusions sont les mêmes : les fluctuations observées sont dues au bruit de mesure de l'appareil. Cependant, ces conclusions ne s'appliquent pas aux résultats obtenus sur les mesures d'angle vertical du point situé en hauteur (figure 19). Les lectures d'angles verticales ont été faites autour de 77° (85.5 gons) par rapport à l'axe vertical de l'appareil. Les deux courbes rentrent dans le bruit de mesure au bout de 30 à 45 minutes :

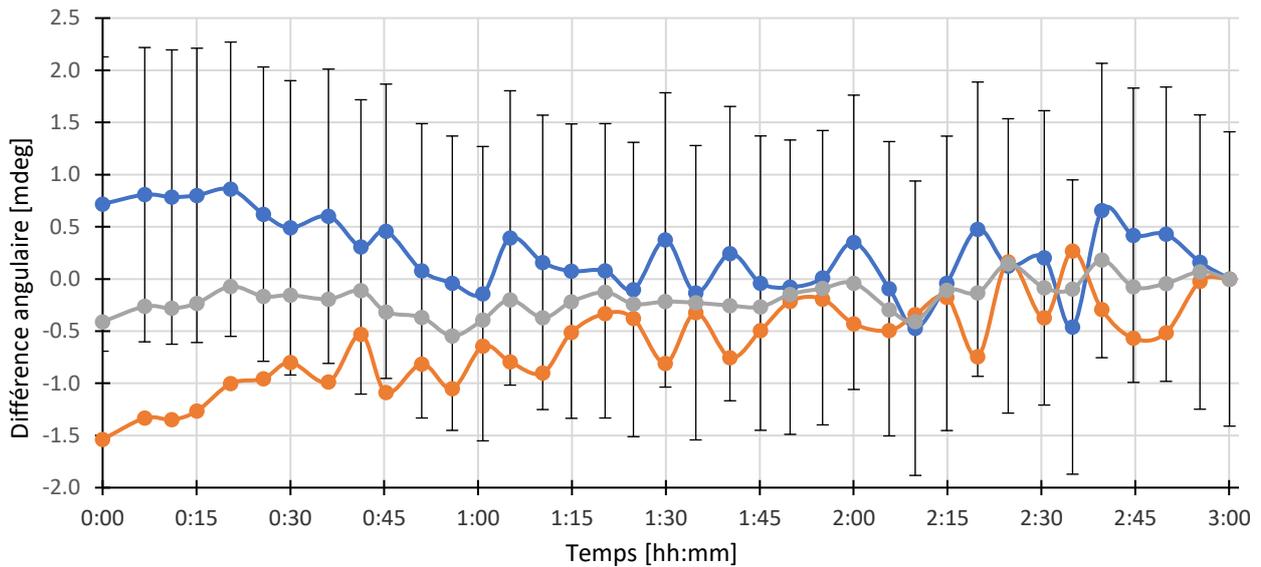


Figure 19 : Différences des mesures d'angle vertical en double retournement lors des 3 premières heures après la mise en marche de l'appareil pour le point fixé au plafond

Il est donc plus judicieux de laisser l'appareil chauffer pendant au moins 45 minutes pour des mesures qui doivent être réalisées en hauteurs ou en contre-bas de la position de l'appareil. Pour des mesures ne nécessitant pas de mesures angulaires verticales fortes, les mesures peuvent commencer dès l'allumage.

II. B. 2. Influence de la vitesse de mesure sans contact

L'ATS600 propose 3 modes de mesures sans contact par défaut qui sont personnalisables par l'utilisateur : *Fast*, *Standard* et *Precise*. La différence majeure entre ces 3 modes est le nombre de mesures moyennées. En effet, les mesures de temps de vol sont moyennées entre 1 et 250 millisecondes en fonction des paramétrages utilisés, ce qui correspond à la moyenne de 1 000 à 250 000 mesures respectivement (voir paragraphe I.B.2.). Pour évaluer ces modes, j'ai conservé les paramétrages par défaut.

II. B. 2. i. Protocole expérimental

J'ai utilisé une nouvelle fois la planche de couleur blanche que j'avais utilisée lors du test sur l'angle d'incidence (page 21). Pour les angles de 0° et de 45° d'incidence, j'ai mesuré 3 fois la zone délimitée, une fois pour chaque mode. Ces mesures ont été effectuées pour les distances de 3, 7 et 14 m en intérieur et pour 20 m en extérieur. Pour que les mesures ne durent pas trop longtemps, j'ai choisi une distance point à point différente pour chaque mode : 1 mm en mode Fast, 2 mm en mode Standard et 10 mm en mode Precise. Les temps d'acquisitions seront également pris en compte dans l'évaluation des différences et des avantages de chacun des modes.

Pour étudier les écarts avec le maillage de référence de la planche, j'ai procédé de la même manière que lors du test sur l'angle d'incidence.

II. B. 2. ii. Interprétation des résultats

Les résultats qui seront interprétés ici seront ceux obtenus pour les distances de 3 et 20 m. L'ensemble des résultats pourra être consulté en annexe 3. Les résultats sont exprimés en millimètres sauf indication contraire. Les valeurs en vert sont celles qui respectent les spécifications annoncées ($\pm 300 \mu\text{m}$ en erreur sur la distance et $\pm 80 \mu\text{m}$ sur le bruit de mesure) et celles en rouge sont celles qui ne les respectent pas.

Résultats pour une distance de mesure de 3 mètres en intérieur :

0°	Fast	Standard	Precise
Err Moy sur la distance	0.11	0.11	0.12
Plage de tolérance	± 0.30		
Points hors tolérance	411 (0.8%)	186 (0.3%)	9 (0.4%)
Bruit de mesure	0.08	0.07	0.08
Durée globale [min sec]	1'45"	3'10"	5'40"
Durée par point [msec]	2	4	173

45°	Fast	Standard	Precise
Err Moy sur la distance	0.24	0.24	0.22
Plage de tolérance	± 0.30		
Points hors tolérance	4857 (8.8%)	473 (3.4%)	25 (4.3%)
Bruit de mesure	0.05	0.03	0.09
Durée globale [min sec]	1'50"	3'25"	5'30"
Durée par point [msec]	2	16	636

Tableau 2 : Comparaison des modes de mesures pour des angles d'incidence de 0 et 45° à une distance de 3mètres en intérieur

Ces premiers résultats, à une distance rapprochée de l'objet, nous montrent qu'il n'y a pas de différence notable entre les modes de mesures sur l'erreur moyenne de distance. Que ce soit à 0° ou à 45°, les valeurs sont toutes identiques à 0.02 mm près. Concernant le bruit de mesure, il y a une différence : le mode *Standard* obtient de meilleurs résultats que les deux autres modes lorsqu'il y a de l'incidence. Ces différences peuvent également s'observer sur les pourcentages de points hors tolérance. La valeur la plus faible du pourcentage de points hors tolérance était attendue pour le mode *Precise*, mais les résultats montrent que c'est pour le mode *Standard* que ce pourcentage est le plus faible.

Pour les distances de 7 et 14 mètres, le bruit de mesure est très semblable pour les trois modes. C'est avec le mode *Precise* que les résultats sont les plus homogènes sur la mesure de distance (nombre de points hors tolérance) pour une incidence faible. Pour une incidence à 45°, c'est le mode *Fast* qui est meilleur. Il faut néanmoins prendre en compte la densité des nuages. En mode *Precise* les nuages comptent environ 550 points contre 55 000 pour le mode *Fast*. Ces différences de dispersion entre les modes n'étant pas très importantes, il n'est pas nécessaire de les considérer avec priorité pour les conclusions de ce test.

Enfin, d'un point de vue du temps d'acquisition, le mode *Fast* permet d'avoir un nuage de points dense en peu de temps : il faut 2 millisecondes pour mesurer un point. C'est entre 8 et 10 fois plus rapide que le mode *Standard* et entre 300 et 400 fois plus rapide que le mode *Precise*. Cependant, ce dernier mode permet d'obtenir des mesures moins affectées par les perturbations des signaux, mais la densité du nuage ne doit pas être trop élevée si l'opérateur n'a pas plusieurs dizaines de minutes ou quelques heures devant lui en fonction de la taille de l'objet à scanner. Le mode *Standard* semble être un bon compromis entre vitesse d'acquisition et fiabilité des mesures.

Résultats pour une distance de mesure de 20 mètres en extérieur :

0°	Fast	Standard	Precise
Err Moy sur la distance	0.35	0.27	0.35
Plage de tolérance	± 0.30		
Points hors tolérance	43067 (75.3%)	4603 (32.5%)	481 (81.7%)
Bruit de mesure	0.07	0.06	0.05
Durée globale [min sec]	1'45"	3'50"	6'10"
Durée par point [msec]	2	16	628

45°	Fast	Standard	Precise
Err Moy sur la distance	0.29	0.37	0.33
Plage de tolérance	± 0.30		
Points hors tolérance	22534 (49.0%)	8441 (70.2%)	281 (58.4%)
Bruit de mesure	0.14	0.13	0.13
Durée globale [min sec]	2'05"	4'30"	6'50"
Durée par point [msec]	2	19	769

Tableau 3 : Comparaison des modes de mesures pour des angles d'incidence de 0 et 45° à une distance de 20 mètres en extérieur

Comme pour les mesures faites à 3 mètres, il n'y a pas de réelle différence sur le bruit de mesure. En revanche, il y a des différences sur les erreurs moyennes de distance. Pour une incidence faible c'est le mode *Standard* qui donne de meilleurs résultats et pour l'incidence à 45°, c'est le mode *Fast*. De plus, contrairement aux mesures en intérieur, les différences identifiées sont plus marquées et doivent donc être considérées avec plus de poids pour les conclusions.

Concernant les temps d'acquisition, les mêmes conclusions que pour les mesures en intérieur peuvent être transposées aux mesures en extérieur.

II. B. 2. i. Conclusion sur les modes de mesures

Comme décrit dans la partie sur le distancemètre absolu, ces modes font varier l'intervalle de temps durant lequel les signaux retours sont moyennés afin d'augmenter le rapport signal/bruit. Ceci peut s'avérer très pratique lorsque les signaux retours sont perturbés par des paramètres extérieurs.

Le tableau 4 récapitule de manière subjective, les forces (+) et les faiblesses (-) de chacun des modes en fonction des paramètres comparés précédemment.

	Fast	Standard	Precise
Temps d'acquisition / Densité du nuage	+++	++	--
Bruit de mesure	+	++	+
Erreurs moyennes sur la distance	+	+	+
Gestion des perturbations de signal	-	+	++
À favoriser pour :	La rapidité et la densité de points	Courtes distances + incidences faibles	Milieus très perturbés
Conclusion	Précision suffisante si les signaux retours ne sont pas trop perturbés ; nuage dense ; rapide	Compromis entre rapidité, précision, densité et polyvalence dans les milieux	Précis dans certaines configurations ; utile dans des milieux perturbés ; nuage éparés ; lent

Tableau 4 : Récapitulatif des performances de chaque mode de mesure et identification de leurs points forts et points faibles

II. B. 3. Influence du mode de filtrage du signal

L'une des caractéristiques du faisceau laser de l'ATS600 est son profil de faisceau. Alors que le faisceau du numériseur à forme d'onde utilise une longueur d'onde dans le proche infrarouge et ne peut donc pas être vu, le pointeur rouge visible est d'une taille similaire au faisceau de mesure. Bien que le grand diamètre de ce faisceau offre une bonne visibilité du laser sur la pièce, il n'est pas optimal pour la détection des bords et des caractéristiques, car une partie du faisceau laser peut se trouver sur la surface de l'objet tandis qu'une autre partie se trouve sur un autre objet, ce qui entraîne une mesure de distance mixte.

Compte tenu de ces effets, des algorithmes ont été développés pour détecter les limites d'une surface avec une précision raisonnable, en se basant sur les informations du signal de retour telles que l'intensité, la qualité et la netteté du signal. Comme les matériaux diffèrent en termes de couleur, de réflectivité, de forme et de distance par rapport au capteur, différents niveaux de filtrage ont été développés pour permettre à l'utilisateur de contrôler le nombre de points dans les régions critiques. L'utilisateur peut choisir entre trois niveaux de filtrage : faible, moyen et élevé. Ce paramètre définira les points qui seront rejetés dans le cas où la mesure atteint une certaine valeur qui dépasse un seuil basé sur la valeur des points voisins.

II. B. 3. i. Protocole expérimental

Le test suivant a été réalisé à une distance proche (1.60 m) avec le pré réglage *Standard*. Quatre sphères usinées de diamètres différents ont été positionnées à hauteur de l'appareil : une sphère de 90 mm, une de 50 mm, une de 38.1 mm et enfin une dernière de 12.7 mm de diamètre. Ces sphères ont été mesurées 4 fois, une fois sans filtrage et une fois pour chaque niveau de filtrage. La sphère de 90 mm était de couleur blanc mat, les trois autres étaient de couleur grise semi-brillante.

Pour comparer les effets de chacun des niveaux de filtrage, j'ai étudié la différence du nombre de points enregistrés entre l'absence de filtrage et chacun des trois modes disponibles. Après avoir nettoyé manuellement les points sans intérêt sur le logiciel SA, j'ai construit les sphères afin de comparer les diamètres obtenus aux diamètres théoriques.

Après avoir comparé la détermination des diamètres en fonction du niveau de filtrage pour ces quatre sphères (tableau 5), nous étudierons les données du tableau 6 qui comporte les différences de diamètre et de position du centre d'une sphère HUBBS calculés en fonction de la distance et du niveau de filtrage. Une sphère HUBBS (figure 20) est l'assemblage de deux sphères de couleur blanc mat ayant deux diamètres différents et partageant le même centre : un diamètre de 38.1 mm et un de 60.3 mm. Les mesures ont été faites à 3 et 7 mètres. Les coordonnées du centre ont été mesurées avec un réflecteur RRR 1.5" avant de positionner la sphère sur le même support et d'effectuer les mesures.

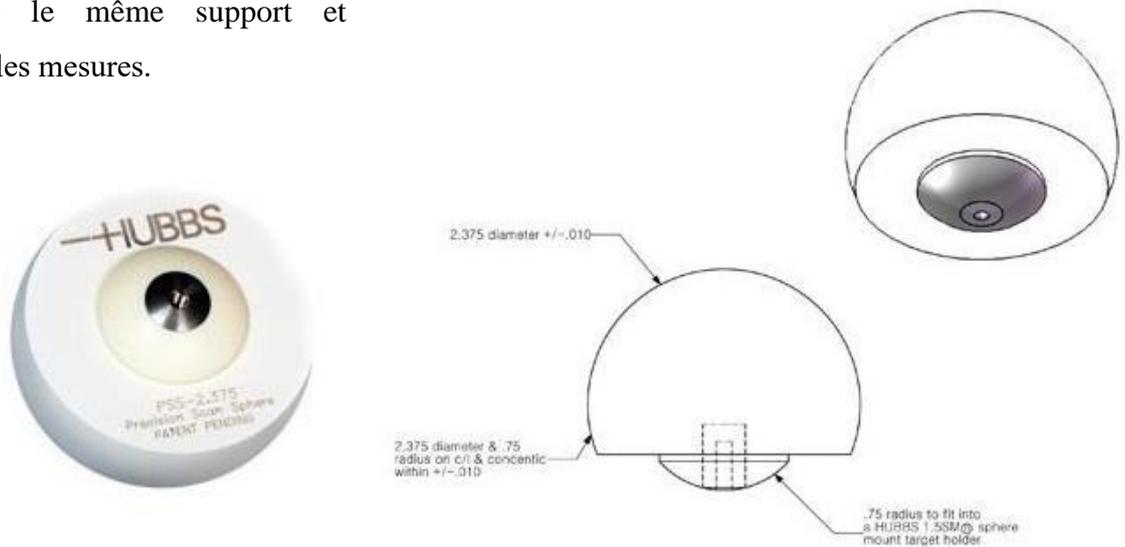


Figure 20 : Illustrations d'une sphère HUBBS ; *Source* : hubbsmachine.com

II. B. 3. ii. Interprétations des résultats

Le tableau 5 reprend pour chaque taille de sphère et pour chaque niveau de filtrage la valeur théorique du diamètre de la sphère, l'écart à la valeur théorique, le nombre de points constituant le nuage ayant servi à calculer les sphères et enfin le ratio entre le nombre de points total et le nombre de points restant après le filtrage du nuage.

Ø des sphères (mm)		90	50	38.1	12.7
		Niveaux de filtrage			
Aucun	Ø [mm]	90.11	50.18	38.94	8.26
	Différence [mm]	0.11	0.18	0.84	-4.44
	Nbr Points	1376	1469	742	43
	Ratio (%)	100.0	100.0	100.0	100.0
Low	Ø [mm]	90.12	49.94	39.16	8.86
	Différence [mm]	0.12	-0.06	1.06	-3.84
	Nbr Points	1375	1196	617	37
	Ratio (%)	99.9	81.4	83.2	86.0
Medium	Ø [mm]	90.22	50.20	40.15	7.82
	Différence [mm]	0.22	0.20	2.05	-4.88
	Nbr Points	1136	307	302	19
	Ratio (%)	82.6	20.9	40.7	44.2
High	Ø [mm]	90.74	49.84	40.46	7.15
	Différence [mm]	0.74	-0.16	2.36	-5.55
	Nbr Points	466	140	229	8
	Ratio (%)	33.9	9.5	30.9	18.6

Tableau 5 : Valeurs du diamètre des sphères en fonction de leurs tailles et du niveau de filtrage

Tout d'abord, concernant les diamètres calculés des sphères de 12.7 et 38.1 mm sans filtrage, les écarts par rapport aux diamètres théoriques sont trop importants pour garantir des résultats dans un intervalle de ± 0.30 mm. Il suffit de regarder brièvement les écarts obtenus avec les niveaux de filtrage pour comprendre que ces sphères sont trop petites pour être utilisées lors de mesures sans contact avec l'ATS600. Les résultats concernant les deux autres sphères sont plus rassurants : la différence sans filtrage est inférieure à 0.20 mm. Les plus petits écarts avec les diamètres théoriques sont atteints sans filtrage des mesures pour la sphère de 90 mm ($\Delta\text{Ø} = 0.11$ mm) et pour le niveau de filtrage « Low » pour la sphère de 50 mm ($\Delta\text{Ø} = -0.06$ mm). Pour les niveaux de filtrages supérieurs, les écarts sont plus grands mais sont tout de même corrects vis-à-vis des spécifications annoncées, sauf pour le niveau « High » sur les mesures de la sphère de 90mm qui dépasse les ± 0.30 mm.

À propos du nombre de points conservé par chaque niveau de filtrage, le niveau « Low » conserve entre 80 et 100% de la totalité des points, c'est le filtrage le moins agressif. Le filtrage « Medium » peut ignorer plus de 80% des points dans certains cas, mais il peut aussi en ignorer seulement une vingtaine de pourcent. Cela semble être en lien avec la surface de la sphère (mate ou semi-brillante). Que ce soit l'un ou l'autre des cas, il est possible de déterminer le diamètre d'une sphère à mieux que 0.30 mm pourvu qu'elle ne soit pas trop petite. Le filtrage « High » est le plus agressif, il est possible que certaines fois, trop peu de points soient conservés pour déterminer au mieux les caractéristiques des sphères.

3m	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔXYZ	$\Delta \emptyset$
HUBBS Standard None	-0.04	0.26	-0.09	0.28	0.20
HUBBS Standard Low	-0.04	0.23	-0.07	0.25	0.15
HUBBS Standard Medium	-0.04	0.26	-0.09	0.27	0.18
HUBBS Standard High	-0.05	0.23	-0.09	0.25	0.16
7m	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔXYZ	$\Delta \emptyset$
HUBBS Standard None	0.11	0.32	0.12	0.36	0.10
HUBBS Standard Low	0.11	0.32	0.12	0.35	0.09
HUBBS Standard Medium	0.09	0.29	0.16	0.34	0.05
HUBBS Standard High	0.11	0.33	0.13	0.37	0.12

Tableau 6 : Comparaison du diamètre et de la position du centre d'une sphère HUBBS en fonction des niveaux de filtres et de la distance

Dans le tableau 6, nous retrouvons les différences de détermination du diamètre de la sphère HUBBS. Les écarts sont les plus faibles pour le filtrage « Low » à 3 m et le filtrage « Medium » à 7 m. Cependant, les écarts entre les 4 niveaux de filtres sont au maximum de 0.05 mm à 3 m et de 0.07 mm à 7 m. Les écarts sont finalement assez proches les uns des autres.

Concernant la détermination des centres de la sphère, nous constatons que les écarts les plus importants sont suivant la composante Y, qui a été définie suivant l'axe de visée de l'appareil, cela pour les deux distances de mesure. Outre cette différence entre les 3 composantes, les valeurs sont très proches pour chaque niveau de filtrage. Les écarts 3D du centre sont compris dans une sphère de diamètre $\emptyset = 0.03$ mm.

II. B. 3. iii. Conclusion sur les modes de filtres

Ce test aura permis d'identifier un diamètre de sphère minimum de 50mm en-deçà duquel, l'ATS600 a beaucoup de mal à fournir des mesures de qualité. De plus, il semblerait que le niveau de filtrage « high » soit trop agressif et supprime des points qui peuvent être utilisés pour les calculs. Les niveaux de filtres « Low » et « Medium » sont plus souples et

le choix entre les deux dépend du volume de données que l'on veut conserver et de la distance de mesure : le niveau « Medium » semble être plus performant sur la distance de 7m et inversement pour le niveau « Low » qui semble être plus adapté pour de courtes distances. Ainsi, le phénomène qui semble se dégager est que plus la distance est grande, plus il faut utiliser de filtrage et inversement pour les distances courtes.

Il serait intéressant de réaliser ce test sur des distances plus grandes et avec des sphères plus grandes. L'influence du type de surface serait également intéressant à étudier.

II. C. Influence de l'appareil

II. C. 1. Principe de l'ajustement de réseau avec Spatial Analyzer

L'objectif est de déterminer les incertitudes de mesures de l'ATS600 en réalisant un ajustement de réseau et de comparer les résultats obtenus aux incertitudes annoncées par le constructeur. Pour cela, Spatial Analyzer possède un des outils d'alignement de réseau les plus avancés du marché : USMN – Unified Spatial Metrology Network. Cet outil peut être utilisé dans plusieurs cas [11] :

- Il fournit un moyen de calculer un "faisceau pondéré" : la position et l'orientation les plus probables pour tous les instruments et toutes les cibles d'un réseau de mesure.
- Il permet de calculer des incertitudes réalistes pour les mesures dans un réseau de mesure.
- Il peut être utilisé pour évaluer les incertitudes réelles des instruments sur une base individuelle.

C'est ce dernier cas qui nous intéresse. Pour cela, le manuel utilisateur de SA indique qu'il faut mesurer au moins 8 points depuis 4 emplacements différents au minimum. Ensuite, il faut lancer un calcul d'USMN et vérifier les résultats de l'analyse d'incertitude sur les mesures d'angles et de distance de l'instrument qui a été utilisé. Pour affiner encore les valeurs d'incertitudes sur les observations de l'instrument, il est possible de remplacer les valeurs par les nouvelles qui viennent d'être calculées et de relancer un calcul. Ainsi, au bout de plusieurs itérations (entre 5 et 10), il est possible de connaître les incertitudes sur les observations de l'appareil.

Il est aussi possible d'accéder à l'analyse de la covariance des données. La qualité de l'ajustement est indiquée par l'indicateur « Goodness Of Fit » qui est calculé comme suit :

$$\text{Goodness Of Fit} = \frac{X^2}{M - N}$$

Avec : $X^2 = \text{Erreur du Chi}^2$

$M = \text{Nombre d'observations}$

$N = \text{Nombre d'inconnues}$

Le manuel utilisateur indique que si cet indicateur est très petit devant 1, les données sont alors trop bonnes pour être vraies (optimiste). À l'inverse, une valeur très grande devant 1 indique des erreurs de mesure beaucoup plus importantes que prévu (pessimiste). Lors d'un contact avec Monsieur SERVEILLE, ingénieur d'application Spatial Analyzer, il m'a précisé que « très grand devant 1 » signifie plus grand d'un facteur 10 et qu'une valeur du Goodness Of Fit comprise entre 0.5 et 1.5 était acceptable car jugées proche de 1.

Il convient de mentionner, qu'il existe des méthodes d'estimations des composantes de la variance (VCE) qui sont bien établies depuis plusieurs années. Le mémoire de fin d'études [13] explique et illustre bien ces méthodes. Cependant, dans le cadre de ce travail de recherche, j'ai choisi l'utilisation de l'outil USMN de SA par rapport aux usages déjà en places au sein de SETIS.

II. C. 2. Mode opératoire

Le réseau que j'ai utilisé pour ce test est situé dans le garage de la société SETIS. C'est un réseau de points que le service métrologie utilise régulièrement pour vérifier les incertitudes de mesures de ces appareils. Ce réseau comporte 26 supports de réflecteur RRR1.5". Tous les points ont été mesurés depuis 5 positions afin de respecter les préconisations de SA. Ce réseau est étendu sur une zone de 5x15 m et sur une hauteur de 2.50 m (figure 21). Les mesures ont été faites en mode *Standard* en visée simple, c'est à dire sans double retournement.

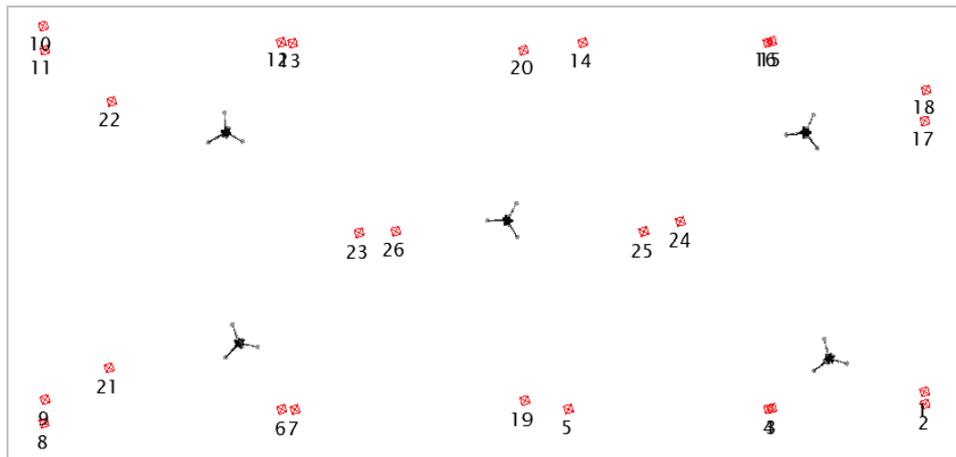


Figure 21 : Vue de dessus du réseau de points (en rouge avec un matricule) et des appareils utilisés (représentés par des trépieds) pour le calcul USMN avec SA

Une fois les données acquises, j'ai lancé le traitement de l'USMN en utilisant les incertitudes par défaut du logiciel : 1.0 seconde d'arc sur les angles et 0.008 mm sur la distance. J'ai lancé le calcul, retiré les mesures qui semblaient aberrantes, relancé le calcul et remplacé les incertitudes des instruments par celles que je venais d'obtenir. Tant que les valeurs ne se stabilisent pas, les itérations continuent. Les valeurs qui ont été obtenues ont été calculées avec un niveau de confiance de 1σ (68%).

II. C. 3. Détermination et validation des incertitudes de mesures de l'appareil

Tout d'abord, j'ai déterminé les incertitudes théoriques à 1σ de l'appareil. Les incertitudes annoncées par le constructeur sont de $\pm 15\mu\text{m} + 6\mu\text{m}/\text{m}$ (2σ) pour les mesures angulaires ce qui donne ± 1.24 seconde d'arc à 2σ et ± 0.62 seconde d'arc à 1σ . La constante de $15\mu\text{m}$ n'a pas été prise en compte dans la conversion pour faciliter les calculs. Pour la mesure de distance, l'incertitude est annoncée à $\pm 75\mu\text{m} + 3\mu\text{m}/\text{m}$ (2σ) ce qui revient à $\pm 37.5\mu\text{m}$ (1σ). De même ici, pour faciliter les calculs, la composante variable de $3\mu\text{m}/\text{m}$ n'a pas été prise en compte. Ces raccourcis de calculs se justifient car le but n'est pas d'étudier les incertitudes pour chaque mesure mais bien les incertitudes générales de l'appareil.

Ainsi, les résultats obtenus avec SA ont été comparés aux incertitudes annoncées au niveau de confiance 1σ :

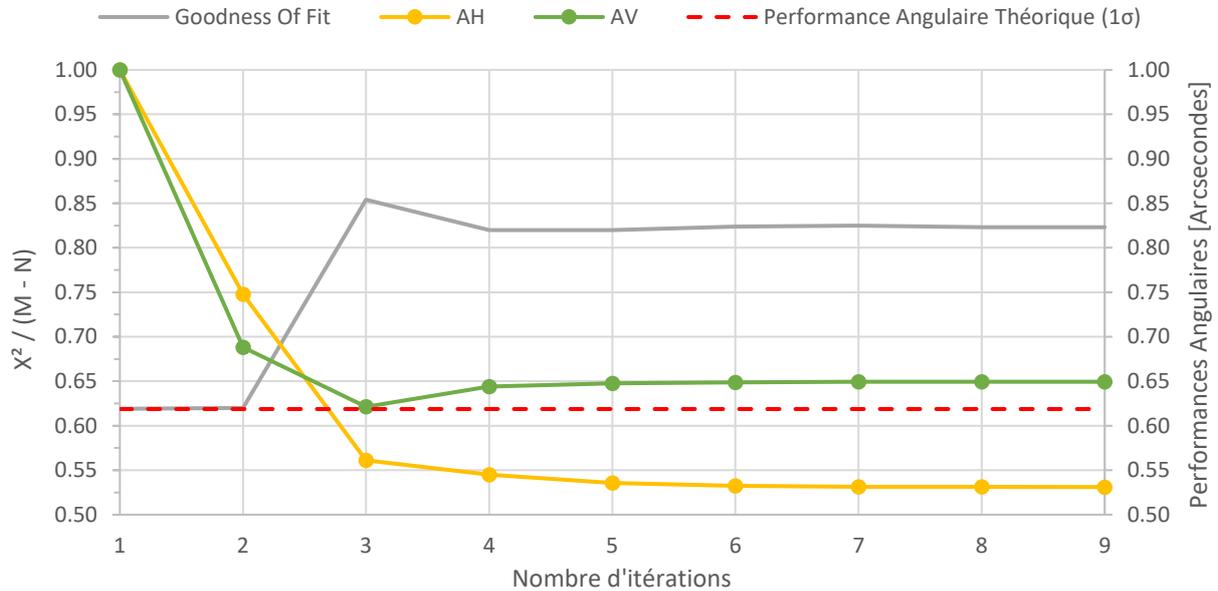


Figure 22 : Évolution des incertitudes angulaires expérimentales à 1σ de l'ATS600 en fonction du nombre d'itérations faites avec l'outil USMN de SA

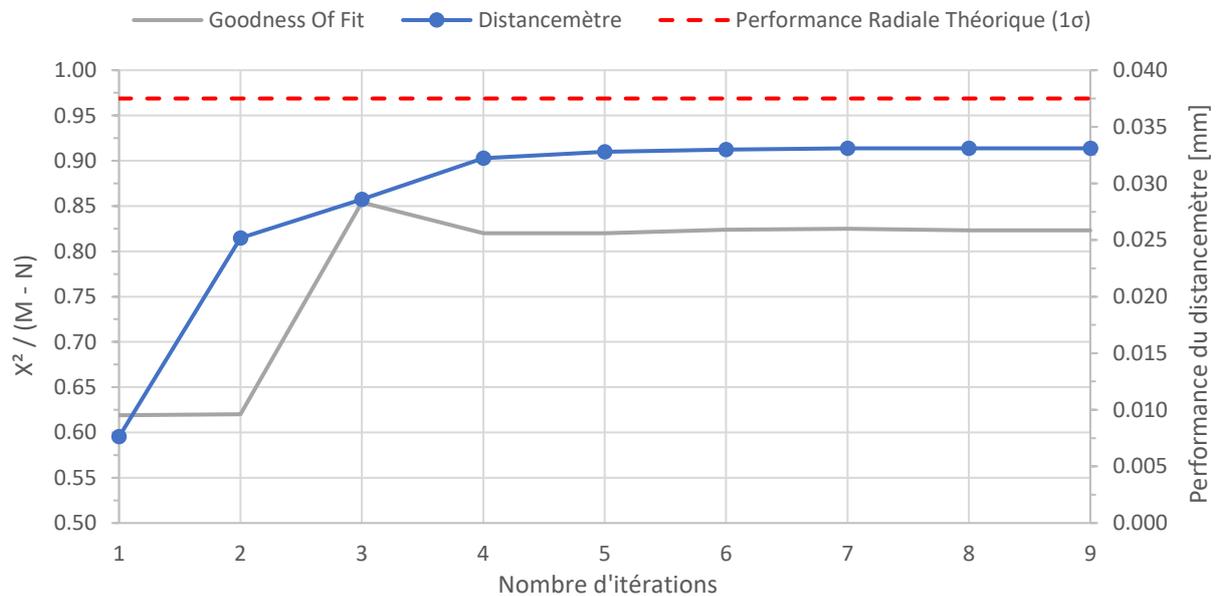


Figure 23 : Évolution de l'incertitude radiale expérimentale à 1σ de l'ATS600 en fonction du nombre d'itérations faites avec l'outil USMN de SA

Premièrement, la valeur de la qualité de l'ajustement se stabilise autour de 0.82 au bout de 4 itérations. En adéquation avec les propos de M. SERVEILLE, cette valeur est considérée proche de 1. Les données sont alors de bonne qualité sans être trop bonnes pour être vraies.

Sur la figure 22, la courbe de l'angle horizontal se stabilise autour de 0.53 secondes d'arc après 5 itérations tandis que la courbe de l'angle vertical se stabilise autour de 0.65 secondes d'arc au même moment. L'incertitude théorique à 1σ étant de 0.62 secondes d'arc, les performances de l'appareil sont bien conformes à ce qui est annoncé dans les spécifications. Cependant, il conviendra de garder en tête que l'incertitude sur les lectures verticales est plus grande que pour les lectures horizontales. Cette différence entre l'angle horizontal et l'angle vertical est plus marquée sur les résultats du deuxième jeu de données consultable en annexe 4.

Pour l'incertitude sur la distance, la courbe bleue sur la figure 23 se stabilise autour de 0.033mm au bout de la 4^{ème} itération. L'incertitude annoncée à 1σ étant de 0.038mm, les performances du distancemètre sont également conformes aux spécifications.

Les résultats de l'annexe 4 correspondent à un deuxième jeu de données, utilisé pour un nouveau calcul d'ajustement. Les résultats obtenus sont 0.58 et 0.78 secondes d'arc sur les angles horizontaux et verticaux respectivement, et de 0.022 mm sur la distance avec un indice de qualité de l'ajustement de 0.78. Ce deuxième jeu de données nous montre que les résultats obtenus peuvent être répétés et proches les uns des autres.

II. D. Conclusions sur les tests réalisés

Dans cette deuxième partie, les résultats des test menés ont permis de mieux cerner le comportement de l'ATS600 en fonction de certains paramètres. Nous savions déjà que l'angle d'incidence avait un effet non négligeable sur les mesures, mais nous ne pensions pas que les mesures soient autant affectées, au point de ne pas être conformes aux spécifications annoncées à 2σ .

Les autres résultats se sont révélés conformes aux spécifications, notamment les résultats obtenus sur l'influence du temps de chauffe ou encore sur l'évaluation des incertitudes expérimentales avec le calcul d'ajustement de réseau.

Enfin, les essais sur les différents modes de mesures et niveaux de filtrages disponibles, ont permis de mieux comprendre le comportement de l'ATS600 dans des conditions données.

Les protocoles mis en place pourraient être repris dans d'autres cas de figure afin d'appréhender encore un peu plus les avantages et les inconvénients de l'appareil. Par exemple, il serait intéressant de changer les supports qui ont servis aux tests sur les mesures

sans contact : prendre des objets ayant un éclat brillant, faire changer la couleur, ... afin d'avoir d'autres jeux de données pouvant être comparés à d'autres réalités auxquelles font face les métrologues de SETIS lors de leurs prestations sur chantiers. Il serait également intéressant de mener des tests sur l'influence des paramètres environnementaux comme la luminosité environnante ou les perturbations d'atmosphère autour de l'appareil, du réflecteur ou de l'objet à scanner.

Conclusion

Les recherches et les résultats obtenus lors de ce travail de fin d'étude sur l'ATS600, auront permis de mieux comprendre le fonctionnement de l'appareil et de mieux appréhender les limites de celui-ci. Les protocoles expérimentaux mis en place ont permis de constater plusieurs choses. L'ATS600 n'est pas aussi performant pour tous les angles d'incidences, il est préférable de bien choisir sa position avant de réaliser les mesures sur un chantier. Nous avons également mis en lumière le fait que les mesures d'angles verticaux ont une plus grande incertitude que les angles horizontaux. Ce constat peut s'expliquer par la configuration du réseau de point qui n'est pas très étendu en hauteur. Ces deux résultats ne sont pas ceux à quoi nous pouvions nous attendre, ceci dans le mauvais sens du terme. À contrario, certains tests ont mis en lumière des capacités surprenantes dans le bon sens du terme cette fois. Par exemple, la période du temps de chauffe nécessaire, qui peut être extrêmement réduite voir complètement dispensable. Les incertitudes de mesures sur les angles horizontaux et sur les mesures de distances ont également montré de bons résultats, meilleurs que ceux annoncées dans les spécifications de l'appareil. Enfin, d'autres tests ont permis de mieux appréhender les paramétrages disponibles lors des mesures sans contact. Ces tests ont mis en avant les grandes similitudes des modes de mesures entre eux, mais aussi les quelques différences qu'il peut être très utiles de connaître lors de mesures sur des chantiers bien spécifiques. Ceci est aussi valable pour les niveaux de filtrages.

Les comparaisons avec d'autres moyens de mesures plus précis ont permis de montrer que l'ATS600 permet bien de garantir des mesures conformes aux spécifications annoncées. Cependant dans certains cas, ses performances sont amoindries par le milieu dans lequel évolue l'appareil. C'est notamment le cas pour les mesures en extérieur où les travaux qui ont été menés lors de ce travail de recherche, ont permis de quantifier de manière élémentaire, la qualité des mesures auxquelles nous devrions nous attendre. Il serait donc intéressant de pousser encore plus la recherche de l'influence de ces paramètres environnementaux sur la précision des mesures de l'ATS600.

Enfin, tous ces protocoles ont été menés sur des supports de couleur et de matière très spécifique, qui ne peuvent pas correspondre à tous les chantiers auquel un métrologue de SETIS est amené à travailler. Il serait donc également intéressant de reproduire certains des protocoles mis en place, en changeant les supports pour qu'ils correspondent à des caractéristiques d'autres chantiers.

D'un point de vue personnel, ce travail de recherche m'aura permis de découvrir la métrologie dimensionnelle sous une autre forme que celle qui est abordée lors du cursus de formation des ingénieurs à l'ESGT. J'ai pu me familiariser avec les lasers tracker et apprécier de travailler avec de tels instruments. Je me suis rendu compte que la métrologie est un domaine, en plus de tous ceux déjà connus et présentés à l'école, dans lequel le géomètre peut travailler et s'épanouir. Ce stage et tous ceux que j'ai fait avant, m'ont permis de me rendre compte qu'ingénieur géomètre est un statut qui offre tellement de possibilités de travail et de perspectives personnelles, qu'ils n'ont fait que de me conforter dans mon choix d'en devenir un.

Bibliographie

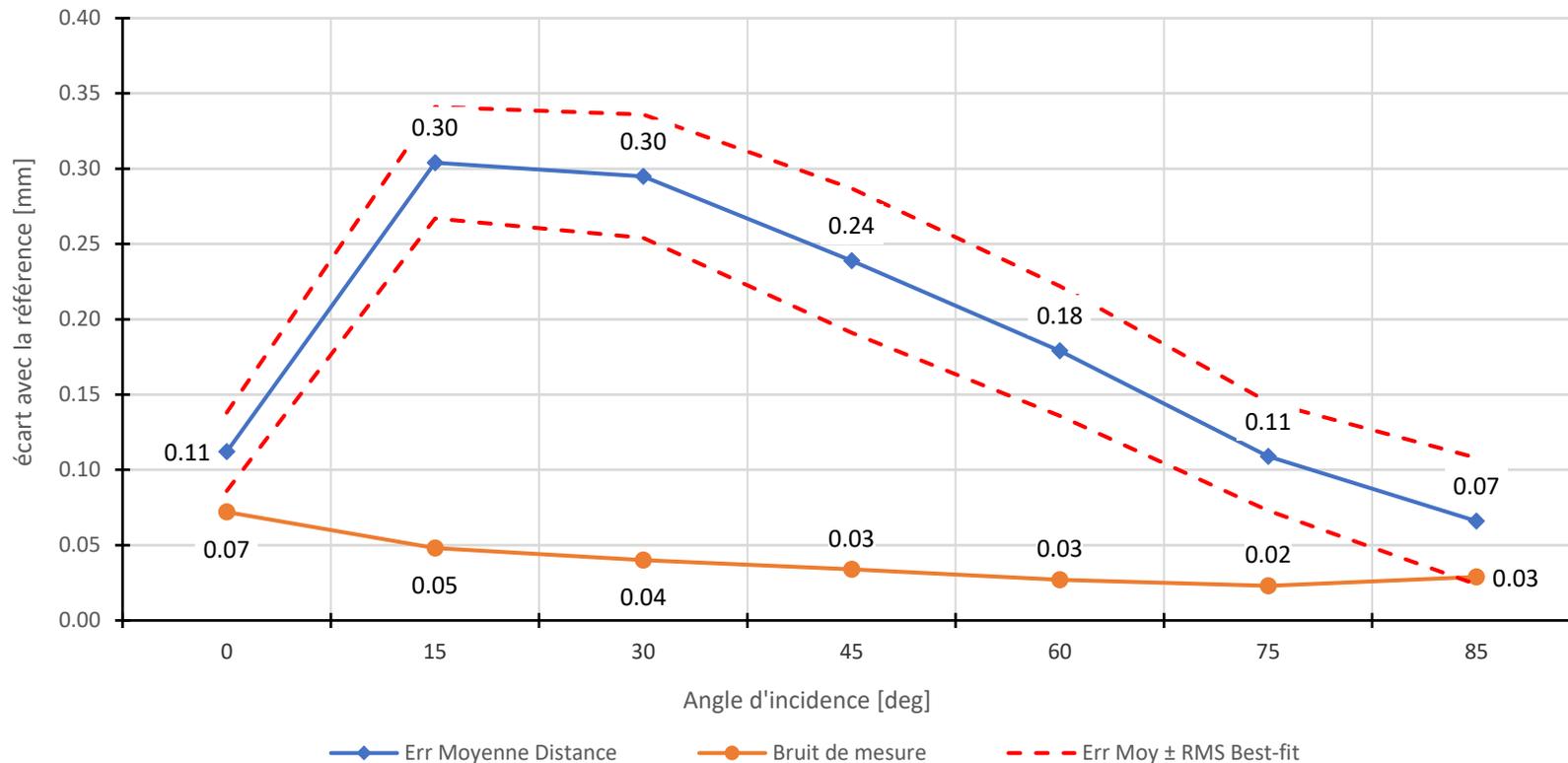
- [1] Choleva R., Kopáček A. and Erdélyi J. : Analysis of Warm-up Effect on Laser Tracker Measurement Performance, Contributions to International Conferences on Engineering Surveying (2021), pp142-154
- [2] Muralikrishnan B., Phillips S., Sawyer D.: Laser tracker for large-scale dimensional metrology : A review, Precision Engineering (2016), Vol. 44, pp 13-28
- [3] Matthias Wolf, Leica Absolute Tracker ATS600 Wave Form Digitizer Technology (2020). White Paper, Hexagon's Manufacturing Intelligence division.
- [4] Leica Absolute Tracker ATS600 – Product Presentation, CERN (2019).
- [5] JCGM 100:2008 - GUM 1995 avec des corrections mineures, Évaluation des données de mesure - Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure
- [6] JCGM 200:2012, 3ème édition, version 2008 avec corrections mineures, Vocabulaire international de métrologie - Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM),
- [7] Bolkas D. & Martinez A., Effect of target color and scanning geometry on terrestrial LiDAR point-cloud noise and plane fitting. Journal of Applied Geodesy (2018) 12(1), pp. 109-127.
- [8] Leica ScanStation P30/P40 Product Specifications (2016), Leica Geosystems AG.
- [9] Topcon GLS-1500 Product Specifications (2011), Topcon Corporation
- [10] Brochure produit Absolute Arm (2020), Hexagon AB
- [11] Manuel d'utilisation de Spatial Analyzer (2021).
- [12] Manuel d'utilisation de l'ATS600 (2020)
- [13] BUCHER M, 2015. Combinaison des mesures GNSS et topométriques dans un réseau d'auscultation. Sciences de l'ingénieur, CNAM ESGT, 59 p.

ANNEXE 1 : RESULTATS DU TEST SUR L'ANGLE D'INCIDENCE

Les valeurs en vert sont celles qui respectent les spécifications annoncées ($\pm 300 \mu\text{m}$ (2σ) en erreur sur la distance et $\pm 80 \mu\text{m}$ (1σ) sur le bruit de mesure) et celles en rouge sont celles qui dépassent ces spécifications.

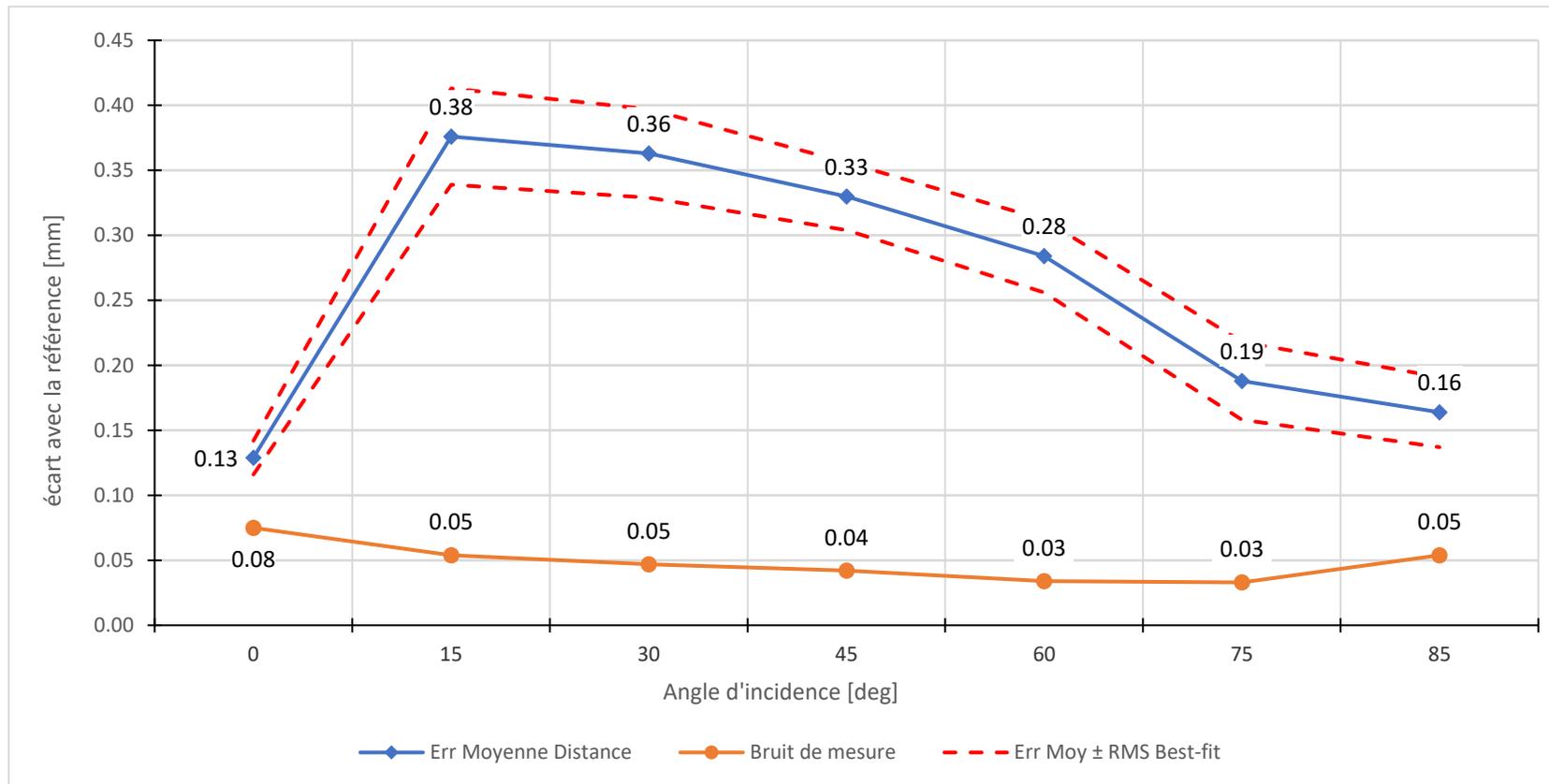
Résultats pour une distance de mesure de 3 mètres en intérieur :

Angle d'incidence [deg]	0	15	30	45	60	75	85
Err Moyenne Distance	0.11	0.30	0.30	0.24	0.18	0.11	0.07
Plage de tolérance	± 0.300						
Points hors tolérance	186 (0.3%)	7350 (53.9%)	6220 (44.7%)	473 (3.4%)	0 (0.0%)	1 (0.0%)	0 (0.0%)
Bruit de mesure	0.07	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03
RMS Best-fit vers RS6	0.03	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04
Err Moy - RMS Best-fit	0.09	0.27	0.25	0.19	0.14	0.07	0.02
Err Moy + RMS Best-fit	0.14	0.34	0.34	0.29	0.22	0.15	0.11



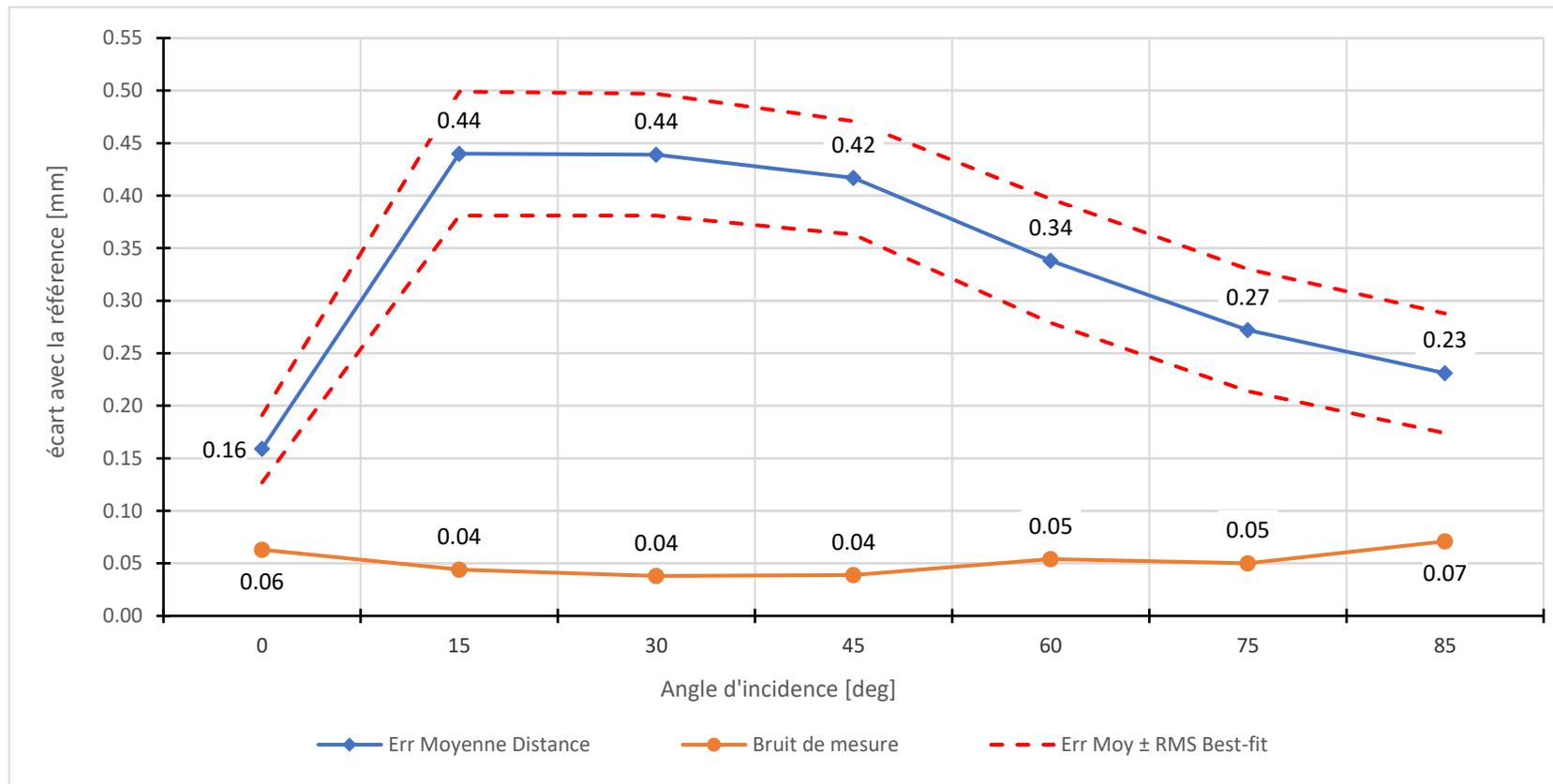
Résultats pour une distance de mesure de 7 mètres en intérieur :

Angle d'incidence [deg]	0	15	30	45	60	75	85
Err Moyenne Distance	0.13	0.38	0.36	0.33	0.28	0.19	0.16
Plage de tolérance	± 0.300						
Points hors tolérance	157 (1.0%)	14041 (92.1%)	13794 (91.5%)	11215 (77.7%)	4178 (30.3%)	37 (0.3%)	44 (0.5%)
Bruit de mesure	0.08	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.05
RMS Best-fit vers RS6	0.01	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Err Moy - RMS Best-fit	0.12	0.34	0.33	0.30	0.26	0.16	0.14
Err Moy + RMS Best-fit	0.14	0.41	0.40	0.36	0.31	0.22	0.19



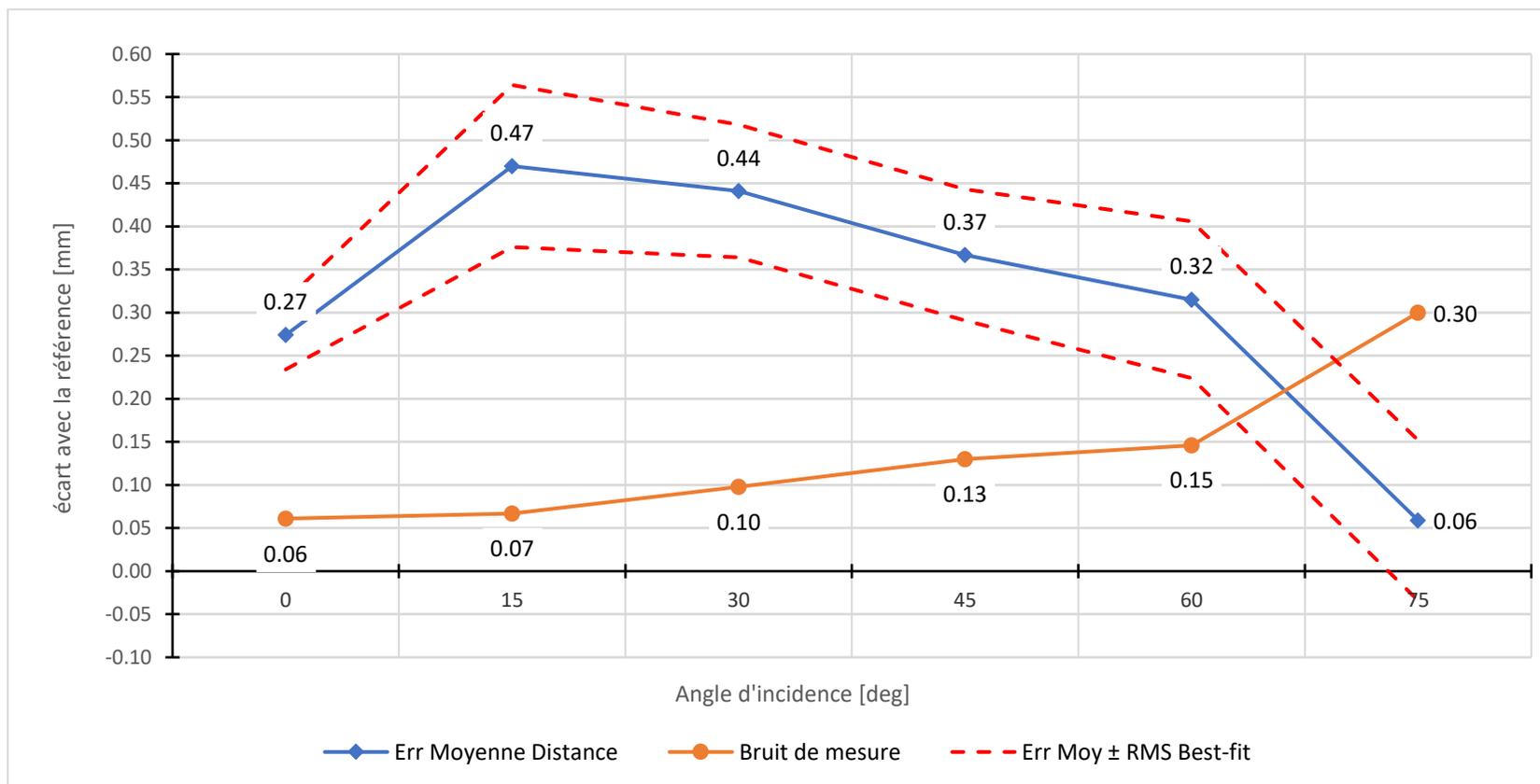
Résultats pour une distance de mesure de 14 mètres en intérieur :

Angle d'incidence [deg]	0	15	30	45	60	75	85
Err Moyenne Distance	0.16	0.44	0.44	0.42	0.34	0.27	0.23
Plage de tolérance	± 0.300						
Points hors tolérance	204 (1.5%)	13619 (99.9%)	13105 (100.0%)	12891 (99.7%)	10167 (79.9%)	2187 (26.2%)	73 (14.5%)
Bruit de mesure	0.06	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.07
RMS Best-fit vers RS6	0.03	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06
Err Moy - RMS Best-fit	0.13	0.38	0.38	0.36	0.28	0.21	0.17
Err Moy + RMS Best-fit	0.19	0.50	0.50	0.47	0.40	0.33	0.29



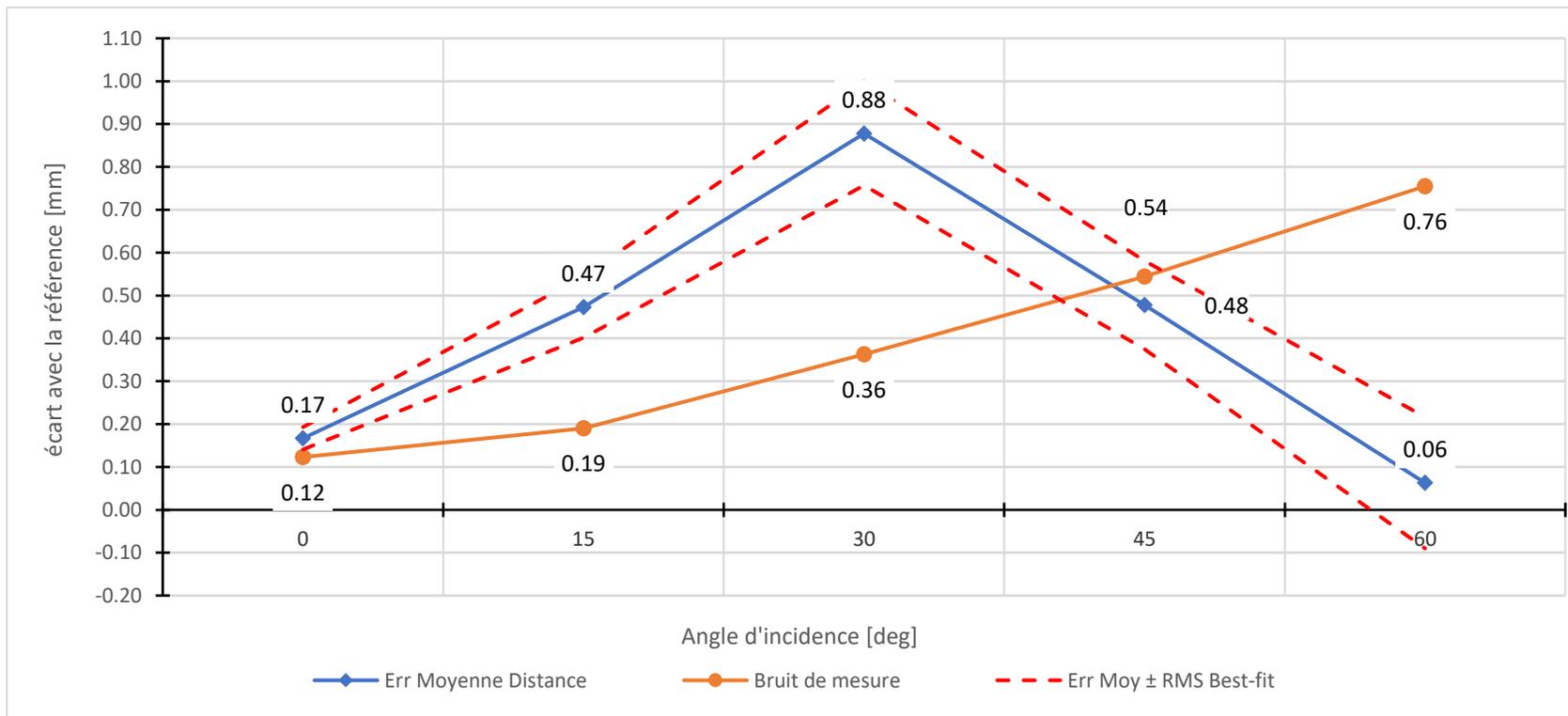
Résultats pour une distance de mesure de 20 mètres en extérieur :

Angle d'incidence [deg]	0	15	30	45	60	75
Err Moyenne Distance	0.27	0.47	0.44	0.37	0.32	0.06
Plage de tolérance	± 0.300					
Points hors tolérance	4603 (32.5%)	13404 (99.2%)	11784 (92.7%)	8441 (70.2%)	4156 (53.7%)	273 (31.7%)
Bruit de mesure	0.06	0.07	0.10	0.13	0.15	0.30
RMS Best-fit vers RS6	0.04	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09
Err Moy - RMS Best-fit	0.23	0.38	0.36	0.29	0.22	-0.03
Err Moy + RMS Best-fit	0.31	0.56	0.52	0.44	0.41	0.15



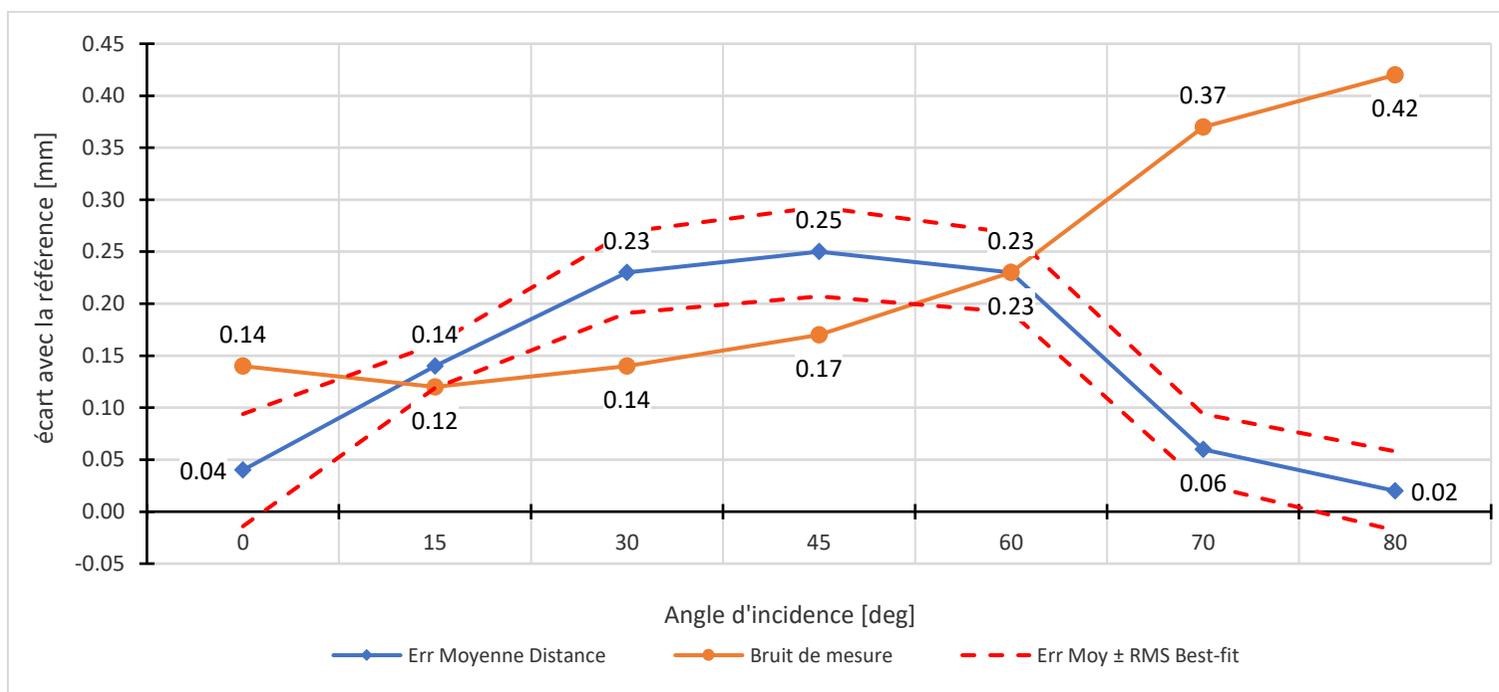
Résultats pour une distance de mesure de 40 mètres en extérieur :

Angle d'incidence [deg]	0	15	30	45	60
Err Moyenne Distance	0.17	0.47	0.88	0.48	0.06
Plage de tolérance	± 0.300				
Points hors tolérance	1553 (15.3%)	7103 (82.6%)	7850 (93.4%)	4360 (68.7%)	2684 (63.6%)
Bruit de mesure	0.12	0.19	0.36	0.54	0.76
RMS Best-fit vers RS6	0.03	0.07	0.12	0.10	0.15
Err Moy - RMS Best-fit	0.14	0.40	0.76	0.38	-0.09
Err Moy + RMS Best-fit	0.19	0.54	1.00	0.58	0.22



Résultats obtenus avec un support métallique de couleur noire à une distance d'environ 10m :

Angle d'incidence [deg]	0	15	30	45	60	70	80
Err Moyenne Distance	0.04	0.14	0.23	0.25	0.23	0.06	0.02
Plage de tolérance	± 0.300						
Points hors tolérance	111 (6.1%)	112 (6.0%)	285 (28.5%)	633 (38.2%)	565 (39.4%)	367 (45.8%)	111 (51.9%)
Bruit de mesure	0.14	0.12	0.14	0.17	0.23	0.37	0.42
RMS Best-fit vers AT402	0.05	0.02	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04
Err Moy - RMS Best-fit	-0.01	0.12	0.19	0.21	0.19	0.03	-0.02
Err Moy + RMS Best-fit	0.09	0.16	0.27	0.29	0.27	0.09	0.06



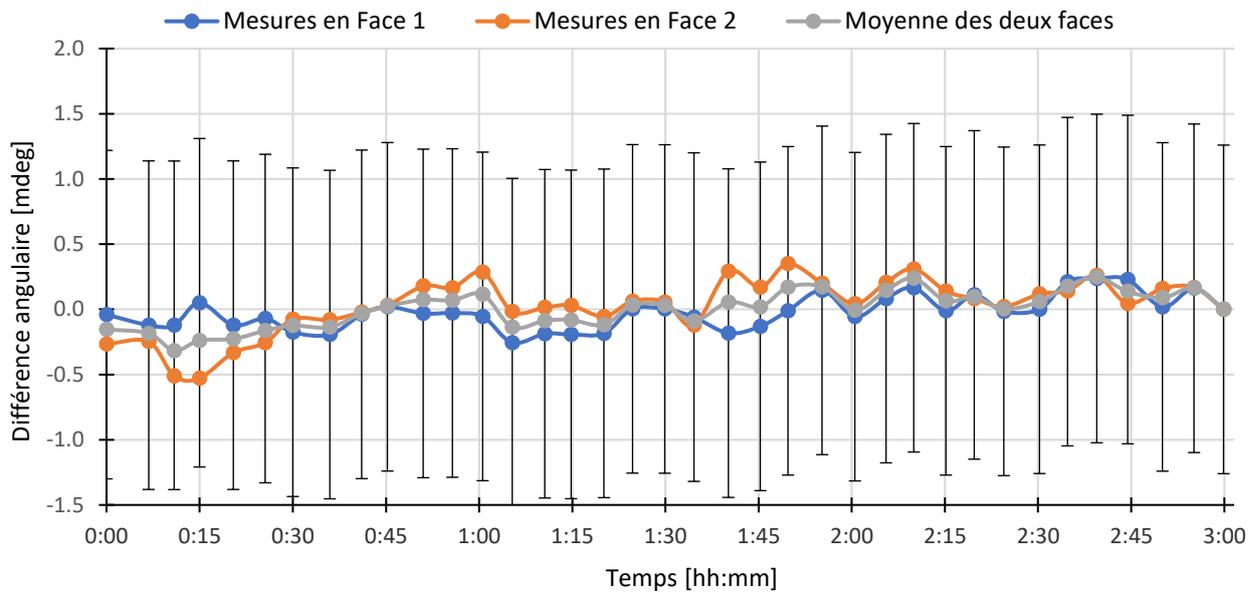
L'erreur moyenne sur la distance est bien inférieure à 0.30mm quel que soit l'angle d'incidence mais le bruit de mesure augmente avec l'incidence.

ANNEXE 2 : RESULTATS DU TEST SUR LE TEMPS DE CHAUFFE

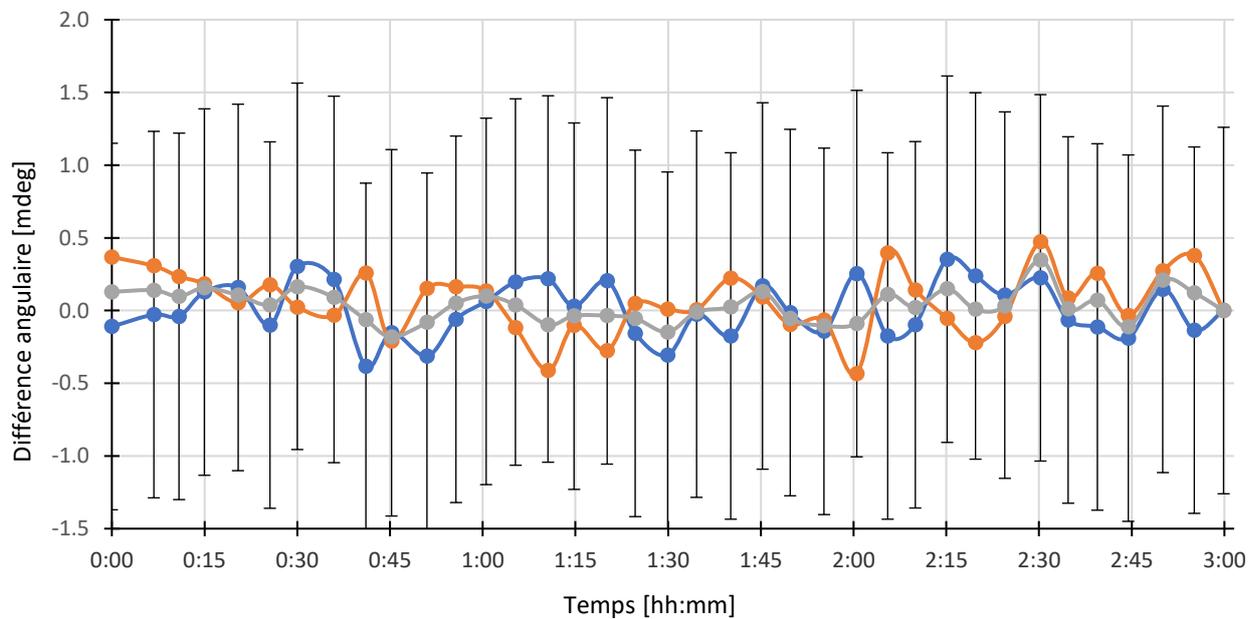
Résultats pour le point situé à hauteur de l'appareil :

Valeurs des barres d'erreurs sur les angles : 1.26 mdeg

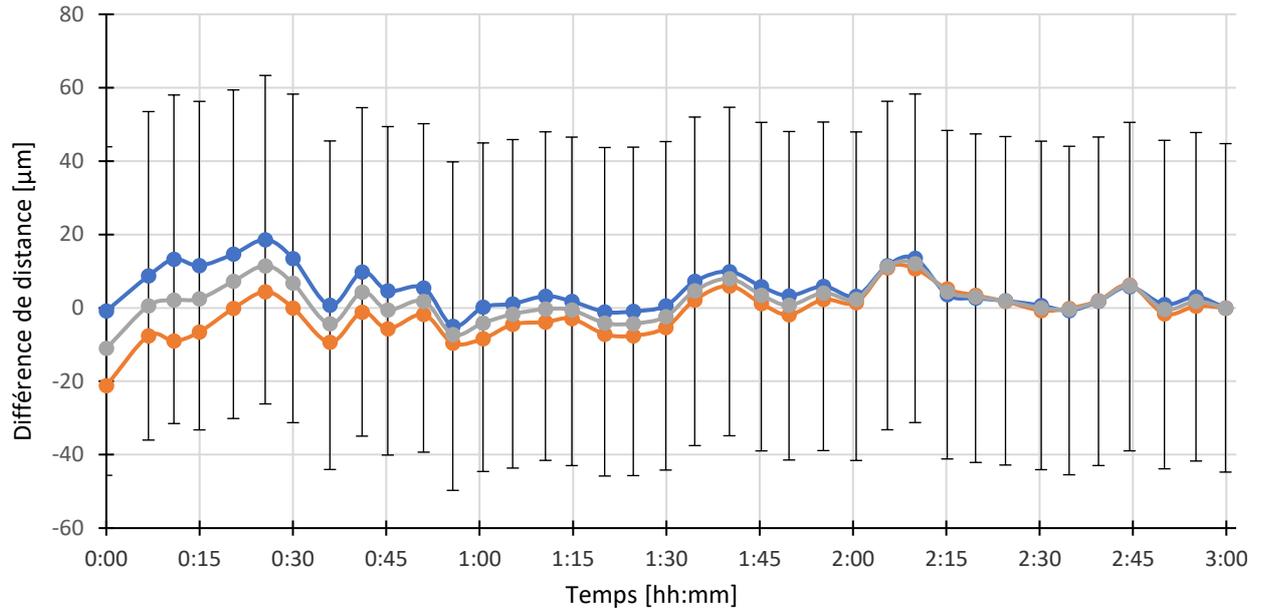
Valeurs des barres d'erreurs sur la distance : 44.8 μm



Graphique des mesures de l'angle horizontal



Graphique des mesures de l'angle vertical

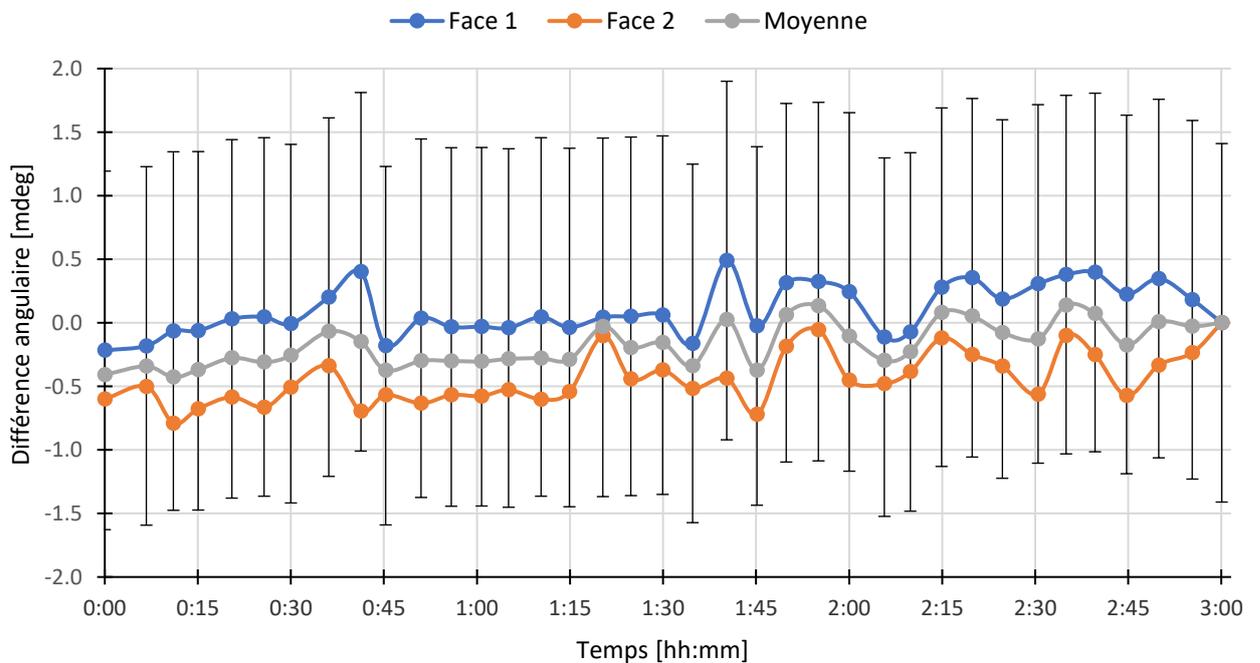


Graphique des mesures de distance

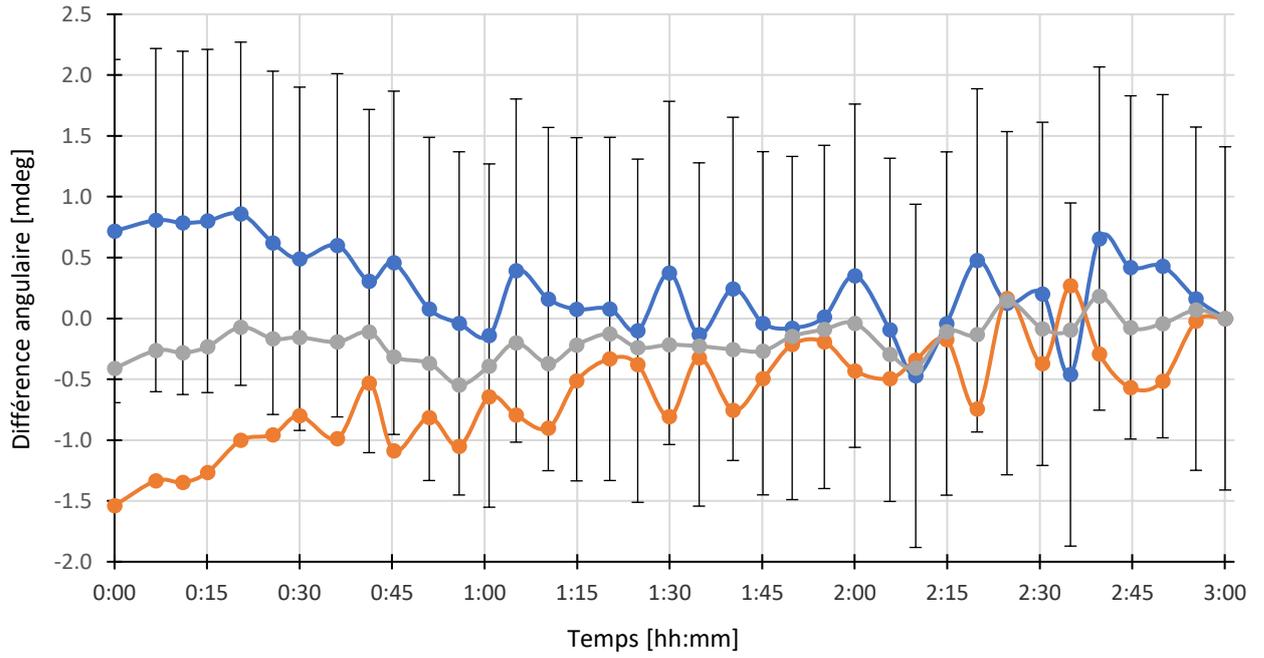
Résultats pour le point situé en hauteur :

Valeurs des barres d'erreurs sur les angles : 1.41 mdeg

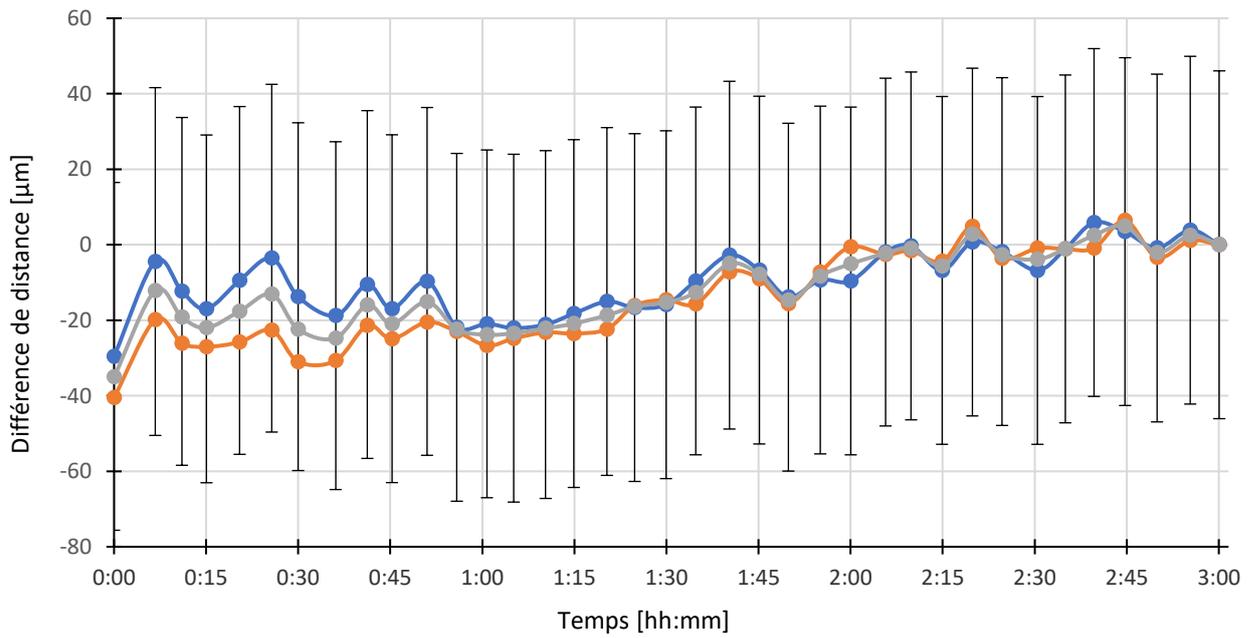
Valeurs des barres d'erreurs sur la distance : 46.1 μm



Graphique des mesures de l'angle horizontal



Graphique des mesures de l'angle vertical

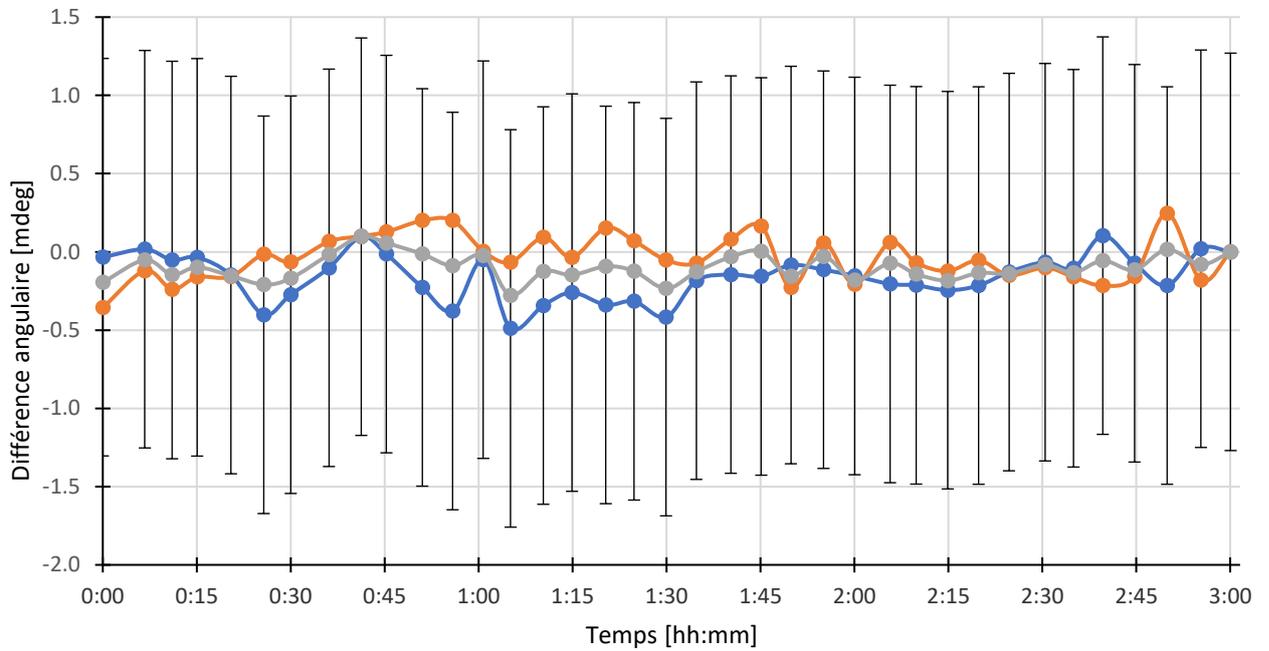


Graphique des mesures de distance

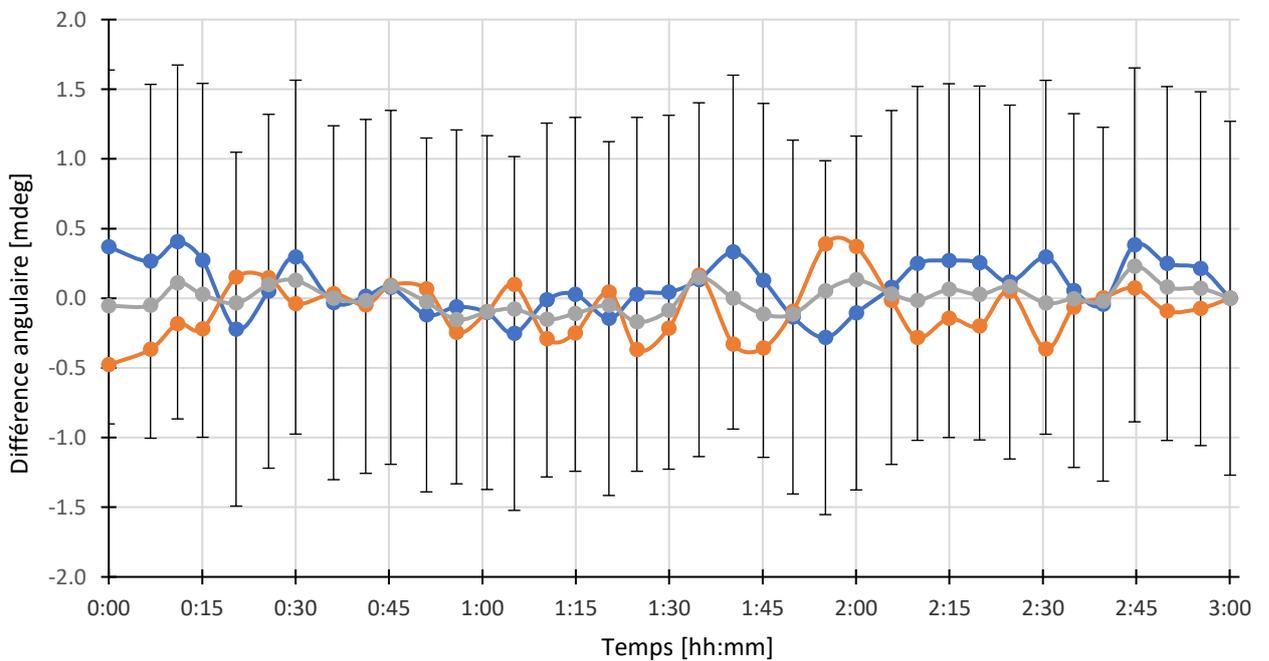
Résultats pour le point situé vers le sol :

Valeurs des barres d'erreurs sur les angles : 1.27 mdeg

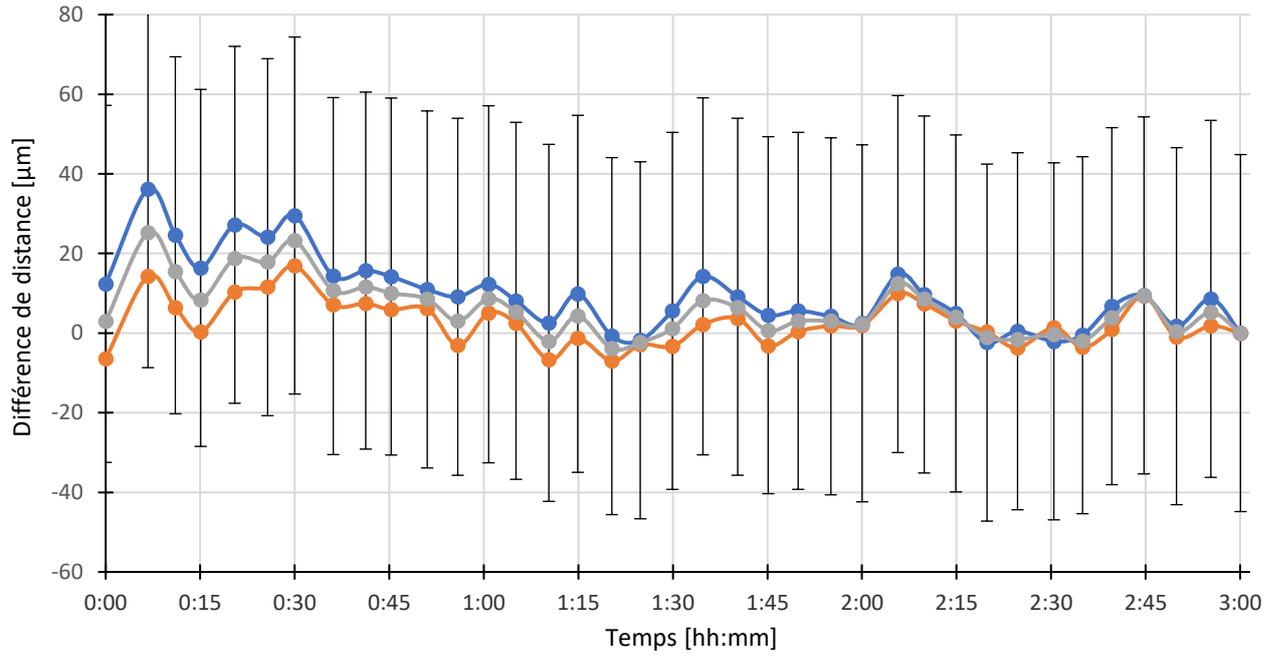
Valeurs des barres d'erreurs sur la distance : 44.8 μm



Graphique des mesures de l'angle horizontal



Graphique des mesures de l'angle vertical



Graphique des mesures de distance

ANNEXE 3 : RESULTATS DU TEST SUR LES MODES DE MESURES

Distance de 3 mètres en intérieur :

0°	Fast	Standard	Precise
Err Moy sur la distance	0.11	0.11	0.12
Plage de tolérance	± 0.30		
Points hors tolérance	411 (0.8%)	186 (0.3%)	9 (0.4%)
Bruit de mesure	0.08	0.07	0.08
Durée globale [min sec]	1'45"	3'10"	5'40"
Durée par point [msec]	2	4	173

45°	Fast	Standard	Precise
Err Moy sur la distance	0.24	0.24	0.22
Plage de tolérance	± 0.30		
Points hors tolérance	4857 (8.8%)	473 (3.4%)	25 (4.3%)
Bruit de mesure	0.05	0.03	0.09
Durée globale [min sec]	1'50"	3'25"	5'30"
Durée par point [msec]	2	16	636

Distance de 7 mètres en intérieur :

0°	Fast	Standard	Precise
Err Moy sur la distance	0.13	0.13	0.12
Plage de tolérance	± 0.30		
Points hors tolérance	1592 (2.6%)	157 (1.0%)	4 (0.7%)
Bruit de mesure	0.09	0.08	0.08
Durée globale [min sec]	1'40"	3'20"	6'00"
Durée par point [msec]	2	15	630

45°	Fast	Standard	Precise
Err Moy sur la distance	0.32	0.33	0.33
Plage de tolérance	± 0.30		
Points hors tolérance	38431 (67.8%)	11215 (77.7%)	439 (76.6%)
Bruit de mesure	0.05	0.04	0.04
Durée globale [min sec]	1'35"	3'15"	5'45"
Durée par point [msec]	2	16	646

Distance de 14 mètres en intérieur :

0°	Fast	Standard	Precise
Err Moy sur la distance	0.16	0.16	0.16
Plage de tolérance	± 0.30		
Points hors tolérance	1510 (2.7%)	204 (1.5%)	5 (0.9%)
Bruit de mesure	0.07	0.06	0.06
Durée globale [min sec]	1'35"	3'20"	5'00"
Durée par point [msec]	2	17	686

45°	Fast	Standard	Precise
Err Moy sur la distance	0.42	0.42	0.41
Plage de tolérance	± 0.30		
Points hors tolérance	51196 (98.8%)	12891 (99.7%)	524 (99.8%)
Bruit de mesure	0.05	0.04	0.04
Durée globale [min sec]	1'50"	3'55"	6'10"
Durée par point [msec]	2	18	705

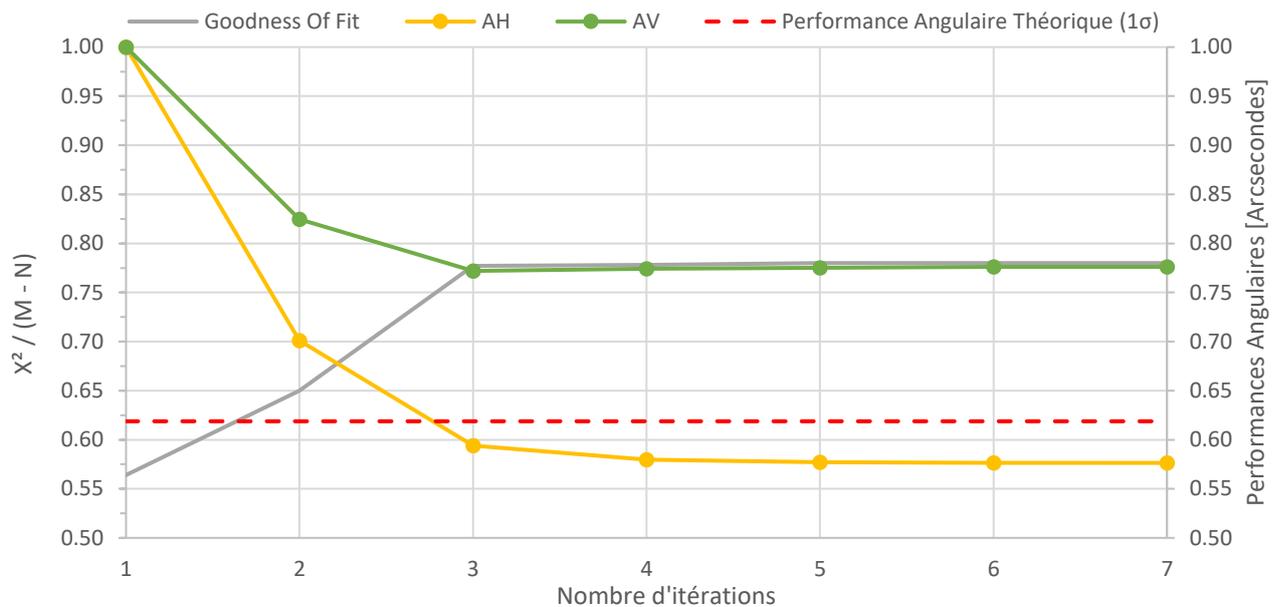
Distance de 20 mètres en extérieur :

0°	Fast	Standard	Precise
Err Moy sur la distance	0.35	0.27	0.35
Plage de tolérance	± 0.30		
Points hors tolérance	43067 (75.3%)	4603 (32.5%)	481 (81.7%)
Bruit de mesure	0.07	0.06	0.05
Durée globale [min sec]	1'45"	3'50"	6'10"
Durée par point [msec]	2	16	628

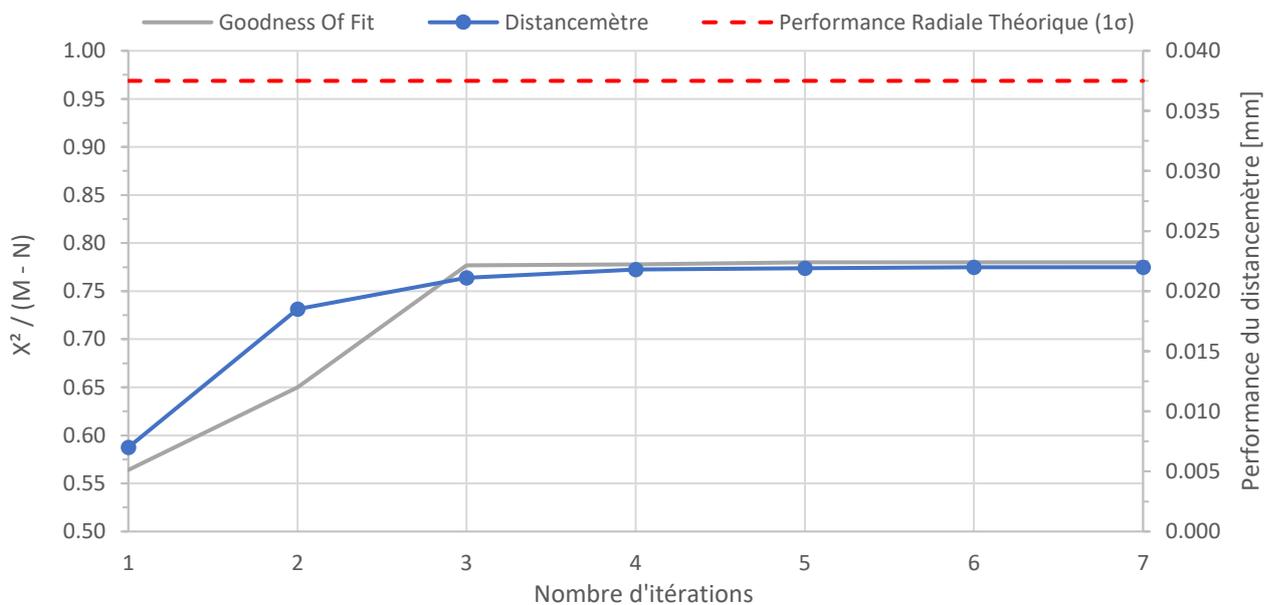
45°	Fast	Standard	Precise
Err Moy sur la distance	0.29	0.37	0.33
Plage de tolérance	± 0.30		
Points hors tolérance	22534 (49.0%)	8441 (70.2%)	281 (58.4%)
Bruit de mesure	0.14	0.13	0.13
Durée globale [min sec]	2'05"	4'30"	6'50"
Durée par point [msec]	2	19	769

ANNEXE 4 : RESULTATS DU CALCUL DES INCERTITUDES EXPERIMENTALES DE L'ATS600 AVEC UN DEUXIEME JEU DE DONNEES.

	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7
AH [Arcsecondes]	1.000	0.701	0.594	0.580	0.577	0.577	0.576
AV [Arcsecondes]	1.000	0.825	0.772	0.774	0.775	0.776	0.776
D [Millimètres]	0.007	0.019	0.021	0.022	0.022	0.022	0.022
Qualité	0.56	0.65	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78



Évolution des incertitudes angulaires expérimentales à 1σ de l'ATS600 en fonction du nombre d'itérations faites avec l'outil USMN de SA



Évolution de l'incertitude radiale expérimentale à 1σ de l'ATS600 en fonction du nombre d'itérations faites avec l'outil USMN de SA

ATS600 : QUELLES LIMITES EN PRATIQUE ?

Mémoire d'ingénieur CNAM ESGT

Résumé

L'ATS600 est le premier laser de poursuite à scanning direct au monde. Il a été développé principalement pour *la localisation et l'inspection numérique de grandes pièces et de surfaces qui sont inaccessibles pour un scanner laser 3D portable traditionnel, un palpeur tactile ou un réflecteur*².

SETIS, qui a mis en œuvre depuis 1998 toutes les générations de lasers de poursuite Leica, souhaite aller plus loin que la fiche produit éditée par Hexagon, indiquant les spécifications. L'estimation de l'exactitude des livrables n'étant pas toujours évidente, des tests seront effectués pour quantifier les paramètres influençant la qualité des mesures de cet appareil dans le cadre des applications de contrôle dimensionnel de SETIS.

Mots-clés : laser de poursuite, incertitude, précision, ATS600, lasergrammétrie, nuages de points, angle d'incidence, effets du temps de chauffe, filtrage.

Summary

The ATS600 is the world's first direct scanning laser tracker. It has been developed primarily for the *location and digital inspection of large parts and surfaces that are inaccessible to a traditional handheld 3D laser scanner, touch probe or reflector*².

SETIS, which has implemented all generations of Leica laser tracker since 1998, wants to go beyond the product sheet published by Hexagon, indicating the specifications. As the estimation of the accuracy of the deliverables is not always obvious, tests will be performed to quantify the parameters influencing the quality of the measurements of this device in the context of SETIS dimensional control applications.

Keywords : laser tracker, uncertainty, accuracy, ATS600, lasergrammetry, points cloud, incidence angle, warm-up effect, filtering.

² <https://www.hexagonmi.com/fr-FR/products/laser-tracker-systems/leica-absolute-tracker-ats600>