



HAL
open science

Mise en oeuvre du Laser Tracker FARO Ion dans le processus des contrôles métrologiques au Centre Spatial Guyanais

Julien Guillou

► **To cite this version:**

Julien Guillou. Mise en oeuvre du Laser Tracker FARO Ion dans le processus des contrôles métrologiques au Centre Spatial Guyanais. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2015. dumas-01337939

HAL Id: dumas-01337939

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01337939>

Submitted on 27 Jun 2016

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.

Remerciements

L'élaboration de ce Travail de Fin d'Étude a été rendue possible grâce à de nombreuses personnes qui ont apporté leur enseignement, leur soutien et leur amitié tout au long de ce projet mais aussi en amont.

D'abord, je tiens à remercier l'ensemble des membres de l'entreprise SATTAS qui, par leur accueil, ont facilité mon insertion dans la vie aussi bien professionnelle au Centre Spatial Guyanais que dans la vie quotidienne guyanaise. Je remercie plus particulièrement M. Henri SEC, chef de l'entreprise SATTAS, non seulement pour m'avoir accepté pour ce sujet mais aussi pour l'aspect humain de la relation entretenue.

Ensuite, pour son aide, ses conseils et échanges constructifs, je remercie mon maître de stage, M. Boureima OUEDRAOGO, ancien ESGT.

Pour m'avoir encadré lors de ce TFE, je remercie M. José CALI, professeur référent.

Pour m'avoir transmis le goût pour la science de la mesure et m'avoir donné envie de poursuivre dans un cursus d'ingénieur, je remercie M. Philippe RIVOALEN, géomètre-expert.

Plus généralement, je salue la formation dispensée l'École Supérieure des Géomètres et Topographes.

Pour m'avoir accompagné et encouragé à poursuivre les études, je remercie mes parents, ma famille et mes amis.

Enfin, pour l'ensemble des souvenirs de ces trois dernières années, je remercie mes amis de l'ESGT.

Liste des abréviations

aADM : agile Absolute Distance Measuring
Ae : Arianespace
AR5 : Ariane 5
AT: Autorité Technique
BAF : Bâtiment d'Assemblage Final
BCO : Bureau de Coordination et de Planification Opérationnelle
BCQ : Bureau de Coordination Qualité
BCS : Bureau de Coordination Sauvegarde
BET : Bureau d'Étude et de Travaux
BIL : Bâtiment d'Intégration Lanceur
BIP : Bâtiment d'Intégration des Propulseurs
BRP : Bâtiment de Revalidation des Palettes
BSE : Bâtiment Stockage EAP
CDL3 : Centre De Lancement ELA3
COEL : Coordinateur des Opérations de l'Ensemble de Lancement
CSG : Centre Spatial Guyanais
CNES : Centre National d'Études Spatiales
DAO : Dessin Assisté par Ordinateur
DRT : Demande de Réalisation de Travaux
EAP : Étage d'Accélération à Poudre
ECME : Équipement de Contrôle, de Mesure et d'Essai
ELA3 : Ensemble de Lancement Ariane n°3
EPC : Étage Principal Cryotechnique
ESA : European Spatial Agency
ESC : Étage Secondaire Cryotechnique
ETI : Expert Technique Industriel
FASO : Fiche d'Analyse et de Suivi des Opérations
ISO: International Organization for Standardization
LT : Laser Tracker
MPE: Maximum Permissible Error
PF : Plate-Forme
RDC : Rez-De-Chaussée
SATTAS : Société Américaine de Topographie et de Topographie Appliquée au Spatial
SMOS : Spécification de Mise en Œuvre Spécifique
SMR : Spherical Mounted Retroreflector
TFE : Travail de Fin d'Études
ZL3 : Zone de Lancement 3 (Ariane 5)

Table des matières

Remerciements	3
Liste des abréviations	5
Introduction	11
I. Contexte.....	15
A. Lieu du stage.....	15
B. SATTAS au CSG	15
1. L'entreprise	15
2. Moyens humains	15
3. Moyens techniques	16
4. Moyens logiciels	17
C. Les clients	17
D. Un cadre réglementé.....	18
1. Les Demandes de Réalisation de Travaux	18
2. La Fiche d'Analyse et de Suivi des Opérations (FASO)	18
3. Des protocoles de mesures encadrés	18
II. Comprendre le Laser Tracker	21
A. Historique des lasers de poursuite.....	21
B. Présentation du LT FARO Ion.....	21
1. Caractéristiques générales	21
2. La notion de précision	22
3. La mesure de distance.....	24
C. Origine de l'achat du LT.....	25
D. Comparaison Laser Tracker – Leica TS30	26
1. Précision	26
2. Sécurité laser	27
3. Mise en œuvre	28
E. Logiciel associé	28
1. Possibilités de mesure	28
2. Travailler en absolu	30

III.	Présentation générale des contrôles effectués.....	33
A.	Éléments à vérifier.....	33
1.	Le travail effectué.....	33
2.	Biens livrables.....	33
B.	L'exemple des contrôles sur les palettes au BRP	34
1.	Les palettes, un élément déterminant	34
2.	Les contrôles effectués.....	35
3.	Les mesures traditionnelles au tachéomètre et niveau.....	36
4.	Les mesures au LT.....	37
IV.	La métrologie au sein des bâtiments d'intégration et d'assemblage	39
A.	Les systèmes de coordonnées présents	39
1.	Le repère bâtiment.....	39
2.	Le repère table	39
B.	Le BIL	40
1.	Présentation du bâtiment	40
2.	Les réseaux	41
3.	La définition du repère BIL	42
4.	Campagne de mesure.....	42
5.	Analyse des mesures	43
C.	Le BAF.....	44
1.	Présentation du bâtiment	44
2.	Les réseaux	45
3.	La définition du repère BAF.....	45
4.	Campagne de mesure.....	46
D.	Analyse des résultats.....	47
1.	Logiques d'interprétation.....	47
2.	Les coordonnées définitives du réseau LT.....	48
3.	Les coordonnées définitives du réseau tachéomètre	51

V. Optimisation du choix de l'appareil suivant les interventions.....	53
A. La règle des 5M	53
1. Définition de la règle	53
2. Recherche des paramètres affectant la précision.....	54
3. Quantification des paramètres.....	54
4. Bilan.....	56
B. Mise à jour des procédures.....	57
Conclusion.....	61
Bibliographie.....	65
Liste des annexes	67
Annexes.....	68
Liste des figures.....	93
Liste des illustrations	95
Liste des tableaux.....	97
Résumé.....	100
Mots-clefs	100
Abstract.....	100
Key words	100

Introduction

En 1946, la Guyane devient un Département d'Outre-Mer et, est choisie le 14 avril 1964 par Arrêté ministériel pour accueillir une base spatiale. La position stratégique de Kourou, proche de l'équateur, son orientation littorale Nord-Ouest et sa faible densité font partie des raisons pour lesquelles cette ville a été retenue.

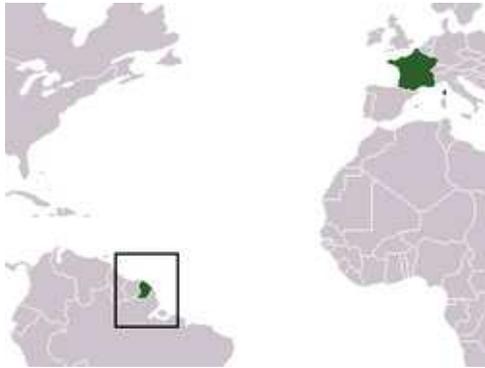


Illustration 1: La Guyane, DOM de la France



Illustration 2: Plan de situation du Centre Spatial Guyanais

Le Centre Spatial Guyanais et le CNES¹ vont s'installer l'année suivante, en 1965, à Kourou. Cette base de lancement s'étend sur 790 km² soit une superficie comparable à 7 fois celle de Paris, et c'est cette emprise géographique qui définit le CSG. 21 km² (comparable à Caen) sont dédiés à Ariane 5. Le CNES, quant à lui, est le propriétaire foncier de cette entité et, représente l'État français en remplissant ses diverses missions notamment en matière de sauvegarde.

L'ESA², elle, est l'organisation intergouvernementale qui, d'une part, développe les lanceurs et satellites européens, et d'autre part, est maître d'ouvrage donc pilote et finance les programmes de développement des différents lanceurs que sont Ariane 5, Soyouz et Vega.

Afin de combler les demandes croissantes de mise en orbite de satellites commerciaux, une entreprise de service de lancement a vu le jour sous l'identité d'Ae³. Ses actionnaires sont le CNES, Airbus Defence and Space et, les sociétés industrielles participant au programme Ariane. Parmi ces sociétés industrielles on peut citer Air-Liquide Spatial Guyane, Regulus, Europropulsion et Snecma, société du groupe Safran.

C'est donc grâce à ces différents organismes et la coopération de l'ensemble des acteurs que chaque année, une dizaine de lancements est effectué depuis le port spatial de l'Europe. Ces lancements, bien que pouvant avoir des objectifs différents, sont basés suivant les mêmes principes, c'est-à-dire qu'à l'aide d'un lanceur (Illustration 4) typiquement Ariane 5, Soyouz ou Vega, va être amenée dans l'espace une charge utile comme par exemple un satellite.



Illustration 3: Logos des acteurs principaux

¹ Centre National d'Études Spatiales

² European Spatial Agency

³ Arianespace

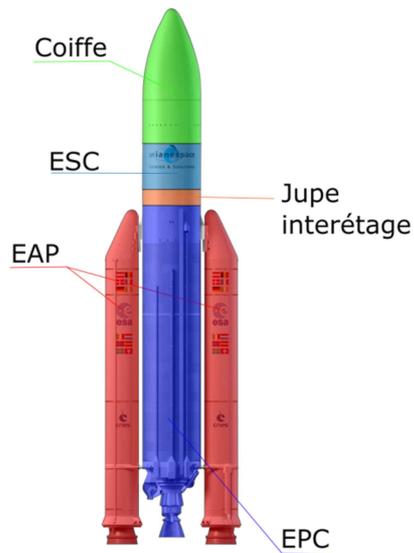


Illustration 4: Schéma du lanceur Ariane 5

- **EAP** : Étage d'Accélération à Poudre. Par paire, ils constituent les deux propulseurs initiaux de la fusée par le biais de deux moteurs à propergol solide, et se détachent 2 minutes 30 après le lancement.

- **EPC** : Étage Principal Cryotechnique. Il comprend l'ensemble de la partie technique, avec un moteur vulcain qui prend le relais après 2 minutes 30.

- **Juqe interétage** : Liaison entre EPC et ESC

- **ESC** : Étage Supérieur Cryotechnique. Contenant également un moteur, cet étage amène la dernière poussée de la fusée vers la mise en orbite.

- **La coiffe** : c'est l'élément qui vient refermer la fusée, et qui contient les charges utiles devant être mises en orbite.

Les éléments constituant le lanceur arrivent par bateau et sont acheminés sur le site du CSG pour y être assemblés. Parmi les bâtiments dédiés à Ariane5, on trouve le BSE⁴, le BRP⁵, le BIP⁶, le BIL⁷ et le BAF⁸. Ce sont dans ces deux derniers bâtiments que des réseaux sont déterminés pour effectuer les contrôles topométriques. Lorsque la fusée se trouve à ce stade, les décisions des responsables Ae concernant la conformité ou non-conformité des différents dispositifs revêtent des dimensions fondamentale et conditionnelle quant à la poursuite des opérations et le maintien du Jour J de lancement.

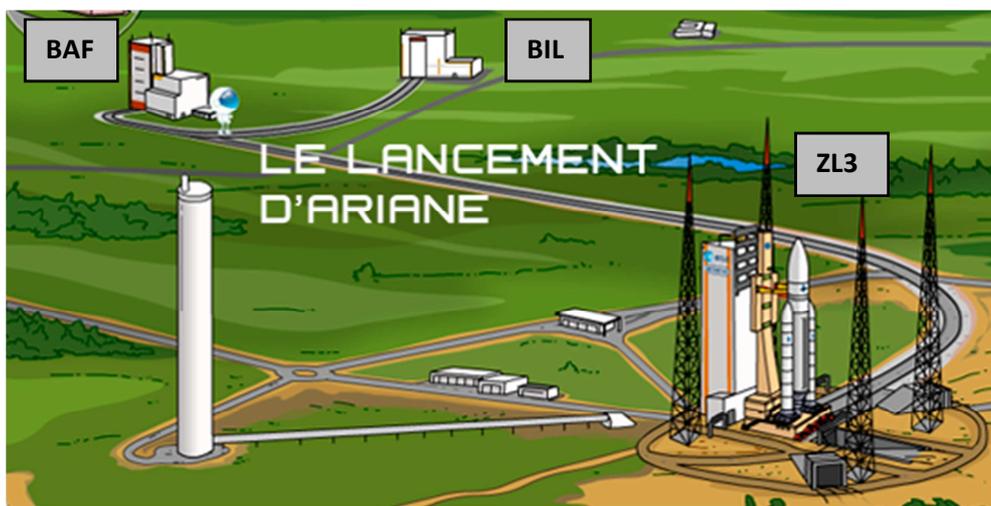


Illustration 5: Cheminement réalisé par un lanceur A5

⁴ Bâtiment de Stockage des Étages

⁵ Bâtiment de Revalidation des Palettes

⁶ Bâtiment d'Intégration des Propulseurs

⁷ Bâtiment d'Intégration Lanceur

⁸ Bâtiment d'Assemblage Final

Tout au long des différentes opérations, le lanceur repose sur une table, comme présentée sur l'illustration 6, qui constitue une véritable ossature mobile permettant non seulement l'assemblage de la fusée mais aussi son transfert grâce à une voie ferrée qui relie l'ensemble des bâtiments jusqu'au site de lancement. Fusée et table sont donc indissociables et intimement liées pour le montage et les transferts avec, au total, 3.5km de roulage (Illustration 5).

La table à vide pèse 870 tonnes pour supporter les 750 tonnes de la fusée. Après chaque tir, la table, après être nettoyée, est déplacée jusqu'à accueillir le prochain lanceur. Des contrôles de validation géométriques sont réalisés sur celles-ci au BIL, au BAF puis en ZL3 notamment pour la stabilité du mât ombilical de 58 mètres.

De plus, pour optimiser le nombre de campagnes simultanées, deux tables permettent d'effectuer les rotations.



Illustration 6: Schéma de la table

On comprend aisément qu'avant de voir le succès d'un lancement, de nombreuses interventions ont dû être effectuées par des acteurs disposant de capacités et spécificités variées. L'une d'entre elle consiste à vérifier la géométrie et les dimensions de pièces mais aussi contrôler leur implantation. Sans ces étapes de validation, la poursuite des assemblages ou l'autorisation de lancement pourrait être repoussée avec des conséquences économiques. C'est dans cette mesure qu'intervient l'ingénieur géomètre, ici nommé Expert Technique Industriel. Il va utiliser tous les moyens informatiques, matériels, humains et techniques pour procéder à ces mesurages. Pour cela, l'expert dans la science de la mesure utilise l'ensemble du matériel topographique mis à disposition par Ae, que ce soit des stations totales ou des niveaux numériques. Cependant, depuis 2010, Ae a acquis un nouvel appareil d'une précision nettement supérieure, le Laser Tracker FARO Ion, un laser de poursuite dont la mise en œuvre lourde peut cependant dissuader son utilisation. Par définition, les LT fournissent des coordonnées tridimensionnelles, avec une précision similaire sur chaque composante. Auparavant, avec les méthodes traditionnelles, pour obtenir une précision suffisante, il fallait combiner l'utilisation d'une station totale avec un niveau de précision. Le principal atout du LT, mis à part sa précision supérieure, réside donc dans le fait qu'on peut s'affranchir de deux techniques de mesure traditionnelle (tachéométrie et nivellement direct). C'est dans ce contexte d'augmentation de la précision, de viabilité de l'activité et d'une meilleure prise en compte du besoin client que la réalisation de ce Travail de Fin d'Études prend toute sa place.

Parmi les moyens disponibles au CSG, et suivant les procédures opérationnelles de contrôle, comment déterminer si l'utilisation d'un appareil de type LT⁹ est nécessaire dans le processus de mesurage d'où la problématique de la « Mise en œuvre du LT FARO Ion dans le processus des contrôles métrologiques au Centre Spatial Guyanais. »

⁹ Laser Tracker

Le contexte général permettra de présenter l'entreprise et l'atmosphère de travail qui règne au CSG, en insistant sur les conditions de mesure au CSG. Une partie traitera du Laser Tracker, notamment des raisons de sa présence, mais plus généralement de ses caractéristiques et de ses possibilités. Celles-ci seront également mises en avant dans le cadre de la présentation de contrôles métrologiques qui sont actuellement réalisés pour du travail en relatif. Le travail en absolu dans le BIL et le BAF commence à se développer avec le LT, selon les préconisations du client Ae. La confiance sur la qualité des cibles topographiques ne semblant plus être accordée.

C'est donc par une campagne de revalidation du réseau métrologique dans le BIL et, dans le BAF, que ce travail de recherche va débiter. On entend par campagne de revalidation du réseau métrologique la nouvelle caractérisation de l'ensemble de ses points afin de constater les écarts et conclure quant à la pérennité du réseau. Ensuite, il conviendra de comparer le réseau traditionnel tachéométrique obtenu par observations tachéométriques et le réseau tachéométrique observé par le LT. On verra également comment cette nouvelle caractérisation du réseau tachéométrique par le LT peut prétendre améliorer les conditions de lever. Enfin, il sera dressé un inventaire des opérations effectuées en associant les appareils les plus appropriés pour faire les mesures.

I. Contexte

A. Lieu du stage

Le stage a eu lieu au CSG où le CNES fournit un bureau dans lequel le service topographique est installé. Ce bureau se situe dans le bâtiment accueillant le BET¹⁰. C'est l'entreprise CEGELEC, groupe industriel franco-allemand, qui s'est vu confier par le CNES, dans le cadre d'un groupement d'entreprises, la réalisation d'études, de suivi de travaux dans les domaines de l'énergie, la climatisation, les courants faibles et les infrastructures. La mécanique et les systèmes fluides sont eux gérés par la société APCO présente au BET.

B. SATTAS au CSG

1. L'entreprise

SATTAS (Société Américaine de Topographie et de Topographie Appliquée au Spatial), l'entreprise d'accueil de ce présent TFE, dispose de deux domaines d'intervention comme son nom l'indique. D'abord, cette société opère au niveau du foncier et de la topographie classique comme tout autre cabinet pourrait le faire, mais, en plus, met à disposition ses compétences et son expérience de 20 ans dans le domaine de la métrologie spécifique au spatial. Pour travailler au sein du CSG, SATTAS est titulaire d'un contrat de sous-traitance de 5 ans avec CEGELEC dont l'objet porte sur deux prestations. D'une part, il s'agit de la réalisation de travaux de topographie et de métrologie dimensionnelle et d'autre part de la gestion de la documentation associée.



Illustration 7: Logo SATTAS

2. Moyens humains

Ainsi, un ETI¹¹ ayant un statut d'ingénieur géomètre, et un opérateur sont présents à temps plein au CSG pour effectuer ces prestations. Ils sont accompagnés au besoin par des équipes de terrain de l'entreprise pour effectuer les relevés de topographie.

L'ETI sous la direction du chef de l'entreprise SATTAS, d'après la procédure particulière d'assurance qualité pour la gestion des ressources humaines, est chargé de:

- *Participer au déroulement des dossiers de tous types*
- *Superviser l'étalonnage et le contrôle du matériel (ECME¹²) qui est affecté au groupe*
- *Proposer des améliorations aux méthodes et procédés et assurer leur mise en œuvre totale ou partielle*

C'est sur ce dernier point que l'ETI se doit d'être particulièrement sensibilisé notamment pour valider ou remettre en cause certaines procédures ou demandes ponctuelles. En effet, avant d'intervenir, la faisabilité de l'opération doit être réfléchie, et l'ETI doit savoir énoncer ses capacités en matière de mesure et faire preuve d'esprit critique par rapport aux demandes des clients.

¹⁰ Bureau d'Études et de Travaux

¹¹ Expert Technique Industriel

¹² Équipement de Contrôle de Mesure et d'Essai

3. Moyens techniques

a) Inventaire et classification

Afin d'être en mesure de réaliser ses missions, le service topographie utilise l'ensemble du matériel mis à disposition par Ae et le CNES. Le *Tableau 1* récapitule le matériel en activité.

Type	Marque	Référence	Utilisation	Catégorie
GPS	Leica	GS15	Topographie	Mesureur
Stations totales	Leica	TCRA1103	Topographie	Mesureur
	Leica	TCRP1203+	Topographie	Mesureur
	Leica	TS30	Métrologie	Mesureur
Niveau	Leica	DNA03	Métrologie/Topographie	Mesureur
Laser Tracker	Faro	Ion	Métrologie	Contrôleur

Tableau 1: Appareils utilisés par le service topographie

Les appareils se voient affecter soit dans la catégorie mesureur soit dans la catégorie contrôleur. Un mesureur va fournir une valeur d'une dimension avec une incertitude connue. Un contrôleur, quant à lui, va effectivement fournir des valeurs d'une dimension avec également une incertitude connue mais qui aura pour conséquence de donner un résultat de type conforme/non conforme.

b) Gestion des équipements

Les tachéomètres sont étalonnés tous les quatre ans dans les centres d'étalonnage du constructeur *Leica* afin de vérifier leur conformité en délivrant un certificat officiel et ainsi prendre une décision quant à la réforme éventuelle de ceux-ci. Pour chaque appareil, une fiche de vie récapitule l'ensemble des opérations de vérification, d'étalonnage et de réparation. Ainsi, chaque appareil dispose d'un code ECME qui doit être rappelé lors de chaque opération afin de laisser une trace pérenne du matériel utilisé lors de l'intervention.

Cependant, indépendamment de l'étalonnage, une vérification annuelle est effectuée par le service topographique. Pour les stations totales, la qualité angulaire est vérifiée par le biais de la norme ISO 17123-3:2001 intitulée "*Optique et instruments d'optique - Méthodes d'essai sur site des instruments géodésiques et d'observation — Partie 3: Théodolites*". La vérification complète consiste en 4 campagnes de mesures où l'on vise 5 cibles bien réparties spatialement sur un même plan horizontal distant dans l'idéal de plus de 100 mètres, et 4 cibles sur un plan vertical à plus de 50 mètres. A chaque campagne, on mesure l'ensemble des directions en cercle gauche sens horaire puis en cercle droit sens anti-horaire et cela, 3 fois en effectuant une rotation de l'embase de 120°. Après une analyse statistique, on obtient l'incertitude expérimentale (σ_{exp}) que l'on peut comparer à l'incertitude donnée par le fabricant (σ_{fab}), et qui nous permet de valider l'appareil. En général, on cherche à exprimer le coefficient k tel que $\sigma_{exp} = k \times \sigma_{fab}$. Cette norme donne du poids à cette vérification car en tant que référence internationale, elle fait foi aux yeux du client. Le principe de ce contrôle est visible en *Annexe 1* et en *Annexe 2* récapitulant une des séries d'observations angulaires. Finalement, après moyennes des quatre séries, on obtient un coefficient $k=4$, qui indique donc que $\sigma_{exp} = 0.6 \text{ mgon}$ au lieu des 0.15 mgon annoncée par le constructeur. On peut associer cette incertitude à une incertitude élargie.

Pour le niveau, le défaut de collimation est vérifié suivant les procédures existantes et méthodes recommandées par le constructeur.

Le LT, lui, est contrôlé et étalonné tous les ans à la maison mère de Faro qui fournit un certificat d'étalonnage visible en *Annexe 3*.

4. Moyens logiciels

Au niveau du traitement graphique, le logiciel de DAO¹³ est le standard d'Autodesk, *Autocad*.

Au niveau du traitement des données, plusieurs logiciels/applications sont disponibles.

D'abord, pour tout ce qui concerne les travaux de topographie, *Covadis 13.0*, logiciel développé par Géomédia SAS, est utilisé pour traiter les polygonales, les relèvements...

Ensuite, pour les mesures métrologiques, donc mesures présentant de la redondance, *COMP3D 3.0.7*, développé par l'IGN, permet d'optimiser le calcul par la méthode de compensation des moindres carrés. En plus de cela, avec ce logiciel de compensation micro-géodésique, on obtient les ellipses de confiance sur les résultats finaux. En utilisant *COMP3D*, comme le dit M. GUERIN dans son TFE « *Comparaison de logiciels d'ajustement de mesures topographiques* » de 2010, on émet donc l'hypothèse de travail sur une terre sphérique, car avant le calcul, le coefficient de réfraction est demandé ainsi que la latitude moyenne du chantier.

Enfin, des applications adaptées au besoin ont été développées en interne sous le nom de *TOP*. Il permet, en particulier d'automatiser des opérations récurrentes, de maîtriser les différentes extensions de fichier...

Associé au Laser Tracker, Faro propose le logiciel *CAM2Q v1.5* qui sera détaillé dans un paragraphe dédié.

C. Les clients

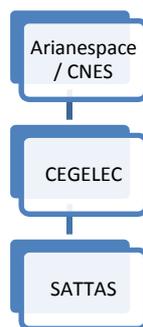


Figure 1: Hiérarchie des demandeurs d'activités

Dans le contrat, il est prévu que SATTAS travaille sous la direction de CEGELEC, entreprise qui est elle-même sous contrat avec Ae et le CNES. Dès lors, on va trouver de nombreux interlocuteurs d'entreprises différentes avec des besoins spécifiques.

De plus, d'après l'organigramme présent en *Annexe 4*, il paraît évident que les DRT¹⁴ émanent de responsables de domaines différents. Ainsi, comprendre le travail, les besoins des autres corps de métiers pour lesquels le géomètre peut être amené à effectuer des mesures est le point fondamental d'une coopération réussie. En effet, rester cantonner dans notre rôle strict de professionnel dans la science de la mesure ne nous rend pas service dans le sens où l'on ne comprend pas la finalité de nos interventions. Au contraire, l'ingénieur se doit d'ouvrir son esprit afin de posséder l'ensemble des informations pour faire le lien entre mesures et objectifs d'une part, et, entre les différents acteurs d'autre part...

Le demandeur de la prestation est amené à formuler des DRT après avoir analysé les demandes des clients. Lorsqu'il s'agit du CNES, la DRT est déclenchée dès l'arrivée de la demande mais une fois validée par le service infrastructure. Pour Ae, si les opérations sont standards, le planning le prend automatiquement en compte mais lorsqu'il s'agit d'une demande ponctuelle, une DRT/Ae est nécessaire. Concernant le BIL et le BAF, c'est Ae qui effectue directement ces demandes. Les membres d'Ae sont principalement des mécaniciens qui travaillent à partir de plans, sur des

¹³ Dessin Assisté par Ordinateur

¹⁴ Demande de Réalisation de Travaux

pièces dont ils connaissent les valeurs nominales et les spécifications associées, spécification inférieure et spécification supérieure pouvant être différentes. De plus, ces pièces correspondent à des surfaces définies mathématiquement or, nous mesurons les surfaces réelles avec des défauts géométriques et dimensionnels dus à la fabrication. C'est donc véritablement une approche différente que doit adopter l'ETI pour délivrer ses résultats. Il doit en effet, bien séparer le côté géométrique du côté dimensionnel. La géométrie d'une pièce est sa forme réputée, tandis que la dimension est effectivement la cote de celle-ci. Ainsi, étant donnée qu'une incertitude entache chaque mesure, une précision sur la géométrie sera donnée (défaut de linéarité, de planéité, de circularité...) mais aussi une précision dimensionnelle (diamètre, angle...).

D. Un cadre réglementé

1. Les Demandes de Réalisation de Travaux

D'après le contrat, on distingue deux demandeurs.

Le CNES qui remplit un formulaire de DRT qu'il transmet au service infrastructure auquel est rattaché le service topo. On trouve dans cette demande le type d'activité, la date d'intervention, le lieu et les derniers délais de livraison. Ces DRT peuvent faire l'objet de consultation, de modification et de clôture de la part du service topo.

Si le demandeur est un membre d'Ae, la demande doit au préalable être validée par l'AT¹⁵ Topo d'Ae puis transmise au COEL¹⁶, qui enregistre et transmet au BET.

2. La Fiche d'Analyse et de Suivi des Opérations (FASO)

Les FASO peuvent être en quelque sorte comparées à des permis de travail. Sans FASO, il est impossible d'accéder aux sites car la demande d'activité doit être validée par la sauvegarde, la qualité et le responsable de campagne. Dès lors, suivant les activités, qui sont classées suivant leur niveau de risque, les accès aux bâtiments peuvent être refusés.

Elles permettent à la planification de voir les dates, horaires, l'intitulé des opérations mais aussi l'identité et le nombre des intervenants. Il peut arriver qu'une plateforme soit limitée en nombre de place d'où un accès restreint.

3. Des protocoles de mesures encadrés

a) Les procédures

Afin d'effectuer les mesures sur le site, Ae valide les procédures rédigées par les responsables des différents secteurs, et donc le matériel utilisé. Une procédure, est par définition un guide pouvant être suivi pas à pas, même par un nouvel arrivant, afin de réaliser des opérations de manière autonome.

Au sommaire de chaque procédure, on retrouve le but de l'opération, les consignes (les contraintes opérationnelles, les contraintes de sécurité), la préparation (le matériel de mise en œuvre, les documents, le personnel), et, le déroulement (définitions, principes et références des mesurages, mise en place du matériel et mesurage, exploitation des mesures).

Au total, on dénombre 10 procédures topographiques Ae. Pour la majorité des interventions, station totale et niveau de précision suffisent si l'on compare à la précision exigée (de l'ordre du

¹⁵ Autorité Technique

¹⁶ Coordinateur des Opérations de l'Ensemble de Lancement

mm). Cependant, certaines pièces à contrôler sont plus sensibles et demandent une précision supérieure (dixième de mm) plus difficile à atteindre avec ces appareils de topographie classiques. Le laser de poursuite est actuellement en phase de qualification et validation. C'est dans ce contexte que la mise en place d'un nouvel appareil de mesure plus précis s'intègre et doit répondre à ces besoins. Ces 10 procédures sont accessibles en *Annexe 5*.

b) Les Spécifications de Mise en Œuvre Spécifiques (SMOS)

Indépendamment des procédures rédigées pour le compte d'Ae, des Spécifications de Mise en Œuvre Spécifiques viennent en complément pour des opérations récurrentes mais auxquelles aucune procédure ne clairement définie. La grande différence vient du fait que cette spécification est rédigée par les membres d'Arianespace, qui souvent, ne se rendent pas compte des capacités ou plutôt des limites de nos appareils liées aux contraintes des bâtiments. Sur ces SMOS, les spécifications des valeurs nominales sont indiquées afin de pouvoir comparer en temps réel les résultats des mesures.

La SMOS est rédigée par Ae et doit être liée à une procédure spécifique. Dans le cas du service topographique, cette procédure spécifique est remplacée par une fiche technique.

C'est donc dans le cadre de ce contexte opérationnel que la connaissance des instruments de mesure est indispensable. En particulier, il s'agit de découvrir le LT et ses possibilités dans des conditions de mesure idéales.

II. Comprendre le Laser Tracker

A. Historique des lasers de poursuite

L'apparition des lasers de poursuite remonte aux années 1990 au moment où les stations totales font également leur apparition. Cependant, leur domaine d'utilisation reste bien délimité, et l'utilisation de chaque appareil se fait dans des conditions bien déterminées et spécifiques. En effet, le laser de poursuite est à l'origine un appareil de mesure utilisé dans l'industrie en particulier dans l'aéronautique, grâce à ces solutions de mesures assistées par ordinateur. Le principal avantage de la solution Laser Tracker, outre ses meilleures performances en terme de précision, est l'instantanéité du résultat de mesurage. En effet, l'appareil étant couplé à un ordinateur, un logiciel permet d'obtenir les résultats des mesures directement et évite ainsi le post-traitement et permet de recommencer les mesures si les résultats ne sont pas conformes. Ainsi, les premiers utilisateurs sont les mécaniciens, les géomètres n'étant pas familiarisés ni sensibilisés à ce type d'appareil.

La marque FARO, elle, proposait à l'origine un moyen de mesure permettant de contrôler dimension et géométrie de prothèses médicales. C'est seulement après avoir découvert le potentiel de l'industrie, que FARO a sorti des modèles de Laser Tracker. À l'heure actuelle, on retrouve les LT dans les domaines de l'automobile, l'aéronautique, l'aérospatial, les biens de consommation (...) pour permettre l'alignement de machine, l'analyse dimensionnelle, le calibrage de machine, le calibrage de robot, le contrôle de réception, la fabrication et le réglage d'outillage, l'inspection de grandes pièces, et, la rétro-ingénierie.

B. Présentation du LT FARO Ion

1. Caractéristiques générales

En quelques chiffres, le LT c'est un appareil de mesure de 17 kg, pour 30 cm sur 50 cm. Le LT se transporte à l'aide de deux caisses et le trépied qui lui est associé fait 15 kg. Ainsi, cela pour montrer que bien que portable, le LT n'est pas facile à transporter.

Le LT, à l'image d'un tachéomètre, mesure deux angles, horizontal et vertical à l'aide de deux encodeurs et, une distance à l'aide de la technologie aADM¹⁷. La fréquence d'échantillonnage est de 1000 points par seconde. Un interféromètre peut être également présent sur cette série d'appareil, cependant le modèle présent au CSG n'en dispose pas. La première grande différence se fait au niveau de la visée, en effet, aucun oculaire n'est présent sur le LT, s'agissant d'un laser de poursuite, il détecte et suit automatiquement sa cible. La seconde différence est qu'on ne peut pas stationner le LT Faro ION sur un point. Effectivement, le LT ne dispose pas de plomb optique.



Illustration 8 : Laser Tracker Faro Ion

¹⁷ agile Absolute Distance Measuring

2. La notion de précision

Afin de proposer un rapport cohérent et compréhensible par un maximum de personnes, le vocabulaire de métrologie utilisé sera en accord avec la terminologie du VIM¹⁸. Ce dernier, et je cite, « se propose d'être une référence commune pour les scientifiques et les ingénieurs [...] ainsi que les enseignants et praticiens impliqués dans la planification ou la réalisation de mesurage ».

Afin de donner du sens à une mesure, le résultat de mesurage doit effectivement comprendre la valeur mesurée éventuellement corrigée de certains paramètres externes affectant la mesure, plus, une précision associée. En effet, consulter uniquement le résultat de mesurage, sans avoir connaissance de l'incertitude, n'a aucun sens. De plus, il apparaît que comparée au résultat de mesurage, l'incertitude est plus difficile, d'une part à définir, et d'autre part à quantifier.

a) Définition

Il existe deux types de précision, ou plutôt deux types d'évaluation de l'incertitude d'après le GUM¹⁹. Ces deux types sont dénommés par l'évaluation de l'incertitude de type A et l'évaluation de l'incertitude de type B.

D'abord, l'évaluation de l'incertitude de type A va être évoquée. Cette incertitude est déterminée à la suite d'un ensemble de mesures effectuées dans des conditions de mesures définies. Cet ensemble de mesures va faire l'objet d'une analyse statistique, comme par exemple, la détermination de la Gaussienne caractéristique de l'ensemble de mesures.

Ensuite, vient l'évaluation de l'incertitude de type B, évaluation qui rassemble les autres moyens de détermination. Le GUM donne comme exemples, des valeurs publiées faisant autorité, obtenues à partir d'un certificat d'étalonnage, obtenues à partir de limites déduites de l'expérience personnelle... Pour l'obtenir, le bilan des erreurs aléatoires et des erreurs systématiques doit être effectué.

Les constructeurs de matériel topographique donne leurs spécifications ou incertitudes de mesure à 1σ , c'est à dire suivant une analyse statistique. L'incertitude annoncée correspond donc à un seuil de confiance de 66.3% pour lequel les valeurs mesurées x_i sont comprises dans l'intervalle de centre m , la moyenne arithmétique $[m-\sigma; m+\sigma]$. Il s'agit donc d'une évaluation d'incertitude de type A basée sur une analyse statistique.

Cependant, la manière de présenter les incertitudes pour les Lasers Tracker est différente. En effet, avant l'apparition de la norme ASME²⁰ B89.4.19-2006 chaque constructeur formulait l'expression de l'incertitude de son appareil comme il le voulait. Ainsi, après la rédaction de cette norme, la possibilité de certifier les appareils suivant cette norme a été rendue possible. Cela a donc permis d'amener de la transparence pour l'utilisateur et d'harmoniser et de proposer un standard pour les spécifications des constructeurs. On peut donc parler d'évaluation d'incertitude de type B.

Un nouveau terme a été introduit par cette norme, il s'agit de l'EMT²¹ ou MPE²² en anglais. Il s'agit, pour une valeur mesurée, de la différence en absolue des valeurs extrêmes de spécification et la valeur de référence dite conventionnellement vraie. Autrement dit, la valeur mesurée doit être incluse dans l'intervalle de la valeur conventionnellement vraie plus ou moins l'écart maximum. Cet écart maximum correspond donc à la moitié de l'intervalle de tolérance, que l'intervalle soit

¹⁸ Vocabulaire International de Métrologie

¹⁹ Guide to the expression of Uncertainty in Measurement

²⁰ American Society of Mechanical Engineers

²¹ Erreur Maximale Tolérée

²² Maximum Permissible Error

symétrique ou non, unilatéral ou bilatéral. Pour obtenir l'incertitude type associée σ , on se place dans le cas d'une loi de distribution rectangulaire symétrique de largeur $a = MPE$. Cela, signifie que la probabilité de trouver une valeur en dehors de cette fonction est nulle, on parle de distribution d'entropie maximale sur $[-a ; a]$. Dès lors, l'incertitude caractéristique est $\sigma = \frac{a}{\sqrt{3}}$.

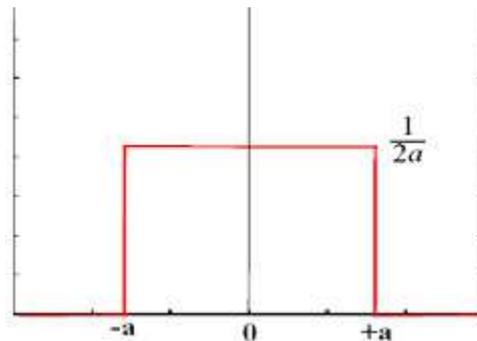


Figure 2: Loi de probabilité rectangulaire

b) Quantification

Dans sa notice technique, Faro annonce les précisions typiques de son appareil LT Ion suivant la norme ASME B89.4.19-2006 :

Précision typique du distancemètre : $8 \mu\text{m} + 0.4 \mu\text{m}/\text{m}$

Précision typique angulaire : $10 \mu\text{m} + 2.5 \mu\text{m}/\text{m}$

Les incertitudes annoncées par le constructeur correspondent en réalité à la moitié de l'erreur maximale tolérée, c'est à dire que la performance typique de l'appareil est la moitié des valeurs MPE. Ainsi, on obtient d'après le constructeur $\sigma = \frac{MPE}{2}$. Ainsi, l'incertitude donnée par le constructeur est bien cohérente avec le modèle d'une loi rectangulaire, et elle est même plus pessimiste.

Afin de rester critique et avoir un ordre de grandeur, cette précision de mesure peut être comparée au diamètre d'un cheveu valant aux alentours de $10 \mu\text{m}$. Aussi, en comparaison au pouvoir de résolution de l'œil, qui est de l'ordre de 3×10^{-4} rad, cela équivaut à pouvoir discerner $10 \mu\text{m}$ à une distance de 35 cm.

En général, les constructeurs fournissent une précision en termes de distance en mètre, et d'autre part, une précision angulaire exprimée généralement en gon. Même si cela revient finalement au même, il convient d'indiquer qu'en métrologie dimensionnelle, il est plus cohérent de concevoir la précision dans une composante radiale (précision du distancemètre) et une composante transversale (précision transversale), les deux exprimées en mètre.

Sa précision supérieure et sa mobilité font du LT une MMT²³ portable. Ce type d'appareil, initialement utilisé dans l'aéronautique et dans l'industrie automobile, voit sa popularité augmenter du fait de son efficacité.

Les mesures étant affectées par les paramètres atmosphériques, deux stations météo fournissent toutes les 5 secondes, température, pression et humidité à une précision respective de $0.4 \text{ }^\circ\text{C}$ pour la température, 1.4 mmHg pour la pression et 2% pour l'humidité. La première station est interne à l'appareil et la seconde est sous la forme d'un câble de plusieurs mètres de long avec au bout, le capteur. Ainsi, la correction des mesures se fait en temps réel.

²³ Machine à Mesurer Tridimensionnelle

3. La mesure de distance

a) Les réflecteurs sphériques

Afin de prendre les mesures, différents réflecteurs SMR²⁴ sont disponibles. Ces sphères, de dimensions connues, renferment un prisme dont le coin du cube se situe au centre. Il existe trois sphères de dimensions différentes dont dépend la précision du couple appareil/prisme. La première, de diamètre 1.5" (soit 3.81 cm) est la plus précise avec une précision de centrage de $\pm 0,0076$ mm. Les deux autres, respectivement de 0.875" (2.22 cm) et de 0.5" (1.27 cm) possèdent la même précision, $\pm 0,0127$ mm. Ces cibles réfléchissent le rayon laser parallèlement au rayon incident, et pour pouvoir réfléchir suffisamment, il ne doit pas y avoir plus de 30° d'écart d'orientation de la sphère par rapport au rayon incident. Différents accessoires sont également disponibles mais ne seront pas détaillés ici.



Illustration 9: SMR de 1.5", 0.875" et de 0.5"

b) Le principe de mesure

L'appareil pouvant disposer de l'interféromètre, il semble important de faire la différence entre les deux technologies principales de mesure de distance:

- **l'interféromètre (IFM)** mesure une distance incrémentée, donc relative, grâce à une fréquence stabilisée (laser HeNe). La lumière laser se sépare en deux faisceaux, un va directement dans l'interféromètre et l'autre va réfléchir dans le SMR puis passe dans l'interféromètre à son tour. À l'intérieur de l'interféromètre, les deux faisceaux interfèrent ce qui se traduit par un changement de cycle dès que le SMR bouge d'1/4 de la longueur d'onde (0.0158 micron). Ensuite, le circuit électrique compte les changements de cycle (ou nombre de franges) pour déterminer la distance traversée par le SMR. Le problème est qu'il ne faut pas couper le faisceau sinon on est obligé de repartir du point de référence.

D'après les tests effectués par R. SUGUHARA, M. MASUZAWA et ASUZAWA et Y. OHSAWA dans leur document intitulé « Performance test of laser trackers of Faro », l'IFM semble stabiliser les mesures dans le temps. En son absence, la mesure de distance présente des variations de l'ordre du 1/100° de millimètres pour des mesures en continu toutes les secondes pendant 10 heures, avec en particulier un saut de 0.04 mm les premières trentes minutes après le démarrage de l'appareil. Lorsque les mesures sont effectuées avec l'IFM, même après le démarrage, la mesure de distance varie avec une oscillation de quelques μm .

²⁴ Spherical Mounted Retroreflector

- **l'Absolute Distance Measuring (ADM)**, mesure une distance en absolue. Le faisceau laser est réfléchi par le SMR dans le LT puis converti en signal électrique puis analysé pour déterminer le temps de vol. Enfin, le temps déterminé est multiplié par la vitesse de la lumière dans l'air pour obtenir la distance entre LT et SMR.

Parallèlement, le LT est équipé d'une technologie propre au constructeur :

- **l'Agile Absolute Distance Measuring (aADM)**, est une nouvelle technologie issue de l'ADM développée par FARO permettant d'acquérir une cible tenue en main même si la cible se déplace et cela sans relai avec un interféromètre. Le principe est que le LT module son faisceau laser à 3 fréquences légèrement différentes, en comparant la phase des trois fréquences modulées reçues, cette technologie élimine toutes les ambiguïtés et calcule la position de la cible. L'avantage est donc de prendre des mesures statiques et dynamiques. On peut faire le parallèle avec le système ATR, plus connu dans le monde de la topographie, système qui consiste à suivre des cibles en mouvement automatiquement.

Après ces quelques recherches et prise de contact avec le support FARO, ce dernier a répondu concernant la technologie aADM ce qui suit :

« Le nom de nos ADM nous permet plutôt de suivre leur évolution avec nos modèles de Tracker. Les premiers ADM ne permettaient pas de se passer de l'interféromètre. En 2002, nous avons eu le SuperADM qui a utilisé le décalage de phase, permettant le mode « ADM only » tant que la cible était stable (pas de scanning, interféromètre nécessaire pour cela). En 2005, Faro a introduit le XtremeADM pour les Trackers modèles X, permettant alors les mesures statiques et dynamiques (sans plus nécessiter l'interféromètre). L'Agile ADM est dans la suite de l'évolution, permettant d'augmenter la distance de mesure du Tracker ion. »

C. Origine de l'achat du LT

Fin 2009, suite à des constatations concernant des écarts altimétriques de calage EPC/EAP en intégration au BIL, il a été décidé par Ae de faire venir un LT pour procéder à des vérifications. Ce biais était redondant à chaque nouvelle campagne de lancement, et je cite une note d'Ae :

« Trois facteurs influents principaux ont alors été analysés afin d'essayer de déterminer l'origine du biais récurrent constaté :

- *Géométrie des étages (en particulier la longueur EAP ferrure DAAV²⁵/JAR²⁶).*
- *Altimétrie de l'interface JAR/Palette.*
- *Altimétrie de la position de référence EPC via les bras de supportage BIL. »*

Ainsi, Ae voulait s'assurer de la cohérence du réseau de cibles topographiques utilisé au BIL, afin de voir si le biais rencontré n'était pas dû à une mauvaise détermination du réseau. Pour cela, une entreprise extérieure disposant d'un LT est venue pour mesurer les trois facteurs définis ci-dessus et en même temps remesurer l'ensemble des cibles topographiques du BIL avec pour objectif de mettre en avant des écarts altimétriques qui pourraient expliquer l'erreur de calage. L'ensemble des cibles présentaient moins de 1.5 mm d'écart d'altitude ce qui montre que la composante Z du réseau ne pouvait pas être remise en cause. Des mesures complémentaires ont été effectuées par

²⁵ Dispositif d'Accrochage AVant

²⁶ Jupe ARrière

cette même entreprise afin de voir les possibilités de l'appareil. Finalement, le biais avait pour origine l'affaissement des palettes et non le réseau topographique.

Cette démonstration de l'appareil, avec pour argument principal une précision inégalée, et la possibilité de voir les résultats en temps réel, a convaincu Ae pour l'achat d'un LT et cela, même au regard de la validation altimétrique du réseau topométrique.

D. Comparaison Laser Tracker – Leica TS30

1. Précision

L'incertitude de l'appareil est en grande partie ce qui va affecter la qualité du résultat de mesurande. C'est pourquoi, ces incertitudes vont être comparées suivant l'appareil, et suivant la composante transversale puis radiale.

Précision	Laser Tracker Faro Ion	Leica TS30
Angulaire	10 μm + 2.5 $\mu\text{m}/\text{m}$	0.15 mgon
Distance	8 μm + 0.4 $\mu\text{m}/\text{m}$	2000 μm + 2 $\mu\text{m}/\text{m}$

Tableau 2: Précisions du Laser Tracker Faro Ion et de la station totale Leica TS30

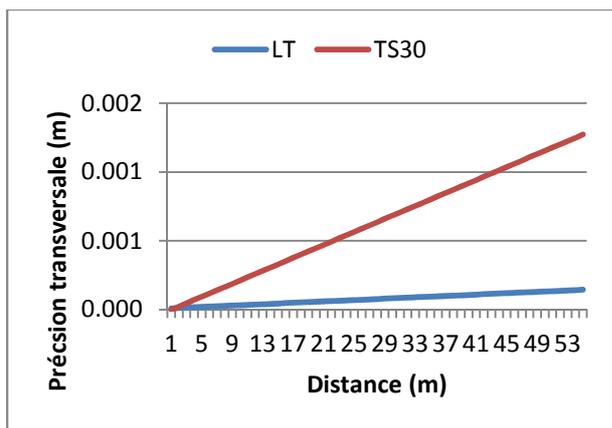


Figure 3: Comparaison de la précision transversale entre le LT et le TS30

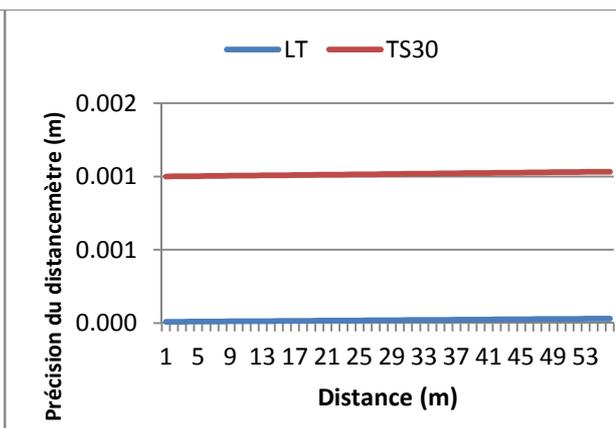


Figure 4: Comparaison de la précision radiale entre le LT et le TS30

La dérive angulaire est nettement plus importante pour le LT que pour le TS30, contrairement à la dérive du distancemètre qui varie de la même manière. On comprend ainsi l'instauration d'un volume de travail limite.

De plus, ce qui est caractéristique des lasers de poursuite, c'est que la distance mesurée constitue l'élément auquel on peut accorder le plus de confiance. En effet, la valeur de la précision transversale est non seulement supérieure à celle de la précision radiale, mais dérive plus vite. Pour le TS30, dans ce volume de travail, il vaut mieux se fier aux angles car c'est la mesure de distance qui impacte le plus les résultats (sur les 40 premiers mètres).

À partir des données mesurées, distance d , angle horizontal Hz et angle vertical V , les coordonnées s'expriment de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
 X &= d \times \sin(V) \times \cos(Hz) \\
 Y &= d \times \sin(V) \times \sin(Hz) \\
 Z &= d \times \cos(V)
 \end{aligned}$$

En partant du principe que d , H_z et V représentent des variables aléatoires indépendantes, à partir desquelles une fonction du type $x_i = f(d, H_z, V)$ est définie, alors, on obtient à partir de la loi de propagation des erreurs, l'incertitude relative de cette fonction en dérivant terme à terme :

$$\sigma x_i = \sqrt{\frac{\partial f^2}{\partial d} \sigma d^2 + \frac{\partial f^2}{\partial H_z} \sigma H_z^2 + \frac{\partial f^2}{\partial V} \sigma V^2}$$

Ensuite, on reprend les précisions calculées précédemment sur chaque composante x_i (x , y , z), que l'on somme de la manière suivante :

$$\sigma_{3D} = \sqrt{\sigma x^2 + \sigma y^2 + \sigma z^2}$$

Par simplification mais aussi parce que $\sigma H_z = \sigma V$, on a :

$$\sigma_{3D} = \sqrt{\sigma D^2 + \sigma H_z, V^2 \times D^2 \times (1 + \sin^2 V)}$$

Avec : - $\sigma H_z, V$ exprimé en radians

La Figure 5 récapitule la précision 3D des deux appareils dans le volume de travail du LT.

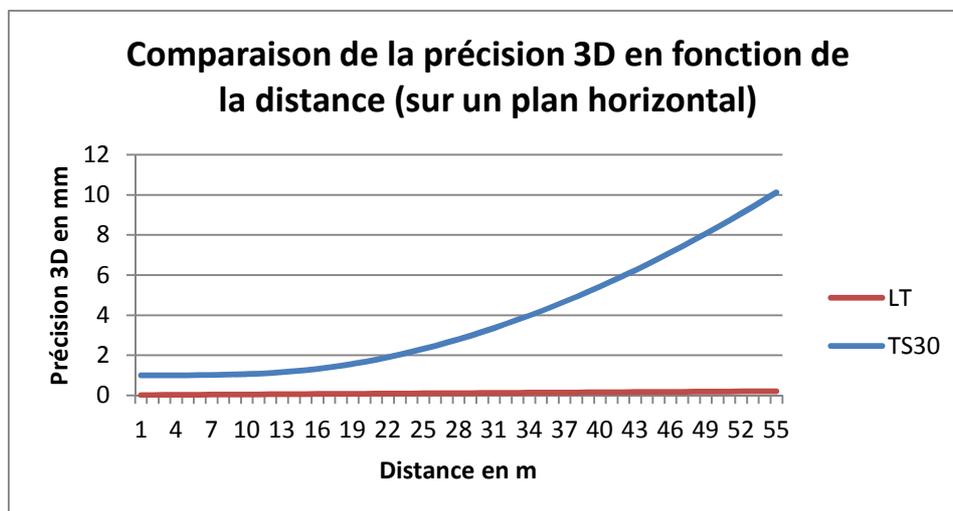


Figure 5: Comparaison de la précision 3D en fonction de la distance pour un angle vertical de 100 gon

La précision 3D en fonction de la distance est linéaire pour le LT tandis qu'elle est plutôt exponentielle pour la TS30. Au final, sur un volume de travail de 55 m, la précision atteint le centimètre pour la TS30 contre 2/10^e de millimètre pour le LT. Cependant, on peut noter que sur les cinq premiers mètres, la variation de la précision de la station totale est inférieure à celle du Laser Tracker ce qui montre l'aptitude ou la stabilité de la station totale sur de courtes distances.

2. Sécurité laser

L'atmosphère de travail privilégiant la sécurité des personnes avant toute intervention, il semble important de faire le point quant à la classe de laser des appareils utilisés. Le risque laser n'est pas anodin, suivant la classe, la cessité peut être envisagé en cas d'exposition prolongée.

En terme de nocivité, le LT FARO Ion et le tachéomètre Leica TS30 ne sont pas classés dans la même catégorie. Le TS30, en mesure infrarouge intègre la classe I mais la classe 3R pour les mesures au rayon laser. Le LT, lui, fait partie de la classe II. Ainsi, même si aucun des appareils ne nécessite d'équipements particuliers pour travailler (lunettes de protection par exemple), le TS30 reste le plus nocif.

3. Mise en œuvre

Le temps de mise en œuvre d'une station totale est de 5 minutes maximum, dépendant du temps de mise en station et d'allumage de l'appareil. L'avantage est l'instantanéité des mesures.

Par rapport à un tachéomètre, le LT nécessite plusieurs étapes avant d'être opérationnel. LT connecté au contrôleur²⁷, câble météo branché au contrôleur, ordinateur connecté au contrôleur via câble réseau et contrôleur branché sur secteur, l'échauffement peut débuter. Avant de pouvoir commencer à faire les mesures, il faut la phase d'échauffement de l'appareil. Même si sa gamme de température de fonctionnement est large (entre -15°C et +50°C), le LT nécessite une stabilité thermique pour assurer un bon mesurage. En général, après 20 minutes la température interne équivaut à la température ambiante et la phase d'initialisation peut commencer.

La phase d'initialisation est, elle, dédiée à la correction des erreurs systématiques de l'appareil et c'est donc la stabilité mécanique qui est recherchée. Après 10 minutes, les valeurs des corrections des erreurs d'index et des erreurs de collimation sont mises à jour. Les mesures sont désormais possibles après ce processus de 10 minutes.

E. Logiciel associé

1. Possibilités de mesure

Développé par FARO, CAM2Q est le logiciel dédié au LT. Connecté à l'appareil pendant les mesures, c'est grâce à lui que l'on choisit les entités (plan, sphère, cercle ligne...) à mesurer mais aussi que nous définissons le système de coordonnées. Un système de coordonnées est défini par ses 6 degrés de liberté (T_x , T_y , T_z , R_x , R_y , R_z). Ainsi, pour en créer un, il faut déterminer assez d'entités pour contraindre le système. Par exemple, on va mesurer un plan (3 degrés), une ligne (2 degrés) puis un point (1 degré).

Pour le mesurage en lui-même, différentes options sont configurables. Bien sûr, le choix du palpeur ou diamètre du SMR est à indiquer et, le mode de mesurage. Trois modes de mesurage sont possibles, la première méthode permet de mesurer point par point, la deuxième permet de spécifier un intervalle de temps, et la dernière méthode permet le mesurage suivant un intervalle de distance.

Différentes entités sont mesurables via CAM2Q. Les plus fréquemment rencontrées sont les entités point, cercle, plan, sphère et cylindre. Cependant, il convient de rappeler la définition même de ces entités avant de pouvoir les mesurer. Un point, un plan, une sphère, un cylindre sont des entités directement mesurables à l'inverse d'un cercle ou autres entités 2D qui eux, dépendent d'un plan de projection. La Figure 6 résume les étapes nécessaires pour obtenir les caractéristiques d'un cercle. C'est ensuite que la compensation du palpeur va se faire. En effet, comme expliqué précédemment, chaque point mesuré est fonction du centre de la sphère, or les caractéristiques des entités mesurées qui nous intéressent sont celles des surfaces réelles, soit les surfaces de contact. Dès lors, un décalage, ou plus précisément une compensation du palpeur est à effectuer. Cela met donc en avant l'importance des caractéristiques des SMR, étant donné la précision de mesure se rapprochant de 20 μm .

²⁷ MCU : Master Control Unit

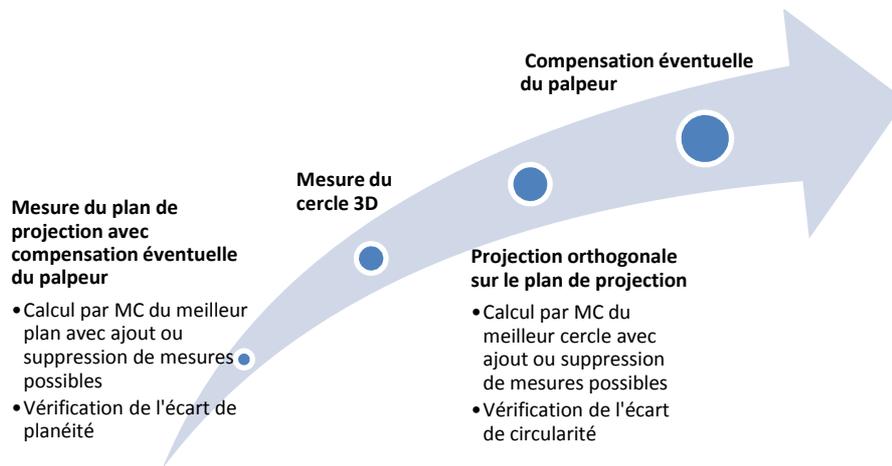


Figure 6: Étapes nécessaires pour obtenir les caractéristiques d'un cercle

La compensation du palpeur peut avoir des répercussions importantes lorsque sont demandées des contrôles dimensionnels. Comme on peut le voir sur la *Figure 7*, si l'on ne rajoute pas un décalage équivalent au rayon de la sphère, le cercle obtenu, bien que le centre calculé sera le bon, aura le diamètre réellement recherché moins le diamètre de la sphère. Ainsi, si l'on ne connaît pas de valeur théorique, il est difficile de s'en apercevoir.

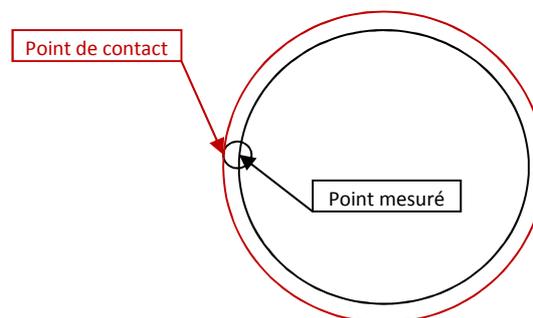


Figure 7: Conséquence d'un oubli de compensation de palpeur

Afin de travailler dans le système terrestre et donc de prendre en compte la gravité dans notre repère, des inclinomètres sont présents et permettent la détermination d'un plan de niveau. Par analogie avec une station totale, cela correspond à la nivelle électronique. Cependant, là où l'on se doit d'être à la verticale avec une station totale, avec le LT, on peut être incliné pour prendre des mesures, celles-ci seront recalées dans le bon système grâce au plan de niveau. La précision de ce plan est de ± 2 arc-secondes soit ± 0.1 mm à 10 mètres. La station totale Leica TS30 présente, elle, une nivelle numérique à ± 6 arc-secondes.

2. Travailler en absolu

a) *L'alignement itératif*

Afin de pouvoir exprimer les mesures dans le système général, des repères connus sont mesurés afin de recalculer l'appareil dans ce système. Pour cela, l'alignement itératif est la technique à utiliser dans CAM2Q. Un minimum de 3 repères connus en coordonnées, doit être mesuré. Après le calcul, les résidus ou plutôt les écarts sur chaque composante et en 3 dimensions sont données pour chaque point. Pour conclure quant au bon alignement, c'est l'écart max 3D qui est mis en avant.

À partir de deux jeux de points correspondants, les coordonnées nominales, et les coordonnées mesurées, il va être cherché les matrices de rotation et de translation qui vont minimiser la somme des écarts sur chaque point au carré. À titre de comparaison, cette technique d'alignement itératif est basée sur le même principe que la méthode de l'ICP²⁸ qui est utilisée pour le recalage de nuage de points pour les scanner laser 3D.

b) *Le déplacement de dispositif*

Après avoir effectué une première position de dispositif et donc un alignement itératif, la méthode à suivre si l'on veut changer de position le LT, est d'appliquer la technique du déplacement de dispositif. Un minimum de trois points connus en coordonnées est également exigé mais ces points ne doivent pas être nominaux, mais doivent être des points mesurés à la position d'avant. De même, on obtient les écarts et plus particulièrement un écart max. Une option nous permet de choisir si l'on veut prendre en compte un facteur d'échelle lors du calcul.

On pense également, toujours par analogie au scanner laser 3D, à l'utilisation d'une similarité pour consolider le nuage de points.

Le moyen de mesure étant présenté théoriquement, c'est dans le cadre d'une mise en œuvre pratique que la connaissance de cet appareil va se poursuivre.

²⁸ Iterative Closest Point

III. Présentation générale des contrôles effectués

A. Éléments à vérifier

1. Le travail effectué

Les DRT que formulent les clients consistent en des contrôles dimensionnels, des contrôles géométriques ainsi que des contrôles de position de pièces mécaniques, soit démontées soit en configuration d'une part mais aussi, soit en relatif soit en absolu d'autre part. Les mesures permettent de comparer les valeurs mesurées avec leur précision associée et les valeurs nominales avec leurs spécifications. Il s'agit donc véritablement de métrologie dimensionnelle. Issues de dessins industriels, les différentes pièces à contrôler ont une géométrie mathématiquement définie (cercle, plan, cylindre...). En découle une autre manière de voir les choses, d'appréhender les mesures afin de fournir un résultat en utilisant la méthode la plus appropriée. On va d'abord chercher à savoir comment modéliser la pièce avant de la mesurer.

2. Biens livrables

Après chaque mesure, un CRT²⁹ est adressé à l'émetteur de la demande. Sur ce CRT, les coordonnées des éléments caractéristiques de l'entité sont récapitulés en précisant le système de coordonnées associé si besoin. La précision associée aux mesures est également exprimée pour rappel.

De plus, un avis de type conforme/non conforme peut être demandé par l'AT topographique. En tenant compte de la précision associée aux mesures, quatre avis sont donc envisageables comme l'énonce la publication du JCGM intitulée *Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment*, et le résume l'illustration 10.

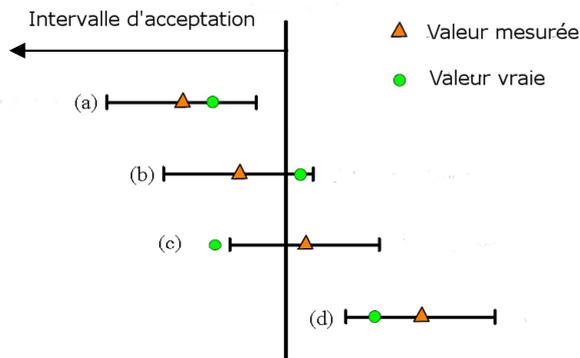


Illustration 10: Schéma récapitulatif des possibilités de conformité

La valeur mesurée est affectée d'une incertitude de détermination contrairement à la valeur vraie, qui, elle, est impossible à connaître.

Si la ligne centrale verticale correspond à la dernière valeur pouvant être acceptée, quatre décisions peuvent être prises.

(a) Accepté (Vrai positif) : L'intervalle correspondant à la valeur mesurée plus ou moins son incertitude est inclus dans l'intervalle d'acceptation, et contient la valeur vraie. La pièce est réellement bonne et elle est acceptée.

(b) Accepté avec risque (Faux positif) : La valeur mesurée est certes dans l'intervalle d'acceptation, mais son intervalle d'incertitude empiète vers les valeurs refusées, d'où un risque que la valeur vraie soit elle-même en dehors de l'intervalle d'acceptation. La pièce est acceptée sauf qu'elle est réellement fautive.

²⁹ Compte Rendu de Travaux

(c) Rejeté avec risque (Faux négatif) : La valeur vraie est en théorie dans l'intervalle d'acceptation ce qui n'est pas le cas de la valeur mesurée, même si une partie de son intervalle d'incertitude est contenue dans l'intervalle d'acceptation. Bien que réellement bonne, la pièce va être rejetée.

(d) Rejeté (Vrai négatif) : Valeur mesurée et son intervalle d'incertitude, ainsi que valeur vraie, sont en dehors de l'intervalle d'acceptation. La pièce est refusée et elle est réellement fautive.

B. L'exemple des contrôles sur les palettes au BRP

1. Les palettes, un élément déterminant

L'une des opérations récurrentes a lieu au BRP et consiste à revalider les palettes. Les palettes, sont des éléments en acier qui supportent la fusée. Ce sont plus précisément les EAP qui reposent chacun sur l'interface de pose de la palette, la palette reposant elle-même sur des appuis situés sur la table. Les palettes sont des pièces pérennes qui sont revalidées suivant certains critères après chaque tir. Sur la palette, une pièce mécanique amovible est montée, c'est la couronne. Cette couronne est une pièce circulaire qui une fois montée sur la palette, va accueillir un EAP. Il s'agit donc de l'interface de pose des propulseurs.

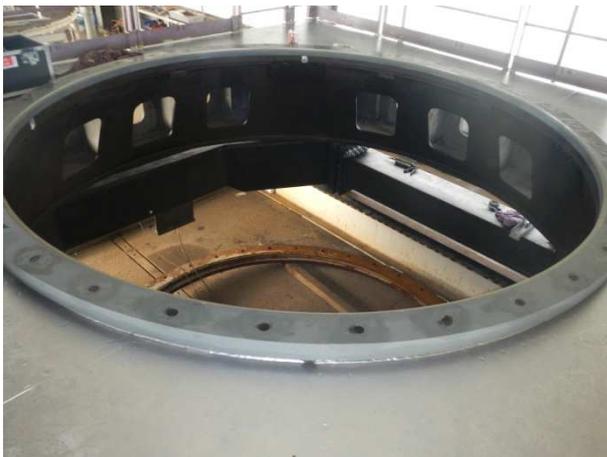


Illustration 11: Photo vue de dessus d'une palette



Illustration 12: Photo vue de côté d'une palette

Pour cela, des spécifications géométriques et dimensionnelles doivent être respectées. L'horizontalité est vérifiée mais c'est surtout la planéité de l'interface de pose qui occupe la plus grande importance. En effet, les palettes effectuent un véritable cycle à chaque lancement et sont vérifiées tout au long d'une campagne. D'abord mesurées au BRP, puis au BIP, au BSE et enfin au BIL et au BAF. Elles sont acheminées vers le BIL, avec les EAP dessus, pour être finalement ancrées sur les appuis de la table.

L'autre critère déterminant est la circularité de la palette et son diamètre. Les spécifications associées sont de l'ordre du dixième de millimètre.

La hauteur entre appuis-palette et plan de pose (appuis-table) est également vérifiée mais aussi entre rails et appuis-table.

Une palette est donc un élément indispensable car c'est elle qui va soutenir directement un EAP dont le poids et le gabarit sont d'environ 150 tonnes pour 30 mètres, mais aussi l'ensemble de la fusée une fois assemblée, et cela va également être le dernier support avant le tir et pendant la poussée de la fusée pouvant atteindre les 1300 tonnes.

Afin de mieux visualiser, l'illustration 13 montre une palette en configuration, c'est-à-dire que la palette est sur le chariot avec un EAP dessus.

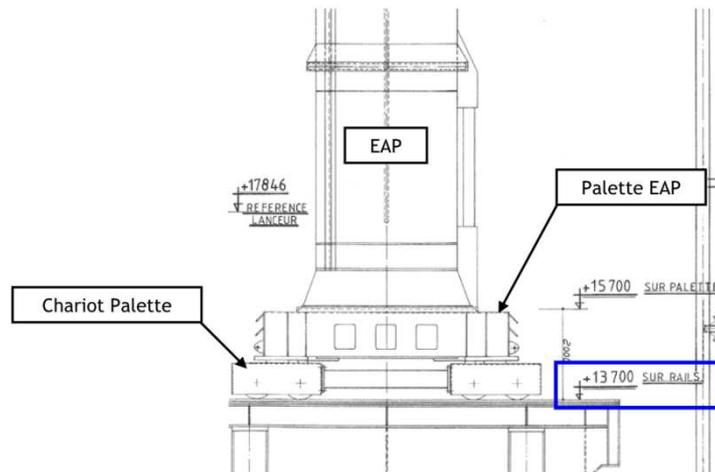


Illustration 13: Coupe verticale d'une palette en configuration

2. Les contrôles effectués

Quatre contrôles sont effectués au BRP, un critère d'ordonnancement a donc été mis en place pour privilégier les contrôles les plus sensibles.

D'abord, il s'agit de vérifier le **diamètre** de la couronne qui doit être de 3654,6 mm \pm 0,5 mm. On voit donc que cette spécification est du type A mm \pm B mm, avec A la valeur nominale et B l'intervalle d'acceptation.

Puis, est contrôlé l'écart sur la **planéité générale** qui doit être inférieur ou égale à 0.8 mm, sur un intervalle symétrique de \pm 0.4 mm. L'écart sur la **planéité locale**, lui, doit être inférieur à 0.4 mm tous les 100 mm. La planéité générale s'effectue sur 36 points, au droit de chacun des boulons de la couronne, mesurés sur l'ensemble du plan de pose des EAP, tandis que la planéité locale s'effectue par rapport aux points pris par intervalle de distance de 100 mm.

Le dernier contrôle consiste à mesurer la **hauteur entre appuis palette et rails**, hauteur dont l'intervalle d'acceptation est estimé à \pm 1 mm, compte tenu de l'absence de spécification. Cette opération va également être menée palette à vide au BIP, et en charge au BSE. Au BIL sera vérifié la hauteur entre appuis et rails. L'ensemble de ces mesures, permet de mettre en avant le tassement des palettes au cours de chaque campagne et après chaque tir, pour au final conclure si les caractéristiques rentrent dans les spécifications.

La palette effectue un cycle suivant les campagnes de lancement, elle débute sa revalidation au BRP puis, est acheminée au BIP puis au BSE, au BIL et au BAF. Certains contrôles doivent être répétés comme par exemple la hauteur entre appuis palette et rails pour vérifier que celle-ci ne varie pas avant et après intégration des EAP. La Figure 8 met en avant le cycle d'une palette au cours d'une campagne de lancement avec les mesures topométriques associées.

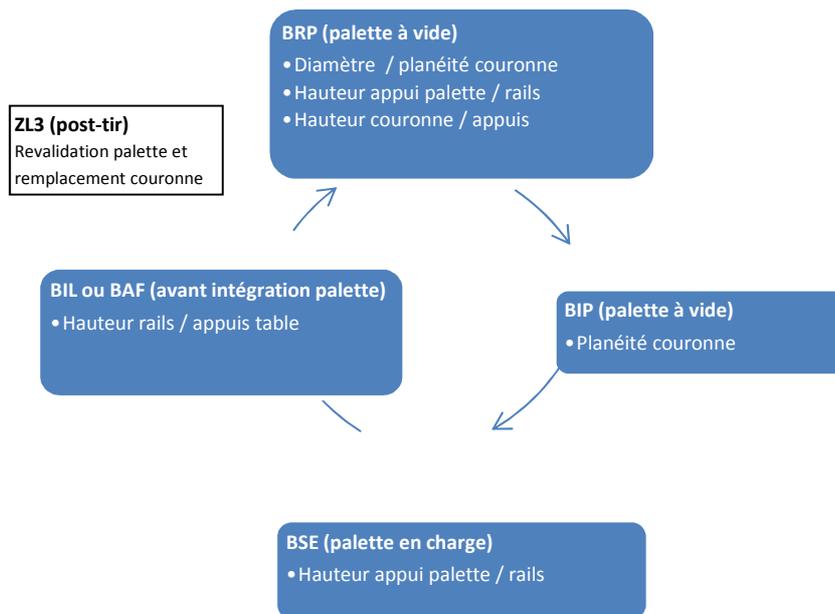


Figure 8: Les différentes opérations en lien avec les palettes

En début de cycle, la décision peut être prise, suivant les résultats de mesurage, d'ajouter des cales sous la couronne afin de rattraper l'affaissement constaté des palettes.

3. Les mesures traditionnelles au tachéomètre et niveau

a) Déroulement sur site

Ces quatre contrôles vont être réalisés séparément. La circularité s'effectue avec un micromètre avec des rallonges tandis que hauteur et planéité se font grâce au niveau numérique. Attention, on parle bien ici de planéité et non d'horizontalité.

b) Traitement

Le traitement s'effectue de retour au bureau.

Concernant la planéité, une application interne permet de calculer le meilleur plan par moindres carrés. Pour cela, en paramètre d'entrée, il nous faut les coordonnées des 36 points mesurés or sur le terrain, seule l'altitude est mesurée, les composantes planimétriques sont donc reprises des valeurs théoriques, l'influence étant minimale car le point mesuré au niveau ne pourrait pas être mesuré au tachéomètre avec une meilleure précision que 2 cm. Après avoir déterminé les coefficients a , b et c de l'équation du meilleur plan³⁰, la distance de chaque point au plan est calculée suivant la projection orthogonale au plan. Aussi, on obtient le défaut de planéité dp qui représente la moitié des écarts maximum positifs et négatifs, et qui traduit la tendance de la surface réelle à se rapprocher de la surface mathématique.

La hauteur était, elle, calculée comme une simple dénivelée, il s'agissait donc d'une côte verticale.

Pour la circularité, aucune mesure au tachéomètre ne permettait d'entrer dans la classe de précision souhaitée. Le contrôle s'effectuait donc avec un micromètre à rallonges, instrument de métrologie linéaire permettant des mesures au dixième de millimètre.

³⁰ Avec $ax + by + cz + d = 0$ l'équation de plan

4. Les mesures au LT

a) Déroulement sur site

Après avoir monté le matériel sur la palette et avoir attendu 30 minutes le temps que ce dernier chauffe, les mesures peuvent débuter. Un réseau de nids magnétiques au sein du BRP n'est pas forcément nécessaire car aucune position absolue n'est demandée mais quatre nids y sont installés afin de pouvoir effectuer un déplacement de dispositif.

Avec la première position du LT, les contrôles de circularité, de planéité générale et de planéité locale vont être effectués. D'abord, on sélectionne la fonction du LT "plan de niveau" qui permet d'avoir la verticale locale du lieu de mesure. Ensuite, on choisit la sphère adaptée pour mesurer la circularité et on s'assure que le point de contact soit effectivement sur la bonne géométrie, et en particulier, en faisant attention aux rebords qui pourraient fausser la mesure.

b) Traitement

Le traitement a lieu directement sur place ce qui constitue un avantage considérable. En réalité, pour certaines caractéristiques on ne va pas parler de traitement mais plutôt de visualisation des résultats. En effet, à chaque nouvelle mesure, on obtient en temps réel les nouvelles propriétés de l'entité mais surtout les écarts de forme, ce qui donne la possibilité de refaire une mesure que l'on sait aberrante d'après les résultats. Aussi, on peut déjà constater si les résultats de mesurage sont en accord avec les valeurs nominales et les tolérances. Le choix peut être fait d'interrompre la campagne de mesure si l'on constate que la pièce n'est pas conforme et que des travaux seront à effectuer dessus. Dès lors, l'ensemble des mesures devront être refaites. Le fait de pouvoir rendre compte des résultats semble réellement avantageux mais avec tous les risques que cela comporte. En effet, il faut garder un avis critique sur les résultats et ne pas seulement faire un copier-coller sans avoir analysé. Certes, les programmes sont puissants mais le fait que le mode de calcul ne soit pas transparent nous rend impuissant, et il faut rester maître de la machine, surtout pour les niveaux de précision exigés.

La hauteur calculée est plus cohérente car le fait de mesurer un plan moyen passant par les appuis palettes et des points sur les rails, permet de prendre en compte le défaut d'horizontalité des rails.

IV. La métrologie au sein des bâtiments d'intégration et d'assemblage

A. Les systèmes de coordonnées présents

1. Le repère bâtiment

Par convention, les systèmes de coordonnées ne sont pas exprimés de la même manière suivant les corps de métier. Les mécaniciens ont tendance à choisir l'axe OX comme verticale, or ici, ce sont eux qui imposent la définition même du repère étant donné que leurs côtes sont exprimées dans ce repère particulier. Cependant, par soucis de clarté, les résultats exposés ici seront exprimés dans un système traditionnel topométrique $OXYZ$. Pour information, voici la correspondance entre système topométrique et système mécanique :

$$\circ Y_{méca} = X_{topo}$$

$$\circ Z_{méca} = Y_{topo}$$

$$\circ X_{méca} = Z_{topo}$$

En amont, avant de présenter les bâtiments et réseaux existants, on va expliquer leur nécessité. Les contrôles géométriques et dimensionnels effectués peuvent être effectivement réalisés en relatif sauf que la position de certains éléments est exigée. Cela montre donc l'obligation de travailler en absolu. Pour cela, le repère bâtiment, orthonormé direct, que ce soit au BIL ou au BAF, est constitué par l'axe lanceur comme origine, le plan horizontal comme plan OXY et un des axes (X ou Y) passant par la direction moyenne des rails.

Au niveau matérialisation de ce réseau, il faut bien mettre en avant les surfaces stables et pérennes qui sont utilisées comme support. Les plateformes, tout du moins sur leur partie amovible et mobile, ne peuvent pas accueillir de points du réseau. Ainsi, l'unique solution pour fixer les cibles et nids magnétiques dans le but d'obtenir un réseau métrologique de qualité est de choisir la structure métallique du bâtiment. Des coups de pointeau sont aussi présents sur les parties fixes de ces plateformes.

2. Le repère table

Le repère table est le repère absolu des mécaniciens, c'est dans celui-ci que les comparaisons sont effectuées. Pour obtenir ce repère à partir du repère bâtiment, la transformation utilisée consiste en une simple translation. En effet, la verticale de ce repère passe par l'axe lanceur réel et comme la table repose sur les rails, l'axe X correspond à la direction moyenne des rails. Le trièdre est donc complété de la même manière, les deux repères sont donc identiques à une translation près. Ainsi, la translation se fait suivant l'axe des rails du bâtiment étant donné que le calage n'est dû qu'à l'insertion d'une goupille liant la table et le bâtiment. Afin de laisser un peu de liberté à la structure mécanique, la différence de diamètre entre le trou d'accostage et la goupille permet un jeu maximum de ± 5 mm. Ainsi, avec ce défaut d'accostage de la table, un delta caractéristique ressort à chaque campagne, et, dans chaque bâtiment. Afin de déterminer ce delta dû à la goupille de positionnement, un coup de pointeau sur la table dont les coordonnées sont connues dans le repère table, est mesuré. Cette valeur de translation est déterminée à chaque fois que la table est calée dans un bâtiment ou en zone de lancement. En général, les données communiquées au client Ae s'effectuent dans le repère bâtiment avec indication du delta caractéristique.

Le repère table peut donc être envisagé comme un repère virtuel uniquement utilisé par les mécaniciens.

B. Le BIL

1. Présentation du bâtiment

Le BIL est le premier bâtiment dans lequel la fusée est assemblée. Composé de trois parties, nous nous limiterons au hall d'intégration dans lequel ont lieu les contrôles métrologiques. Ce hall est haut de 58 mètres et s'étend sur 1500 m² (30 m par 50 m).

Le BIL permet un assemblage vertical de la fusée en commençant par celui des EAP au niveau de l'EPC. Ensuite vient la mise en place de l'ESC et de la jupe interétage qui sont les autres étapes principales. L'accès se fait uniquement avec l'accord de la sauvegarde, la qualité et du sous-directeur de l'ELA, puis, en passant par la planification et enfin par le stand des EPI où oxygénomètre et radio UHF sont obligatoires. Toutes ces formalités sont nécessaires pour le bon déroulement et le bon enchaînement des opérations, mais aussi pour garantir la sécurité des intervenants. Six plateformes amovibles et indépendantes de la table, permettent d'accéder et de circuler autour du lanceur et de la table aux différents niveaux où ont lieu les opérations. Ainsi, lorsque le hall d'intégration est en présence table et lanceur, et que les plates-formes sont positionnées, des problèmes de visibilité se constatent très rapidement.

Les conditions atmosphériques sont idéales pour effectuer les mesures, en effet, le hall d'intégration est en permanence climatisé, température, pression et humidité sont donc régulées évitant ainsi des gradients trop importants.

Les conditions de stabilité, elles, ne sont pas du tout optimisées pour du travail métrologique sauf au rez-de-chaussée où l'on trouve une dalle en béton. En effet, aux différents niveaux, les plates-formes subissent des mouvements à chaque passage d'individus, à chaque déplacement d'accès mais aussi dès lors que l'ascenseur est en marche.

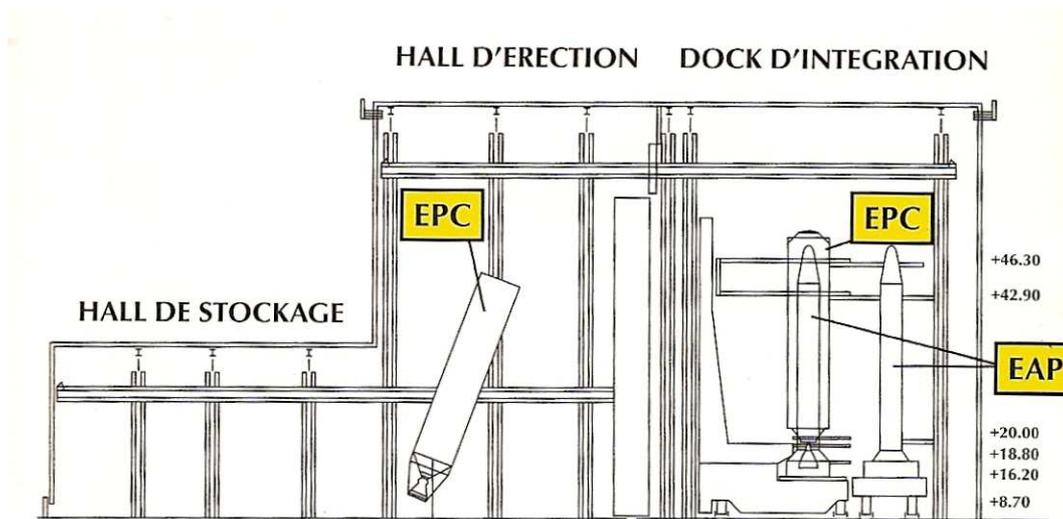


Illustration 14: Aménagement interne du BIL

En Annexe 6, on peut se rendre compte de l'encombrement du hall d'intégration lorsque la table et le lanceur sont présents, ce qui équivaut à une difficulté supplémentaire pour effectuer les mesures.

2. Les réseaux

a) Le réseau tachéomètre

Présent depuis plus de 20 ans, le réseau de points est matérialisé par des cibles rouges et blanches collées dans les bâtiments sur les piliers et par des coups de pointe au sol sur les parties fixes des plateformes. Au total, on dénombre 21 cibles et coups de pointe présents au niveau des 5 plateformes comme illustré dans l'Annexe 7.



Illustration 15: Cible du réseau tachéomètre



Illustration 16: Coup de pointe sur plate-forme

Ce réseau s'utilise uniquement par des visées de relèvement et des visées d'orientation en stationnant un coup de pointe au sol.

b) Le réseau LT

À la demande d'Ae, le réseau du LT a été mis en place en 2012. 26 nids magnétiques dont 8 au niveau 0, 7 au niveau 3, 6 au niveau 5 et, 5 au niveau 6 composent le réseau Laser Tracker au BIL (Annexe 8).

Ainsi, entre le niveau 0 et la PF6, on peut observer une dénivelée de 38 mètres.



Illustration 17: Nid magnétique pour SMR 1.5''

Les nids magnétiques sont des accessoires qui sont collés sur les piliers du bâtiment, et sont dimensionnés pour accueillir le SMR via un aimant qui assure la stabilité du centre de la cible.

La précision annoncée de ce réseau LT par le service topographique est ± 0.2 mm au RDC et de ± 1 mm aux étages.

3. La définition du repère BIL

Le point fondamental du repère est la position théorique de l'axe du lanceur, symbolisé par un coup de pointeau sur une platine au sol, point inaccessible en présence table car étant situé au fond de la fosse, sous la table. L'altitude est exprimée dans le système NGG1977³¹. En effet, le repère dépend de l'altitude moyenne des rails de la voie lanceur qui a été déterminée à une valeur de 8700mm par les services de l'IGN. Ainsi, tout le réseau est recalé par rapport à cette altitude. Ceci s'explique par le fait que toutes les côtes du lanceur dépendent de l'altitude des rails. L'axe X correspond à la direction moyenne des rails de la voie lanceur, orienté positivement vers le BSE. L'axe Y complète le trièdre orthonormé direct comme on peut le voir sur l'illustration 18.

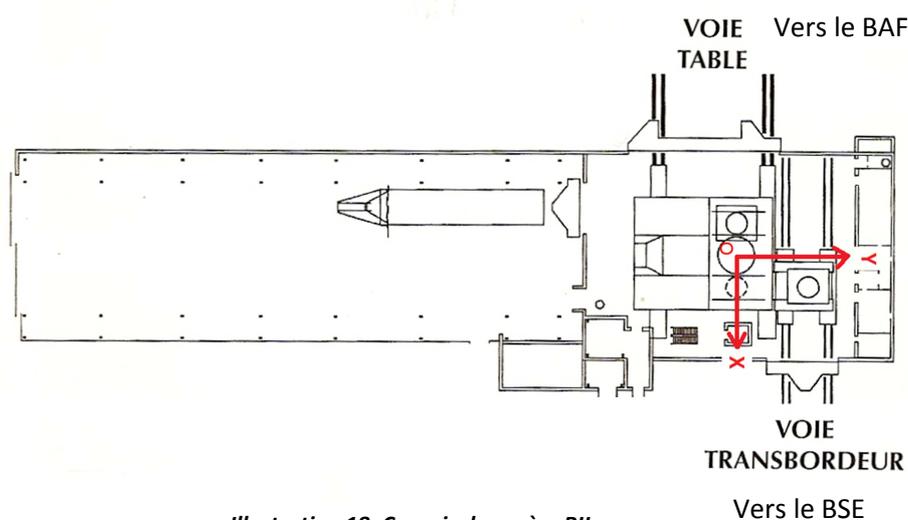


Illustration 18: Croquis du repère BIL

4. Campagne de mesure

a) Les conditions de mesures

Cette campagne de mesure s'est déroulée en deux fois, sur deux demi-journées.

Pendant la première, trois heures seulement nous ont été accordées pour effectuer le contrôle de stabilité du réseau. Avant même de commencer, nous savions que nous ne pourrions pas finir de caractériser l'ensemble des points du réseau étant donné la faible marge de manœuvre. Ce temps réduit est le produit de deux opérations. D'abord, le transfert du lanceur sur la table, du BIL au BAF, qui nous a laissé le champ libre pour mesurer, puis le transfert de la table ayant servi au précédent lancement, de la zone chantier au BIL, qui a clôturé notre période de mesurage. Ce problème de temps étant connu a priori, nous avons fait en sorte de pouvoir accéder au BIL une heure avant le début du transfert pour brancher l'appareil afin qu'il chauffe, et nous sommes repartis juste avant le début du transfert, l'opération étant classée en phase P2 (accès restreint, activité dangereuse). Cette anticipation nous a permis de gagner une demi-heure de temps effectif à mesurer. Ainsi, nous avons pu recréer le repère du BIL en remesurant les rails et l'axe lanceur, puis avons mesuré les cibles topographiques et les nids magnétiques du niveau 0 et une grande partie du niveau 3.

La suite de cette campagne de validation s'est déroulée en présence table, ce qui est représentatif de beaucoup plus de masques, et d'une instabilité plus grande due au personnel travaillant sur les plates-formes.

³¹ Nivellement Général de Guyane 1977

b) Le déroulement des mesures

Les points visibles depuis une position de l'appareil, ont été mesurés à 3 reprises. Même si nous disposons d'une fréquence de mesure élevée, les trois mesures ont été prises manuellement, et cela, pour être sûr qu'à chaque prise de mesure, l'appareil était bien stable et qu'aucun mouvement de plateforme ne perturberait les mesures.

Deux types d'entité ont été mesurés pour les réseaux. Le premier type est le point, il s'agit de l'ensemble des nids magnétiques mesurés, sa représentation est virtuelle, elle correspond au centre du SMR donc n'est pas matérialisé physiquement. Le second type d'entité mesuré est la sphère qui est utilisée pour les cibles et les coups de pointe. Ces points étant matérialisés physiquement, ils ne sont pas directement mesurables avec le SMR. Dès lors, on utilise l'entité sphère pour déterminer leurs coordonnées, qui sont donc le centre de la sphère calculée.

Le *Tableau 3* récapitule les cinq positions de dispositif nécessaires pour calculer l'ensemble des points.

Dispositif	Niveau	Points visés pour le recalage	Écart max 3D (mm)
1	RDC	R.001, R.002, R.003, R.004, R.005, R.006, R.007	
2	RDC	R.001, R.003, R.005, R.006, R.007	0.11
3	3	R.004, R.301, R.302, R.303, R.305, R.306	0.38
4	5	R.302, R.304, R.501, R.504	0.16
5	6	R.507, R.604, R.605, R.606	0.18

Tableau 3: Dispositifs de mesure au BIL

5. Analyse des mesures

a) Création du système de coordonnées

La première étape est de créer le système de coordonnées avec le logiciel *CAM2Q*.

Il convient d'abord d'affecter le plan de niveau (plan horizontal) mesuré comme plan *OXY* puis de forcer l'origine du système de coordonnées à $0,0,Z$ par une translation en *X* et en *Y* pour y attribuer les coordonnées de l'axe lanceur.

Ensuite, un recalage altimétrique est nécessaire et cette translation d'axe *OZ* se fait après avoir déterminé la moyenne d'altitude de chaque rail. Celle-ci est calculée et une constante est ajoutée afin que l'altitude soit de 8700 mm.

RAILS	Z (mm) mesuré	Z (mm) après recalage
1	1796.39	8700.24
2	1795.83	8699.68
3	1796.34	8700.19
4	1796.04	8699.89
MOYEN	1796.15	8700.00
THEORIQUE	8700	
CONSTANTE	6903.85	

Tableau 4: Recalage altimétrique

Pour le moment, il reste à fixer la direction d'un axe contenu dans le plan *OXY*. C'est la direction de l'axe *X* qui va être calculée. La direction de l'axe *X* correspond à la composée de trois bissectrices. Les deux premières sont celles, respectivement, des lignes des rails 1 et 2, et 3 et 4, projetées sur le plan horizontal. Ensuite, la direction finale, est la direction de la bissectrice de ces deux nouvelles demi-droites. Ainsi, c'est donc une rotation d'axe *OZ* qui conclut la création de ce système de coordonnées.

RAILS	$\alpha(^{\circ})$ par rapport à la direction finale	$\alpha(^{\circ})$ par rapport à la direction finale
LIGNE 1	4.52	0.001256
LIGNE 2	4.98	0.001383
LIGNE 3	9.07	0.002519
LIGNE 4	9.53	0.002647
LIGNE 1-2	0.23	0.000064
LIGNE 3-4	0.23	0.000064

Tableau 5: Calcul de la direction de l'axe X

Une fois le système de coordonnées créé, l'export des points du réseau peut avoir lieu.

C. Le BAF

1. Présentation du bâtiment

Le BAF, lui, est le second bâtiment d'assemblage et c'est d'ici que va partir la fusée pour la zone de lancement. C'est à l'intérieur que vont être montées les charges utiles dans le lanceur, lesquelles vont finalement être renfermées par la coiffe. Le mât ombilical de la table va être réhaussé par l'ajout d'un mât supérieur afin de maintenir la partie haute de la fusée.

Divisé en quatre parties, le BAF est également plus haut que le BIL et possède donc 12 plates-formes réparties sur les 90 mètres de haut. C'est la partie hall composite qui va nous intéresser au BAF, car accueillant le réseau.

Cette partie est également climatisée et présente les mêmes caractéristiques structurales que le hall d'intégration du BIL. Manque de stabilité et de visibilité font également partie des difficultés rencontrées dans ce bâtiment.

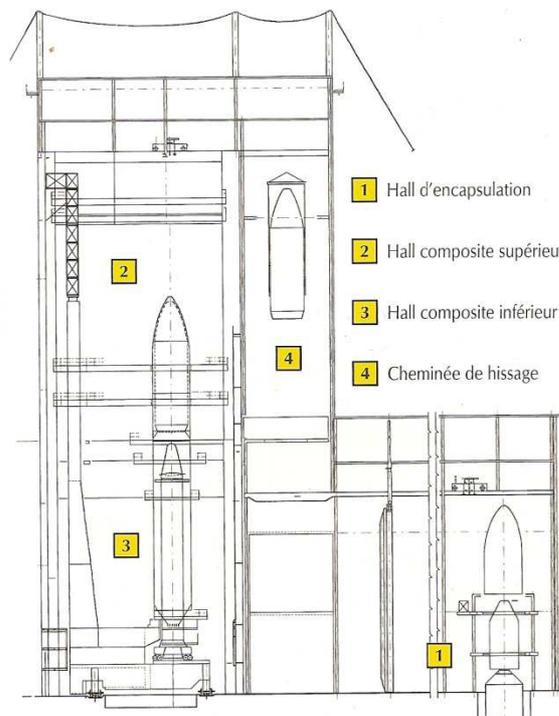


Illustration 19: Aménagement interne du BAF

2. Les réseaux

a) Le réseau tachéomètre

Le réseau de points du BAF, lui, comprend 24 cibles et coups de pointeau présents au niveau des plateformes (*Annexe 9*).

Depuis leur installation, qui remonte également à la construction des bâtiments, les cibles n'ont jamais été redéterminées lors d'une campagne de mesures. En effet, c'est en 1997 que ce canevas micro-géodésique a été calculé en bloc via le logiciel d'ajustement *COMP3D*. Cette donc grâce à des mesures surabondantes que la méthode des moindres carrés, méthode d'optimisation, a été mise en place. Si l'on se concentre sur les ellipses de confiance des points déterminés à cette époque, ellipses données à 1σ , on remarque que pour les points n'étant pas situés au RDC, la valeur des demi-grands axes pouvait aller jusqu'à 7mm en PF9. Le rapport de calcul *COMP3D* est consultable en *Annexe 10*. Le Compte Rendu de Travaux annonce que concernant la « *Triangulation micro-géodésique au BAF, la précision annoncée est de ± 1 mm au sol et de ± 2 mm aux étages.* »

L'utilisation de ce réseau se faisait uniquement par du relèvement et une visée d'orientation, la mesure de distance n'est pas utilisée pour se recalier.

Afin de valider le réseau et de pouvoir quantifier sa déformation éventuelle, il a donc été décidé de le remesurer avec un moyen de mesure plus précis, le LT.

b) Le réseau LT

Au BAF, 24 nids magnétiques composent le réseau. Ils sont présents sur 5 des 12 niveaux.

La précision annoncée de ces réseaux LT par le service topographique est ± 0.1 mm au RDC et de ± 1 mm aux étages (*Annexe 11*).

3. La définition du repère BAF

Identiques au repère du BIL, tout du moins dans leur constitution :

- axe *X* direction moyenne des rails de la voie lanceur, orientée positivement vers la ZL3
- axe *Y* : complète le trièdre orthonormé direct.
- axe *Z* : verticale locale passant le point d'axe lanceur matérialisé par un coup de pointeau dans la fosse.

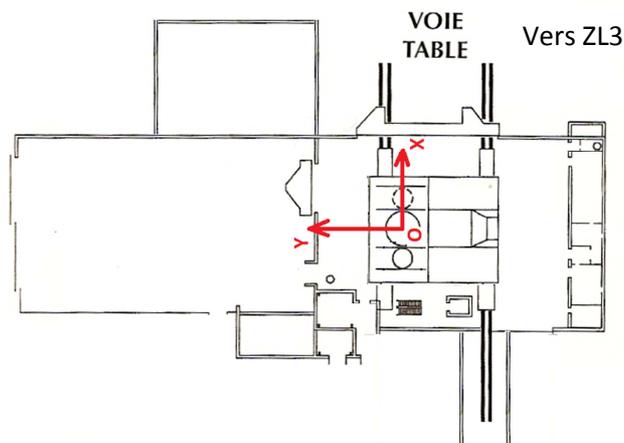


Illustration 20: Croquis du repère BAF

4. Campagne de mesure

a) Des contraintes de mesures inattendues

Cet exercice a été rendu difficile par le fait que les mesures ne devaient être réalisées qu'une fois la table et le lanceur hors du BAF. Cette configuration ne se produit que le jour d'un lancement Ariane5, et 3 jours après. À l'origine, les mesures devaient commencer dès le jeudi 16 avril 2015, lendemain du décollage prévu d'Ariane VA222. Les aléas de cette campagne ont fait que le tir a dû être reporté au vendredi 24 avril puis encore au dimanche 26 avril. Dès lors, avec un peu plus de deux semaines de retard, le travail de cette partie a été débuté. 3 jours étaient prévus pour les mesures, et cette campagne s'intégrait nominalement dans la planification. Cependant, des opérations de maintien imprévues du GST3³² ne nous ont pas permis de commencer le premier jour étant donné que la visibilité des rails au rez-de-chaussée était compromise, or il s'agit de la base même du système. Après un retard dans ces opérations de maintien, c'est seulement le troisième jour, vers midi, mercredi 29 avril, que la configuration rendait possible les mesures. Dès lors, au lieu des trois jours prévus initialement pour faire les mesures, nous n'avions plus qu'une journée, rapidité et précision devaient aller de paire.

b) Déroulement des mesures

Deux positions ont été effectuées au rez-de-chaussée pour mesurer les rails et l'ensemble des nids y étant situés mais aussi ceux étant visibles au niveau 3 afin de pouvoir poursuivre le cheminement. 10 mètres sépare le niveau 0 et le niveau 3, ainsi, une grande partie des points du niveau 0 et 3 ont été visés 2 fois afin d'avoir une redondance dans le mesurage. Le dernier niveau dans lequel des repères sont présents, en PF9, se situe 37 mètres au-dessus de rez-de-chaussée ce qui montre la particularité de ce cheminement, c'est-à-dire sa verticalité. Pour se rendre compte de la configuration des lieux, quelques photos sont visibles en *Annexe 12*.

Au total, il y aura eu 5 déplacements de dispositif. À noter qu'à chaque déplacement de dispositif, la valeur maximum de l'erreur 3D, indiquée dans le *Tableau 6*, est vérifiée.

Dispositif	Niveau	Points visés	Écart max 3D (mm)
1	RDC	R.001, R.002, R.003, R.004, R.005, R.006	
2	RDC	R.001, R.002, R.003, R.004, R.005, R.007	0.13
3	PF3	R.004, R.005, R.006, R.306, R.401	0.46
4	PF6	R.004, R.304, R.305, R.401, R.602, R.603	0.26
5	PF8	R.603, R.701, R.801, R.805	0.14
6	PF9	R.603, R.802, R.806, R.905	0.05

Tableau 6: Récapitulatif des déplacements de dispositif effectués au BAF

À chaque niveau, pour chaque déplacement de dispositif, le matériel était débranché, rangé puis transporté et remonté, puis après 20 minutes de chauffe, les mesures pouvaient recommencer.

³² Groupe de Service en Transfert

D. Analyse des résultats

1. Logiques d'interprétation

Deux différentes comparaisons peuvent être effectuées entre les campagnes de 2012 et celle de 2015. En effet, il faut d'abord poser un principe de départ qui guidera le calcul. D'abord, on peut partir du principe que le réseau est très stable et qu'il ne subit aucune déformation dans le temps et donc que la référence est celui déterminé en 2012. L'autre principe est celui qui veut mettre en avant les déformations du réseau au cours du temps et donc qui met en doute la pérennité du réseau, et non la qualité des mesures.

a) Cas où l'on suppose le réseau stable

Si l'on suppose le réseau stable, on admet que les écarts sont dus uniquement à l'imprécision de l'appareil et aux conditions de mesurage existantes dans les bâtiments.

Dès lors, on va chercher à trouver la meilleure transformation pour ajuster le réseau de 2015 sur celui de 2012. L'exemple de la similitude 3D sera pris pour déterminer l'ordre de grandeur des paramètres.

Pour comparer les données issues des deux époques de mesure, le bilan de ce qui peut affecter le réseau sera dressé. D'abord, l'axe Z correspond à la verticale, cet axe dépend uniquement du plan horizontal qui est mesuré au RDC lors des mesures du réseau. La précision du plan horizontal créé par le LT étant de 2'', cela correspond à 0.1 mm à 10 mètres. Dès lors, les écarts max pouvant apparaître sur un plan vertical sont de l'ordre de 0.5 mm.

b) Cas où l'on cherche à montrer l'instabilité du réseau

Dans ce cas, on émet l'hypothèse que la structure du bâtiment est soumise à des efforts externes pouvant faire varier les coordonnées des nids jusqu'à quelques millimètres.

L'objectif des mesures n'est pas d'adapter au mieux le réseau de 2015 sur celui de 2012 par une similarité par exemple, mais de bien expliciter que la détermination de ces réseaux a été réalisée de manière nominale et qu'on accorde aux deux réseaux la même importance. Cependant, compte tenu des conditions de mesures et des éléments servant à définir le système de coordonnées, deux libertés seront prises pour minimiser les écarts. Ces deux libertés sont :

- Une rotation d'axe OZ car la détermination de l'axe OX se fait le long des quatre rails en moyennant les directions de ceux-ci. 2 directions ont été mesurées en 2012 et 4 en 2015. Dès lors, un angle résiduel peut ressortir. Ce sera la seule rotation car le plan OXY, lui, est défini par le LT grâce au plan de niveau qui garantit l'horizontalité du plan de référence OXY.

- Une translation en Z ayant comme origine également, la mesure des rails et leur moyenne altimétrique.

2. Les coordonnées définitives du réseau LT

a) La définition même du système de coordonnées

La critique qui peut être adressée à ce système de coordonnées est sa définition. En effet, pour être pérenne il faut qu'il s'appuie sur des éléments stables or les rails, bien qu'ancrés dans la dalle bétonnée des bâtiments, subissent des déformations par le poids de la table et du lanceur. De plus, les rails ne sont pas horizontaux, les mesures traduisent une dénivellée moyenne de 5 mm dans la direction des rails, et une dénivellée de 4 mm dans la direction perpendiculaire. Lorsque l'on compare les mesures de 2012 et 2015, on constate immédiatement des deltas inter rails en altitude. Concernant la direction, c'est le même problème, les rails présentent des défauts de linéarité, mais surtout lors des mesures, sont recouverts d'une couche de graisse qui ne facilite pas les mesures, les points sont sélectionnés sur les endroits propres pour ne pas fausser les résultats.

b) Résultats bruts

La première exploitation consiste à quantifier les écarts du réseau entre les deux déterminations mais sans réajustement préalable. La seule manipulation qui a été faite est la création du système en fixant le plan de niveau mesuré comme plan OXY puis en fixant comme coordonnées (0,0,Z) à l'axe lanceur mesuré donc deux translations en X et Y. Les rails ou plutôt l'altitude moyenne des 4 rails mesurés est fixée à 8700mm donc ce qui équivaut à une translation en Z. Ensuite, pour finir, il ne reste plus qu'une rotation d'axe OZ à affecter aux points mesurés, rotation qui aboutit à ce que l'axe des X corresponde à la direction moyenne des 4 rails (bisection).

- Le réseau BIL

Les écarts sur les composantes altimétriques sont les moins importants. C'est cependant en altimétrie que ressortent les plus gros deltas notamment au niveau 6. L'EMQ3D général est de 2.1 mm.

Id	Réseau 2012			Réseau 2015			Écarts			
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)	$\Delta 3D$ (mm)
LAN	0.0	0.0	6904.4	0.0	0.0	6903.9	0.0	0.0	-0.5	0.5
R.001	-11236.2	-15615.0	10669.6	-11234.0	-15616.4	10669.5	2.2	-1.4	-0.1	2.6
R.002	-11262.8	-20614.5	10431.4	-11260.3	-20615.9	10431.4	2.5	-1.4	0.0	2.9
R.003	15325.2	-15847.2	10510.7	15327.3	-15845.1	10510.7	2.1	2.1	0.0	2.9
R.004	15337.9	4967.4	10513.6	15337.6	4969.7	10513.4	-0.3	2.3	-0.2	2.3
R.005	15330.8	15644.2	10505.2	15328.9	15646.6	10505.0	-1.9	2.4	-0.2	3.0
R.006	-2711.5	16747.5	10405.5	-2713.6	16747.6	10405.3	-2.1	0.1	-0.2	2.2
R.007	-14382.3	13298.4	10419.4	-14384.2	13296.9	10419.1	-1.9	-1.5	-0.3	2.4
R.008	-15008.5	6565.3	10430.9	-15009.6	6564.1	10430.2	-1.1	-1.2	-0.7	1.8
R.301	15271.7	17170.3	21632.1	15269.4	17172.5	21631.9	-2.3	2.2	-0.2	3.2
R.302	-14027.5	17131.5	21486.2	-14029.7	17130.1	21486.1	-2.2	-1.4	-0.1	2.6
R.303	-8820.4	4189.9	21911.2	-8821.1	4189.5	21911.1	-0.7	-0.4	-0.1	0.8
R.304	7539.4	16921.1	21457.6	7537.3	16922.4	21457.3	-2.1	1.3	-0.3	2.5
R.305	15343.9	7614.2	21770.4	15343.0	7616.4	21770.3	-0.9	2.2	-0.1	2.3
R.306	9171.9	2652.8	21928.1	9171.4	2654.5	21928.1	-0.5	1.7	0.0	1.7
R.307	9508.2	-12019.1	21963.8	9509.0	-12017.5	21963.7	0.8	1.6	-0.1	1.8

R.501	15331.3	12524.4	44762.4	15330.4	12525.9	44762.2	-0.9	1.5	-0.2	1.7
R.502	-2500.3	19527.1	43295.3	-2502.2	19527.3	43295.0	-1.9	0.2	-0.3	1.9
R.503	-8927.4	17148.1	44554.7	-8929.1	17147.6	44554.0	-1.7	-0.5	-0.7	2.0
R.504	7689.0	2674.5	44613.9	7688.8	2675.2	44614.0	-0.2	0.7	0.1	0.8
R.505	3661.3	-3836.0	44449.4	3661.7	-3835.6	44449.5	0.4	0.4	0.1	0.6
R.506	9488.8	-12014.5	44770.1	9489.9	-12013.8	44770.3	1.1	0.7	0.2	1.3
R.601	9265.4	-3853.7	47289.4	9266.2	-3852.5	47290.8	0.8	1.2	1.4	2.0
R.602	3309.0	-3779.3	46934.3	3309.6	-3778.7	46935.5	0.6	0.6	1.2	1.5
R.603	7614.6	-12317.6	47394.9	7615.7	-12316.7	47397.6	1.1	0.9	2.7	3.1
R.604	-8933.4	17153.3	47996.6	-8934.9	17153.1	47994.1	-1.5	-0.2	-2.5	2.9
R.605	6320.2	17169.1	48039.5	6318.9	17170.3	48038.2	-1.3	1.2	-1.3	2.2
									Moyenne	2.1

Tableau 7: Écarts bruts constatés du réseau LT au BIL

- Le réseau BAF

Le premier constat est que les écarts sur les composantes X et Y sont tous négatifs, cela nous amène à penser que l'hypothèse d'origine d'une rotation d'axe OZ pour compenser la direction approximative des rails, bien que pouvant être calculée, n'est peut-être pas la plus appropriée. L'angle recherché sera celui qui minimise les écarts sur ces composantes. La translation verticale prévue initialement est moins visible étant donné les disparités de signe sur les écarts. Cependant, et ce qui serait aussi une autre hypothèse, est que l'axe lanceur ait été mal défini à une des campagnes de mesure. Dès lors, deux translations de directions OX et OY pourrait faire diminuer les écarts considérablement. Ces deux hypothèses seront considérées par la suite pour minimiser l'EMQ3D d'une valeur de 1.6 mm.

Id	Réseau 2012			Réseau 2015			Écarts			
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)	$\Delta 3D$ (mm)
AXE	0.0	0.0	6887.9	0.0	0.0	6886.6	0.0	0.0	-1.3	1.3
R.001	-9014.4	-16466.0	10304.6	-9014.9	-16466.4	10303.7	-0.5	-0.4	-0.9	1.1
R.002	11.3	-19195.3	10272.5	10.9	-19195.9	10271.9	-0.4	-0.6	-0.6	0.9
R.003	11935.3	-16324.2	10430.5	11935.2	-16325.0	10430.5	-0.1	-0.8	0.0	0.8
R.004	8472.2	7460.4	10615.6	8472.4	7460.0	10616.0	0.2	-0.4	0.4	0.7
R.005	2194.9	10822.3	10584.9	2195.1	10821.6	10584.9	0.2	-0.7	0.0	0.7
R.006	-9244.7	7443.6	10447.5	-9244.7	7443.4	10447.2	0.0	-0.2	-0.3	0.4
R.007	-17572.8	-8502.4	10273.6	-17573.2	-8502.7	10272.4	-0.4	-0.3	-1.2	1.3
R.301	8465.6	-16499.9	20199.3	8465.1	-16500.8	20199.2	-0.5	-0.9	-0.1	1.1
R.302	-25.7	-19185.5	20173.6	-26.3	-19186.7	20172.9	-0.6	-1.2	-0.7	1.5
R.303	-5044.7	-3616.0	20000.2	-5044.9	-3616.9	20000.1	-0.2	-0.9	-0.1	0.9
R.304	-8470.0	7453.6	20243.0	-8470.5	7453.2	20242.9	-0.5	-0.4	-0.1	0.7
R.305	8469.5	7462.1	20239.3	8469.4	7461.4	20239.9	-0.1	-0.7	0.6	0.9
R.601	-2117.2	-12482.2	38889.4	-2118.5	-12484.0	38889.7	-1.3	-1.8	0.3	2.2
R.602	-1892.8	-3928.6	38524.2	-1893.7	-3930.1	38524.8	-0.9	-1.5	0.6	1.8
R.603	-1914.2	3694.7	38679.4	-1914.8	3693.3	38680.2	-0.6	-1.4	0.8	1.7
R.701	8465.7	-16419.9	42563.5	8464.4	-16422.0	42564.2	-1.3	-2.1	0.7	2.6
R.801	-7.0	-16248.5	44464.8	-8.6	-16250.2	44465.2	-1.6	-1.7	0.4	2.4
R.901	-8472.5	10430.1	47489.3	-8473.4	10429.4	47489.7	-0.9	-0.7	0.4	1.2

R.902	-19.7	10171.9	47224.1	-20.4	10170.8	47225.0	-0.7	-1.1	0.9	1.6
R.903	8850.2	7452.0	47442.7	8849.6	7450.3	47444.0	-0.6	-1.7	1.3	2.2
R.904	-8478.1	-16430.1	47552.8	-8480.2	-16431.8	47551.7	-2.1	-1.7	-1.1	2.9
R.905	8465.8	-16391.6	47464.8	8464.3	-16393.6	47465.7	-1.5	-2.0	0.9	2.7
									Moyenne	1.6

Tableau 8: Écarts bruts constatés du réseau LT au BAF

c) *Traitement*

- Cas où l'on suppose le réseau stable

Est donc cherchée la meilleure transformation entre les deux déterminations, qui permettra de compenser l'imprécision des mesures et de caler au mieux les deux réseaux. Cette transformation devra avoir comme caractéristique de laisser invariants les angles et les distances. La similitude 3D à 7 paramètres a été retenue pour ces raisons.

D'après les écarts mis en avant dans le *Tableau 7* et le *Tableau 8*, l'hypothèse selon laquelle les rotations seront de faible envergure, nous permet d'écrire la similitude 3D comme ceci :

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Tx \\ Ty \\ Tz \end{pmatrix} + k \begin{pmatrix} 0 & -Rz & Ry \\ Rz & 0 & -Rx \\ -Ry & Rx & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

Avec :

- X', Y', Z' les coordonnées de 2015
- X, Y, Z les coordonnées de 2012
- Tx, Ty, Tz les trois translations
- Rx, Ry, Rz les trois rotations
- k le facteur d'échelle

Un programme sous le logiciel *Scilab* a été créé afin de résoudre directement ce système et déterminer les paramètres de la transformation. Le programme de résolution par la méthode des moindres carrés est consultable en *Annexe 13*.

Les paramètres de la transformation finalement calculée sont :

Paramètres	Au BIL	Au BAF
Tx (mm)	-0.04	0.44
Ty (mm)	0.06	-0.13
Tz (mm)	0.28	-0.43
Rx (rad)	-1.1×10^{-5}	2.9×10^{-5}
Ry (rad)	-1.7×10^{-6}	3.5×10^{-5}
Rz (rad)	1.1×10^{-4}	2.4×10^{-5}
k	-8.6×10^{-6}	2.3×10^{-5}

Les nouvelles coordonnées calculées présentent des écarts réduits par rapport aux résultats bruts. Au BIL, l'EMQ3D passe de 2.1 mm à 1.9 mm, et de 1.6 mm à 0.5 mm au BAF.

- Cas où l'on cherche à montrer l'instabilité du réseau.

Dans ce cas, et c'est ce qui a été retenu, c'est la mesure à un instant t qui va être privilégiée. C'est donc en réalité les mesures brutes qui vont être conservées et non pas les coordonnées issues d'une transformation en relation avec une détermination antérieure. En effet, la mesure du système de coordonnées avec le LT revêt un intérêt majeur. Étant donné que ces mesurages ne peuvent se faire que lorsque le bâtiment est vide (sans table et sans lanceur), on atténue les effets du milieu sur les mesures. Ainsi, la stabilité de l'appareil est assurée car il y a peu d'opérations au niveau des plateformes et on peut surveiller la présence ou non de personnel près, de l'appareil. Ainsi, pour les campagnes de validation, le LT doit être privilégié.

3. Les coordonnées définitives du réseau tachéomètre

Point	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)	$\Delta 3D$ (mm)
LAN	0.0	0.0	-2.1	2.1
HPY	-3.0	4.7	-0.5	5.6
IZ	-0.4	2.5	0.4	2.5
1001	3.2	1.8	-3.8	5.2
1002	0.0	1.8	-5.1	5.4
1004	1.9	-0.9	-1.9	2.9
2001	0.5	2.4	-1.7	2.9
2002	-2.6	2.8	-1.7	4.2
5001	-1.6	6.9	0.3	7.0
5002	-5.0	3.0	-1.8	6.1
5004	-10.3	2.6	1.7	10.8
5005	-5.7	2.3	1.2	6.3
			Moyenne	5.1

Tableau 9: Tableau 9: Écart bruts constatés réseau « tachéo » au BIL

Point	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)	$\Delta 3D$ (mm)
AXE	0.0	0.0	-1.3	1.3
102	1.2	-3.1	-0.8	3.4
103	0.5	-3.4	-2.8	4.4
104	-0.6	-0.2	-5.9	5.9
105	-1.2	-0.5	-4.9	5.0
1002	0.5	-1.5	0.0	1.6
1003	0.4	-0.7	-0.4	0.9
1004	1.4	-1.5	-0.7	2.2
2007	-0.8	0.9	-2.7	3.0
901	5.8	7.1	4.4	10.2
902	-3.1	5.6	6.2	9.0
9001	0.6	10.8	6.0	12.3
9002	3.6	1.7	4.0	5.6
			Moyenne	5.3

Tableau 10: Écart bruts constatés réseau « tachéo » au BAF

La décision a été prise de conserver les mesures brutes du LT pour renseigner les nouvelles coordonnées du réseau tachéomètre. En effet, on a pu constater que l'écart max des mesures brutes entre le réseau LT de 2012 et celui 2015 était de 2.9 mm contre 12.3 mm entre le réseau du tachéomètre déterminé en 1997 et celui déterminé par le LT en 2015. Ces écarts sont en accord aux vues des ellipses de confiance accordées aux points du niveau 9 (901, 902, 9001, 9002) lors de la campagne de 1997.

Cette exploitation est la plus importante dans le sens où l'analyse des résultats peut amener à une conclusion quant à l'utilisation d'un tachéomètre au BIL et au BAF avec le réseau de cibles tachéomètre défini au LT.

V. Optimisation du choix de l'appareil suivant les interventions

A. La règle des 5M

1. Définition de la règle

La question du choix du matériel pourrait ne pas se poser étant donné qu'un document contractuel indique que, je cite : « La précision à respecter devra être inférieure à un quart de la tolérance spécifiée. » Dès lors on pourrait se dire que le choix de l'appareil se fera uniquement suivant cette règle. Cependant, en réalité, aucune tolérance, mis à part dans les SMOS, n'est spécifiée dans les demandes donc la décision concernant le choix de l'appareil appartient à l'ETI. De plus, la notion de précision n'est pas définie clairement dans le contrat. S'agit-il d'une classe de précision correspondant à l'arrêté de 2003, s'agit-il d'une précision relative, absolue, cumulée... La question se pose également quant à la garantie de cette précision, doit-elle être donnée à 1σ , 2σ ?

La redétermination des réseaux du BIL et du BAF ont permis de mettre en évidence certaines dérives et de montrer que ces réseaux ne sont pas immobiles et subissent des déplacements millimétriques dus principalement à la chaleur, qui dilate la structure porteuse du bâtiment, et au vent.

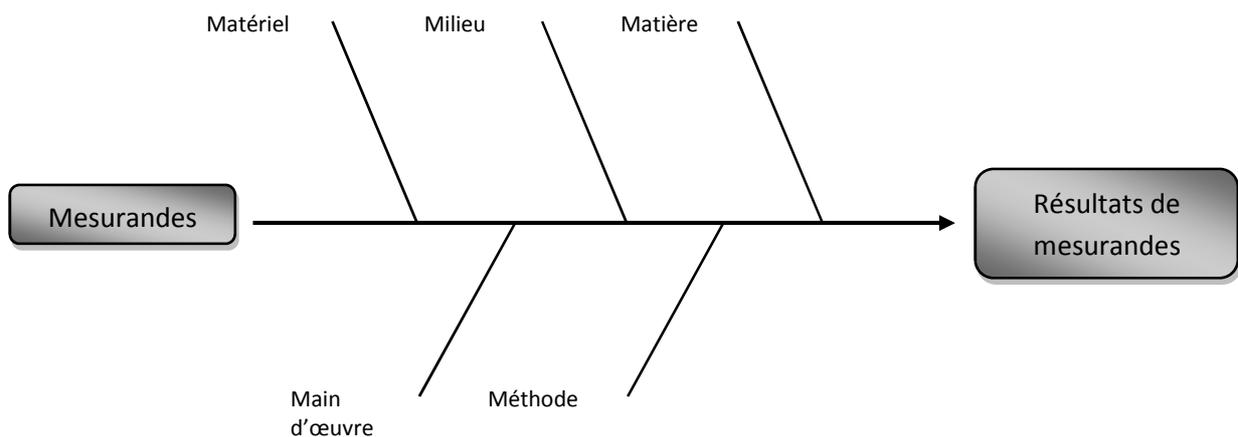


Illustration 21: Diagramme de Kaoru Ishikawa représentant la règle des 5M

Le diagramme recense donc les causes ou plutôt les paramètres pouvant affecter les mesures, et les effets associés aux résultats. Ainsi, il est intéressant de quantifier les effets de chaque paramètre sur les résultats et ne pas regarder uniquement la précision de mesure de l'appareil. En effet, il n'y a aucun intérêt à utiliser un appareil de meilleure précision qu'un tachéomètre si la perte de précision engendrée par des causes extérieures est supérieure à la précision de l'appareil.

2. Recherche des paramètres affectant la précision

a) *Milieu*

Le milieu correspond à l'environnement de mesure. L'environnement dépend d'une multitude de critères en commençant par les paramètres atmosphériques qui sont, suivant les bâtiments, idéaux grâce à la présence ou non de climatisation. Les paramètres météorologiques extérieurs vont aussi être considérés

Ensuite, vient la stabilité du sol ou du lieu de mise en station de l'instrument. Ce critère dépend également non seulement de la rigidité de la structure porteuse mais aussi de la présence d'autres intervenants.

b) *Matériel*

La précision du résultat de mesurage va dépendre effectivement de l'appareil utilisé. Le Laser Tracker ou le TS30 associé à un niveau numérique dans certains cas, permettent d'effectuer l'ensemble des contrôles métrologiques au CSG.

c) *Matière*

La surface de mesure tient également une place importante dans la qualité des résultats mais aussi dans les possibilités de mesure. On pense notamment à la réflectivité de la surface, mais aussi à la possibilité de contact.

d) *Main d'œuvre*

Deux critères ressortent de ce paramètre, le niveau physique de la personne et son niveau technique. Le niveau physique traduit la facilité de transport et de mise en place de l'appareil, tandis que le niveau technique met en avant les compétences nécessaires pour une bonne utilisation de l'appareil. Le nombre de personnes devant être présent va aussi être examiné.

e) *Méthode*

On va distinguer les interventions qui existent déjà ou non, et aussi, les interventions avec procédure ou SMOS.

Le temps d'intervention est également à prendre en compte

3. Quantification des paramètres

Dans ce paragraphe, sera traité des effets quantitatifs de chaque paramètre dégradant la précision des résultats de mesurande.

a) *Milieu*

Afin de visualiser le passage d'une personne à proximité du LT, le test consistait à mesurer un point fixe, c'est-à-dire un SMR fixé sur un nid magnétique, par intervalle de 500 ms. Au cours de la mesure, il s'agissait de passer à côté de l'appareil. L'objectif, ici, était donc de voir comment était affectée une mesure si elle était déclenchée pendant le passage d'un individu. Comme on peut le voir sur l'Annexe 14, aucune influence notable n'a pu être constatée sur la composante X. Sur les composantes Y et Z, on constate une dérive de ± 0.1 mm par rapport à la valeur moyenne, ce qui met en avant l'instabilité des plateformes et le risque à mesurer lorsqu'il y a des opérations simultanées à celle de métrologie. On remarque aussi qu'après le passage, les coordonnées finales demeurent identiques aux coordonnées initiales mesurées, à quelques centièmes de millimètres près.

Concernant les accès, ce sont des structures en aluminium avec des marches qui sont utilisés pour atteindre les endroits inaccessibles. Haut de 3 mètres pour 50 kg, ces accès se déplacent grâce à des roulettes. Ce déplacement est caractérisé par de fortes vibrations. Les effets de celles-ci seront quantifiés par le même test que pour le passage d'un individu. La grande différence, mis à part l'évidente variation des coordonnées, est le non-retour à la position initiale après le déplacement. Les graphiques situés en *Annexe 15* traduisent un déplacement de 0.4 mm en X, 0.25 mm en Y et 0.1 mm en Z, soit 0.45 mm en 3D ce qui n'est pas négligeable lorsque l'on sait que ces déplacements d'accès sont très fréquents. En effet, nous sommes les premiers utilisateurs car de nombreuses entités à palper sont situées au niveau des parties hautes.

Des mesures ont été réalisées à l'échelle d'une journée afin de constater si un lien peut être fait entre température et déplacement de point. Ce dernier test consistait à mesurer par intervalle de temps (10 secondes) un SMR fixé dans un nid magnétique afin de dégager une éventuelle logique de déformation du bâtiment au cours du temps. Pour cela, l'appareil a été positionné au rez-de-chaussée, seul endroit stable du bâtiment. Avant de débiter les mesures, un alignement itératif a été effectué pour se caler dans le repère bâtiment, l'objectif étant de voir la présence d'écarts, mais aussi leur direction. Le point visé se situait au niveau 3 soit 10 mètres au-dessus du rez-de-chaussée. La distance entre le point et l'appareil était de 15 m. La précision 3D associée est donc de 57 μm (cf *II.D.1*). Plus de 2100 points ont été mesurés entre 10h30 et 16h30. Les résultats de cette campagne de mesurage sont visibles en *Annexe 16*.

À noter que, comme le montre l'*Illustration 22*, le nid mesuré était collé sur la face longitudinale du pilier.

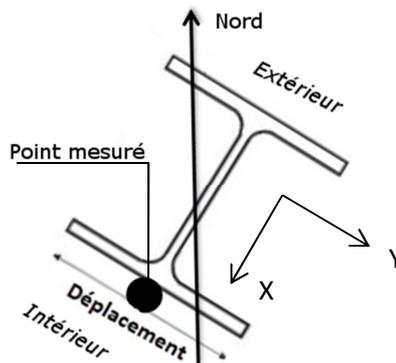


Illustration 22: Déplacement du pilier HEB

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de ces résultats. La première est que la stabilité réputée des piliers au cours du temps est remise en cause. Cependant, on s'aperçoit que sur la composante altimétrique, il n'y a pas de variation flagrante, synonyme donc d'absence d'affaissement des piliers à l'échelle d'une journée. Sur les composantes planimétriques, par contre, on peut déduire une réelle corrélation entre heure de mesure, donc température, et écarts. C'est principalement en Y que les écarts se manifestent, or l'axe Y se situe dans la direction Nord-Ouest / Sud-Est. L'origine du vent est maritime, donc de direction Nord-Est / Sud-Ouest, et la trajectoire du soleil Est-Ouest. D'après les données communiquées par le service météorologique du CSG, données livrées à météo France, l'effet du vent est négligeable. En effet, la vitesse moyenne de celui-ci est de 11 m/s soit 35 km/h. De plus, 95% de la vitesse de ce vent est compris entre 4.5 et 8 m/s. L'azimut du vent majoritaire est compris entre 60 et 80° et le vent est exclusivement en provenance de l'océan. Les écarts constatés auraient donc dû être plus visibles sur la composante X, car dans le sens du vent.

Un lien peut être fait entre mouvement des piliers et évolution de la température au cours de la journée. Une dilatation thermique pourrait expliquer ces mouvements.

b) Matériel

Du point de vue matériel, il s'agit de voir les capacités techniques de l'appareil, notamment celles traitant de la précision de chaque appareil (cf II.D.1). Pour rappel, le LT amène une précision de l'ordre du centième de millimètre contre le millimètre pour le TS30.

c) Matière

Les objets ou pièces à mesurer sont en caoutchouc, en inox et métal divers. La rigidité du matériel peut être un facteur déterminant. Le fait de mesurer par contact peut faire que le matériel se déforme d'où l'avantage des visées optiques. Aussi, selon l'angle d'incidence du rayon laser et la réflectivité du matériel, l'usage du tachéomètre est quelque fois compromise, ce qui n'est pas le cas pour le LT. Cependant, ce problème peut être réglé en utilisant des visées d'intersection. En effet, on s'affranchit de la réflectivité en n'enregistrant aucune distance.

d) Main d'œuvre

La difficulté pour transporter le LT et le TS30 et celle pour leur mise en œuvre sont complètement différentes. Le poids du LT ne permet pas à une personne ne pouvant porter 20 kg seule de s'en servir quotidiennement. La compréhension des systèmes de coordonnées est également essentielle, tout comme les principes de meilleur ajustement d'entités. Le niveau d'ingénieur est préconisé pour l'exploitation des résultats. Quant au nombre de personnes nécessaires, deux doivent être disponibles pour le LT, surtout dans des environnements où la tête du LT doit être orientée manuellement pour éviter les obstacles sur le trajet du laser mais aussi pour vérifier la stabilité de l'appareil lors de mesures.

e) Méthode

Difficile à quantifier mais toutefois existante, la précision des résultats va dépendre de la connaissance de l'opération. La première fois où l'on intervient, on tente de trouver la meilleure approche mais c'est seulement après avoir renouveler cette même opération que l'on trouve de meilleures conditions de mesurage et donc une optimisation des mesures allant avec une meilleure précision.

4. Bilan

Beaucoup utilisé en métrologie, le critère de la capabilité du moyen de mesure C_{mm} permet d'associer l'appareil approprié par rapport à un intervalle de tolérance IT déduit des spécifications de l'objet et, par rapport à l'incertitude s de l'ensemble des paramètres affectant la mesure :

$$C_{mm} = \frac{IT}{s}$$

En d'autres termes, cela correspond à l'aptitude du moyen de mesure à effectuer les mesures, et c'est bien ce qui est recherché ici.

Ce qui est intéressant dans ce critère, est qu'il ne prend pas en compte seulement la précision de l'appareil, mais prend aussi l'ensemble des 5 paramètres affectants les mesures. Dans notre cas, le fait de ne pas prendre en compte le milieu qui occupe une place prépondérante dans la dégradation de la précision, reviendrait à ne pas considérer la réalité du terrain. L'incertitude s correspond donc en quelque sorte à une incertitude élargie.

Cependant, une fois le critère calculé, comment peut-on déduire de sa valeur, la capabilité de l'instrument ? En réalité, le C_{mm} doit être fixé entre le client et le service de mesure. Une recherche dans le contrat a permis de mettre en évidence que : « la précision à respecter doit être inférieure au quart de la tolérance spécifiée ». Ainsi, pour que l'appareil soit dit « apte » à mesurer, la valeur du C_{mm} doit être supérieure à 4.

Ainsi, si les valeurs de l'intervalle de tolérance sont connues des spécifications, et que l'on dispose d'une valeur de *Cmm* égale à 4, il ne reste plus qu'à déterminer l'incertitude *s*.

Le milieu prend une part prépondérante dans la détérioration des résultats. En effet, nous avons pu voir précédemment que travailler au centième de millimètre était utopiste au BIL ou au BAF, dans ces conditions de mesurage. En moyenne, on peut estimer travailler à 5 dixièmes de millimètre au mieux, ce qui enlève de l'importance dans le choix de l'appareil. En effet, si l'on aborde ce principe en établissant le rapport entre la perte de précision due au milieu et celle due aux caractéristiques techniques de l'appareil, on obtient un coefficient *k* qui caractérise le poids du milieu de mesurage par rapport au matériel utilisé. Plus *k* est petit, plus l'appareil utilisé sera responsable de l'incertitude sur les résultats de mesurage. À l'inverse, si *k* est grand, ce sont les caractéristiques du milieu qui vont affecter les mesures. Pour le LT, on obtient $k = \frac{\sigma_{milieu}}{\sigma_{appareil}} = \frac{0.5}{0.00001} = 5000$.

Ce coefficient devient pour le tachéomètre, $k = \frac{0.5}{1} = 0.5$. Ainsi, si l'on ne prend en compte que ce critère, c'est comme si la précision du LT ne rentrait pas en compte sur l'incertitude finale des mesures.

L'incertitude *s* va également dépendre du travail en relatif ou en absolu. En effet, cette incertitude composée prendra en compte pour le premier cas, l'incertitude de l'appareil et l'incertitude due au milieu, tandis que dans le second cas, l'incertitude de recalage dans le système général « s'ajoutera » :

$$s = \sqrt{\sigma_{appareil}^2 + \sigma_{milieu}^2} \text{ (pour des résultats de mesure en relatif)}$$

$$s = \sqrt{\sigma_{appareil}^2 + \sigma_{milieu}^2 + \sigma_{recalage}} \text{ (pour des résultats de mesure en absolu)}$$

Par expérience, on pose $\sigma_{milieu} = 0.5 \text{ mm}$ et $\sigma_{recalage} = 0.3 \text{ mm}$ pour le LT et $\sigma_{milieu} = 0.5 \text{ mm}$ et $\sigma_{recalage} = 0.7 \text{ mm}$.

B. Mise à jour des procédures

En plus du critère de capacité de mesure, d'autres facteurs sont à considérer pour le choix de l'appareil. Il ne s'agit pas de décider du choix d'un appareil, à la seule considération d'un critère mathématique. La réalité opérationnelle doit être étudiée.

D'abord, on pense au temps disponible pour effectuer les mesures, connaissant le temps de chauffe du LT et le fait que le temps de mesure est deux fois plus long avec le LT en général. Il peut exister des contraintes d'enchaînement des opérations signifiant que les opérations suivantes dépendent des mesures donc du temps d'exécution. Vient ensuite, le temps de traitement des mesures : instantané pour disposer des résultats de mesurage pour le LT et une heure en général pour le tachéomètre.

Afin de remplir une démarche de qualité, certaines procédures doivent être mises à jour ou conservées avec les justifications apportées.

N° Procédure	Titre	Absolu ou relatif	Tolérance	Appareil conseillé	Justification
A5.3.PO AR 6850 CO (1)	Contrôle géométrique des bras EPC	Absolu	± 3 mm	Station totale	Capabilité de l'appareil Temps de mesure
A5.34.PO AR 6852 PO (1)	Contrôle du roulis des EAP	Relatif	± 0.05 ° soit ± 4 mm	Station totale	Capabilité de l'appareil Pas de contact

A5.3.PO AR 6854 CO (1)	Contrôle de planéité de l'interface de pose EAP sur palette	Relatif	± 0.1 mm (altitude) ≤ 0.3 mm (planéité générale) ≤ 0.1 mm (planéité locale)	Laser Tracker	Capabilité de mesure Stabilité du sol Mesures sans autres industriels Résultat en temps réel
A5.3.PO AR 6856 CO (1)	Contrôle d'horizontalité de l'interface de pose EAP sur les palettes au BIP	Relatif	± 0.11 ° soit ± 7 mm	Niveau numérique	Capabilité de l'appareil Temps de mesure
A5.3.PO AR 6857 CO (1)	Revalidation géométrique des tables	Absolu	Diverses	Station totale / Laser Tracker	LT utilisé en priorité sauf pour les points inaccessibles (dans le vide)
A5.3.PO AR 6859 CO (1)	Contrôle du gabarit d'une charge utile	Relatif	/	Station totale	Pas de contact
A5.31.PO AR 6862 CO (0)	Contrôle de l'altitude du plan supérieur couronnes EAP au BIL	Absolu	± 4 mm	Niveau	Capabilité de l'appareil Tolérance large
A5.3.PO AR 6864 PO (1)	Contrôle dimensionnel des palettes au BRP	Relatif	± 0.4 mm	Laser Tracker	Capabilité de l'appareil Résultat en temps réel Pièces géométriques mathématiquement définie
A5.3.PO AM 6866 CO (0)	Contrôle topographique annuel des bras cryotechniques	Absolu	± 1 mm	Laser Tracker / Station totale	LT en priorité car : Capabilité de l'appareil Pièces mathématiquement définie Tachéomètre pour les points inaccessibles

Le choix des appareils étant fait, il faudrait cependant tout mettre en œuvre pour travailler seul sur les plateformes. De plus, des contrôles de fermeture devraient se faire toutes les 30 minutes lors de l'utilisation du LT, ceux-ci, afin de voir l'évolution des écarts sur les points de calage.

Conclusion

La métrologie vue par les géomètres débute par la mise en place d'un réseau de points stables et pérennes, déterminés par des observations angulaires et des mesures de distances surabondantes par rapport au nombre de points à calculer. C'est ensuite grâce à une méthode d'optimisation, de compensation, et après analyses et traitements de l'ensemble des observations, que le réseau peut être calculé dans sa globalité. Chaque point calculé est caractérisé, à un seuil de confiance donné, par une incertitude de détermination symbolisée par une ellipse de confiance. C'est cette incertitude, plus difficile à obtenir que les résultats de mesurande en eux-mêmes, qui est indispensable pour estimer la qualité du travail, et ainsi pouvoir respecter la marge d'erreur imposée par le client. Ceci est permis grâce à la parfaite connaissance du fonctionnement des appareils traditionnels de mesure que sont les stations totales et les niveaux de précision, ainsi que leur erreurs systématiques. L'introduction du Laser Tracker dans le processus des contrôles métrologiques au Centre Spatial Guyanais demande une philosophie d'approche spécifique.

Le fait d'avoir participé à l'ensemble ou presque des opérations a permis de mettre en avant la réalité du milieu de mesure et d'en déduire des enseignements.

D'abord, ce qui ressort de ce travail de recherche, sont les contraintes de mesure au BIL et au BAF. Ces contraintes commencent par une instabilité manifeste des plateformes où est positionné l'appareil. En théorie, si aucune personne ne passe à proximité de l'appareil, où ne déplace d'accès, l'influence du milieu serait amoindrie. Hors, en pratique, la réalité opérationnelle prend le dessus, et, les interventions des différents industriels s'effectuent en même temps que la prise de mesure, ce qui éloigne le contexte des mesures d'un contexte métrologique.

Ensuite, il a été montré que la stabilité des bâtiments pouvait être remise en cause suite à une mesure en continu qui a montré des écarts de ± 0.5 mm sur une des composantes planimétriques. On s'aperçoit donc que suivant l'heure de la mesure, les résultats peuvent varier de cet ordre de grandeur.

Après avoir déterminé l'influence de milieu de mesure au sein du BIL et du BAF, la mise en place du LT a été décidée ou écartée en étudiant différents paramètres et en tenant compte de certains critères. C'est effectivement à travers une approche analytique que le moyen de mesure approprié à chaque opération a été choisi. Cette approche a d'abord consisté à définir le processus de mesure, puis à dresser le bilan des différents facteurs qui aggravent l'incertitude des résultats de mesurande en suivant la « règle de 5 M ». L'influence de chaque facteur, se résumant à l'influence du milieu, a été quantifiée afin de pouvoir calculer l'incertitude composée du résultat de mesurande final. Pour finir, cette incertitude composée, obtenue à partir de la loi de propagation des erreurs, sera élargie car certains paramètres la composant sont difficilement quantifiables. Un coefficient $k=2$ a donc été déterminé empiriquement afin de pallier le manque d'informations sur ces paramètres. Ce coefficient vient donc multiplier l'incertitude composée afin d'obtenir l'incertitude élargie, l'incertitude finale.

Malgré la précision supérieure du LT, l'analyse du critère de capabilité du moyen de mesure a montré que son utilisation ou plutôt son aptitude à mesurer n'est pas considérablement supérieure à celle du tachéomètre. L'incertitude finale étant essentiellement due au milieu, ce sont les atouts et inconvénients de chaque appareil qui ont permis de finaliser le choix, hors opérations spécifiques.

Le projet Ariane 6 atteindra son apogée en 2020 avec un premier lancement prévisionnel. La construction de l'ensemble de lancement ne va pas tarder à débuter. Cela commencera par le terrassement de la zone sélectionnée puis par l'érection des bâtiments, assimilables au BIL ou au BAF, accueillant le futur lanceur. Dans ces bâtiments auront également lieu de la métrologie dimensionnelle. L'utilisation du LT pourrait être optimisée si un dialogue entre le service infrastructure, le service topographique et les industriels commercialisant le lanceur a lieu. De ce dialogue, pourrait ressortir la mise en place de plateformes fixes et stables à chaque niveau, permettant d'améliorer considérablement les conditions de mesure.

Bibliographie

Ouvrages

- [1] M. DURSAPT Aide-mémoire - Métrologie tridimensionnelle 2009 Édition DUNOD
- [2] J-M KARRER Cours de métrologie tridimensionnelle Institut Universitaire de Technologie de Mulhouse
- [3] J-M KARRER Cours d'Incertitudes de mesure Institut Universitaire de Technologie de Mulhouse
- [4] JCGM and member organizations (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, UPAP and OIML) - Joint Committee for Guides in Metrology Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM) 3e édition Version 2008 avec corrections mineures
- [5] JCGM and member organizations (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, UPAP and OIML) - Joint Committee for Guides in Metrology Evaluation of measurement data | The role of measurement uncertainty in conformity assessment 2012
- [6] JCGM and member organizations (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, UPAP and OIML) - Joint Committee for Guides in Metrology Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement 2008
- [7] AFNOR (Association Française de Normalisation) Norme ISO 17123-3:2001 Décembre 2001

Articles de revue scientifique

- [8] M. KASSER Géomètre n°2124 Avril 2015 Dossier du mois: Métrologie dimensionnelle - Un marché haute technicité
- [9] R. SUGAHARA Performance test of laser trackers of Faro
- [10] G. GASSNER Instrument tests with the new Leica AT401

TFE - Thèse

- [11] R. CHAURAND Optimisation de la mesure de l'anneau de stockage de l'ESRF avec un laser tracker AT401 Leica Septembre 2011 INSA
- [12] M. DUQUENNE Le laser de poursuite AT401 peut-il servir à l'alignement précis des composants des accélérateurs de particules du CERN Juin 2012 INSA
- [13] S. DOUCHE ZLA5 Etude méthodologique du contrôle d'usure des carreaux 2002
- [14] A. NUBIOLA Calibration of a serial robot using a laser tracker 2011

Sites internet

- [15] B. BRIDGES, [En ligne]. <http://www.qualitydigest.com/inside/twitter-ed/how-laser-trackers-work.html> (Pages consultées en mars 2015)
- [16] Site du CNES au CSG, [En ligne]. Adresse URL : <http://www.cnes-csg.fr/> (Pages consultées de mars à juin 2015)
- [17] Site d'Arianespace [En ligne]. Adresse URL : <http://www.arianespace.com/index/index.asp> (Pages consultées de mars à juin 2015)
- [18] Site du constructeur FARO, [En ligne]. Adresse URL : <http://www.faro.com/fr-fr> (Pages consultées en février 2015)
- [19] Blog de FARO France sur la métrologie et la numérisation laser, [En ligne]. Adresse URL : <http://blog-fr.faro.com/> (Pages consultées de mars à juin 2015)

Liste des annexes

ANNEXE 1: EXEMPLE DE CALCUL D'UNE SERIE D'OBSERVATIONS D'ANGLES HORIZONTAUX	68
ANNEXE 2: EXEMPLE DE CALCUL D'UNE SERIE D'OBSERVATIONS D'ANGLES VERTICAUX.....	69
ANNEXE 3: FICHE D'ETALONNAGE DU FARO LT ION - 2014	71
ANNEXE 4: ORGANIGRAMME DU BET ISSU DU PAQ.....	72
ANNEXE 5: LISTE DES PROCEDURES TOPOMETRIQUES ARIANE5	73
ANNEXE 6: INTERIEUR DU BIL EN PRESENCE LANCEUR	74
ANNEXE 7: SCHEMA DU RESEAU TACHEOMETRE AU BIL.....	75
ANNEXE 8: SCHEMA DU RESEAU LT AU BIL	76
ANNEXE 9: SCHEMA DU RESEAU TACHEOMETRE AU BAF	77
ANNEXE 10: EXTRAIT DU RAPPORT DE CALCUL COMP3D DU RESEAU BAF "TACHEOMETRE" (1997).....	79
ANNEXE 11: SCHEMA DU RESEAU LT AU BAF.....	80
ANNEXE 12: PHOTOS DE L'INTERIEUR DU BAF HORS PRESENCE LANCEUR.....	81
ANNEXE 13: SCRIPT DE SIMILITUDE 3D SCILAB	82
ANNEXE 14: ÉVOLUTION DES COORDONNEES D'UN POINT AVANT, PENDANT ET APRES LE PASSAGE D'UN INDIVIDU	83
ANNEXE 15: ÉVOLUTION DES COORDONNEES D'UN POINT AVANT, PENDANT ET APRES LE DEPLACEMENT D'UN ACCES.....	84
ANNEXE 16: ÉVOLUTION DES COORDONNEES D'UN POINT LORS D'UN SUIVI DE 6 HEURES A UNE FREQUENCE DE 0.1 Hz	85
ANNEXE 18: RESUME DESTINES AUX MEMBRES DU JURY	90
ANNEXE 19: POSTER SCIENTIFIQUE.....	91

Annexes

ANGLES HORIZONTAUX

POSITIONS DU CERCLE	POINTS	MESURES CG	MESURES CD	Moyenne	REDUCTION A 0	MOYENNE DES 3 POSITIONS	ECARTS	RESIDUS	CARRES RESIDUS
Position 1: Position initiale	1	399.9998	200.0018	0.0008	0.0000	0.0000 99.5929 149.0477 190.9396 225.2185 330.6921	0.0000	0.0002	0.00000005
	2	99.5926	299.5934	99.5930	99.5922		-0.0008	-0.0005	0.00000027
	3	149.0480	349.0497	149.0489	149.0481		0.0003	0.0006	0.00000034
	4	190.9395	390.9408	190.9401	190.9393		-0.0002	0.0000	0.00000000
	5	225.2174	25.2189	225.2182	225.2174		-0.0011	-0.0009	0.00000084
	6	330.6938	130.6940	330.6939	330.6931		0.0010	0.0012	0.00000150
Position 2: Rotation de 120°	1	266.6389	66.6407	266.6398	0.0000		0.0000	0.0002	0.00000005
	2	366.2314	166.2348	366.2331	99.5933		0.0004	0.0006	0.00000036
	3	15.6868	215.6877	15.6873	149.0475		-0.0002	0.0000	0.00000000
	4	57.5789	257.5795	57.5792	190.9394		-0.0002	0.0000	0.00000000
	5	91.8578	291.8577	91.8577	225.2179		-0.0006	-0.0003	0.00000011
	6	197.3313	397.3308	197.3311	330.6913		-0.0008	-0.0005	0.00000030
Position 3: Rotation de 120°	1	133.3480	333.3499	133.3490	0.0000		0.0000	-0.0004	0.00000013
	2	232.9407	32.9439	232.9423	99.5933		0.0004	0.0000	0.00000000
	3	282.3961	82.3977	282.3969	149.0479		0.0002	-0.0001	0.00000002
	4	324.2884	124.2890	324.2887	190.9398		0.0002	-0.0002	0.00000003
	5	358.5679	158.5681	358.5680	225.2191		0.0006	0.0002	0.00000004
	6	64.0412	264.0424	64.0418	330.6928		0.0008	0.0004	0.00000018
								SOMME	0.0000422
								ECART-TYPE ISO(mgon)	0.6

Annexe 1: Exemple de calcul d'une série d'observations d'angles horizontaux

ANGLES VERTICAUX

POSITIONS DU CERCLE	POINTS	MESURES CG	MESURES CD	Moyenne	MOYENNE DES 3 POSITIONS	ECARTS	CARRES RECARTS
Position 1: Position initiale	1	107.5362	292.4669	107.5347	107.5350 100.3129 92.6711 84.4252	-0.0004	0.00000013
	7	100.3140	299.6894	100.3123		-0.0007	0.00000044
	8	92.6734	307.3310	92.6712		0.0001	0.00000001
	9	84.4263	315.5759	84.4252		0.0000	0.00000000
Position 2: Rotation de 120°	1	107.5373	292.4672	107.5351		0.0001	0.00000001
	7	100.3151	299.6880	100.3136		0.0006	0.00000038
	8	92.6721	307.3309	92.6706		-0.0005	0.00000022
	9	84.4279	315.5768	84.4256		0.0004	0.00000013
Position 3: Rotation de 120°	1	107.5379	292.4673	107.5353		0.0003	0.00000008
	7	100.3153	299.6893	100.3130		0.0000	0.00000000
	8	92.6731	307.3302	92.6715		0.0004	0.00000013
	9	84.4270	315.5773	84.4249		-0.0003	0.00000012
						SOMME	0.00000165
						ECART-TYPE ISO(mgon)	0.5

Annexe 2: Exemple de calcul d'une série d'observations d'angles verticaux



Date 10-Dec-2014
Certification Number Y3034-10122014-EU
Tracker Serial Number Y01009003034

Calibration Standards Traceability Data

HUMIDITY STANDARD

Sensiron Humidity Sensor Model TH-4

TEMPERATURE STANDARD

Cornerstone Sensors Inc. Model TA1041

Calibration Date: **10-Dec-2014**

Calibrated by FARO Technologies

Calibration Standard: **Sika Microtemp**

Last Calibration: **27-Jan-14**

Trace Number: **DKD-K-13901**

Serial Number: **10074**

Next Calibration: **27-Jan-15**

Allowable Deviation: $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ as compared to Standard.

<u>As Received ($^{\circ}\text{C}$)</u>			<u>Post Calibration ($^{\circ}\text{C}$)</u>		
Standard	Actual	Deviation	Standard	Actual	Deviation
21.86	21.88	0.02	20.10	20.11	0.01

PRESSURE STANDARD

Intersema Model SM-12 Barometer Module

Calibration Date: **10-Dec-2014**

Calibrated by FARO Technologies

Calibration Standard: **DPI 740**

Last Calibration: **9-May-14**

Trace Number: **D-K-15092**

Serial Number: **74001663**

Next Calibration: **9-May-15**

Allowable Deviation: ± 1.4 mmHg as compared to Standard.

<u>As Received (mmHg)</u>			<u>Post Calibration (mmHg)</u>		
Standard	Actual	Deviation	Standard	Actual	Deviation
738.14	738.27	0.13	742.32	742.23	0.09

Calibrations conforms to internal procedures and those developed in accordance with ISO9001:2008. Calibration results relate only to the items specified. This report shall not be reproduced except in full without the written consent of the FARO Technologies Laser Measurement Division



FARO Europe GmbH & CO. KG
Lingwiesenstrasse 11/2
D-70825 Korntal-Münchingen
Germany

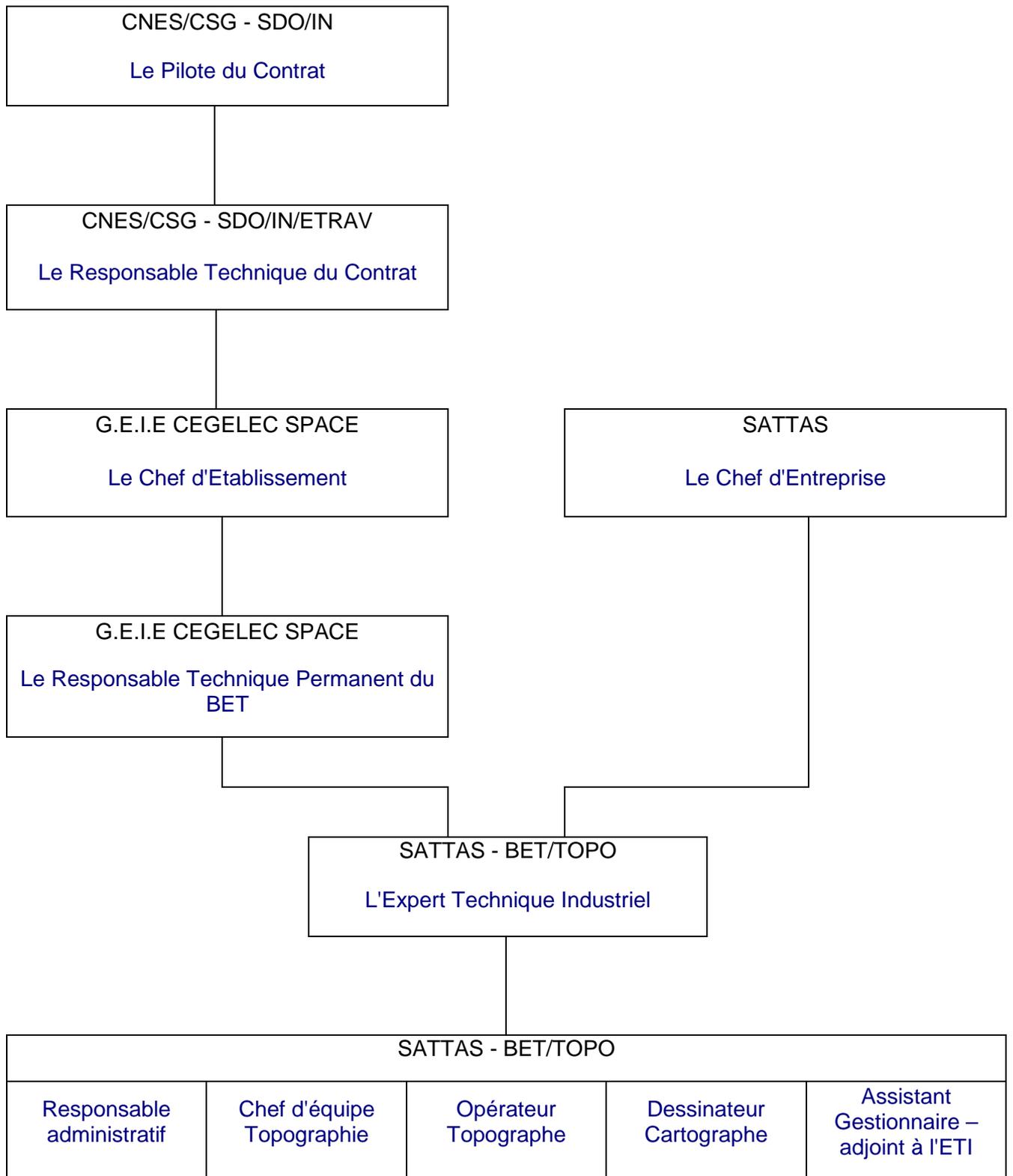
Phone 800-32767378
Fax 49 (715) 0979744

CALIBRATION CERTIFICATE
Laser Tracker Model ION

Date	10-Dec-2014
Certification Number	Y3034-10122014-EU
Tracker Serial Number	Y01009003034
Customer	ARIANESPACE Boulevard de l'europe 91006 EVRY Courcouronne France
Date Calibrated	10-Dec-2014
Certified By	 Marina Malinar Cal/Cert Technician
Condition Found	In Tolerance
Condition Left	In Tolerance

The instrument listed above has been tested, inspected and compensated against FARO working standards that have been calibrated using National Institute of Standards and Technology (NIST) or other appropriate or internationally recognized standards.

Calibrations conforms to internal procedures and those developed in accordance with ISO9001:2008. Calibration results relate only to the items specified. This report shall not be reproduced except in full without the written consent of the FARO Technologies Laser Measurement Division



Annexe 4: Organigramme du BET issu du PAQ

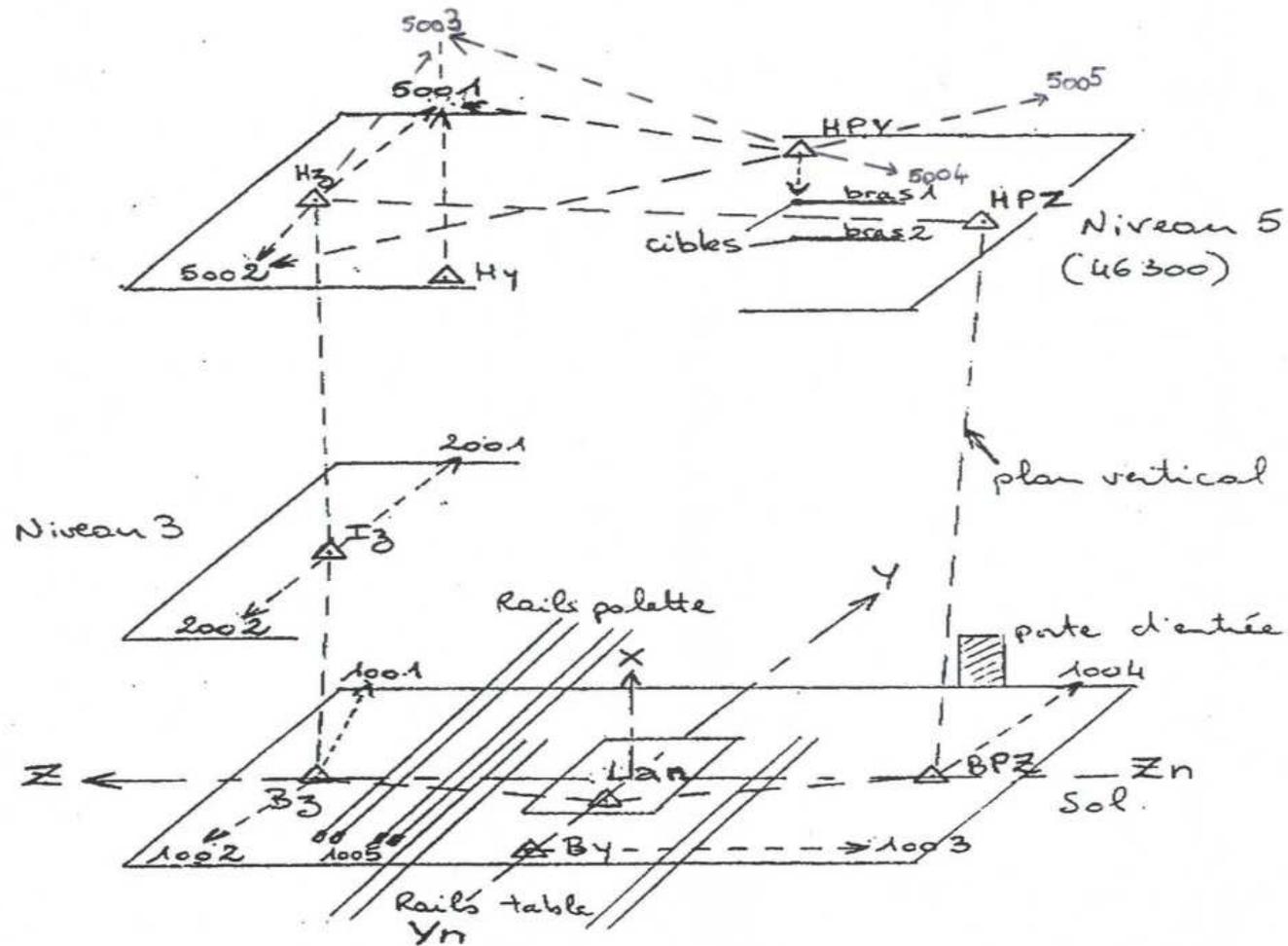
N° Procédure	Titre	Disponibilité
A5.3.PO AR 6850 CO (1)	Contrôle géométrique des bras EPC	Pour prochaine campagne
A5.34.PO AR 6851 PO (1)	Contrôle d'usure des carreaux EAP en ZL3	Pour prochaine campagne
A5.34.PO AR 6852 PO (1)	Contrôle du roulis des EAP	
A5.3.PO AR 6853 CO (1)	Contrôle des piges de guidage de l'EPC au niveau des caissons LBS	Pour prochaine campagne
A5.3.PO AR 6854 CO (1)	Contrôle de planéité de l'interface de pose EAP sur palette	
A5.3.PO AR 6855 CO (1)	Contrôle de déformation des caissons LBS	
A5.3.PO AR 6856 CO (1)	Contrôle d'horizontalité de l'interface de pose EAP sur les palettes au BIP	À la demande
A5.3.PO AR 6857 CO (1)	Revalidation géométrique des tables	Pour prochaine campagne
A5.3.PO AR 6858 CO (1)	Réglage des adaptateurs charge utile	
A5.3.PO AR 6859 CO (1)	Contrôle du gabarit d'une charge utile	
A5.3.PO AR 6860 CO (1)	Contrôle altimétrique des bras EPC en charge	
A5.3.PO AR 6861 CO (0)	Réglage géométrique du mulet pour les essais de dégivrage PAC sur les bras CRYO	Pour prochaine campagne
A5.31.PO AR 6862 CO (0)	Contrôle de l'altitude du plan supérieur couronnes EAP au BIL	Pour prochaine campagne
A5.3.PO AO 6863 PO (0)	Mesure de l'angulation des bielles DAAR	Pour prochaine campagne
A5.3.PO AR 6864 PO (1)	Contrôle dimensionnel des palettes au BRP	À la demande
A5.3.PO AR 6865 PO (1)	Contrôle topographique de l'usure des plafonds des carreaux EAP en ZL3	
A5.3.PO AM 6866 CO (0)	Contrôle topographique annuel des bras cryotechniques	À la demande

Annexe 5: Liste des procédures topométriques Ariane5



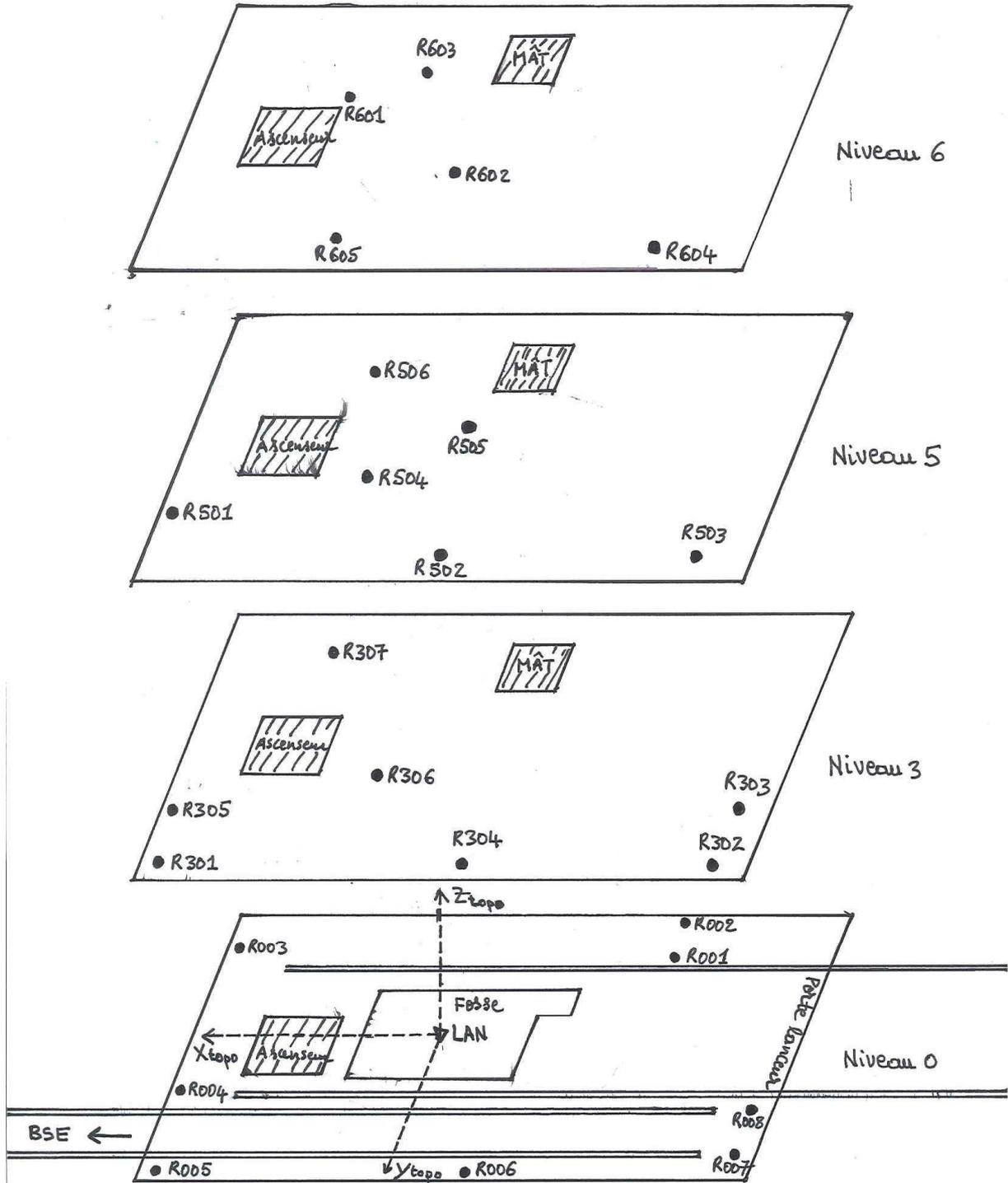
Annexe 6: Intérieur du BIL en présence lanceur

Système de coordonnées lanceur et situation des points de référence et de contrôle au BIL



Annexe 7: Schéma du réseau tachéomètre au BIL

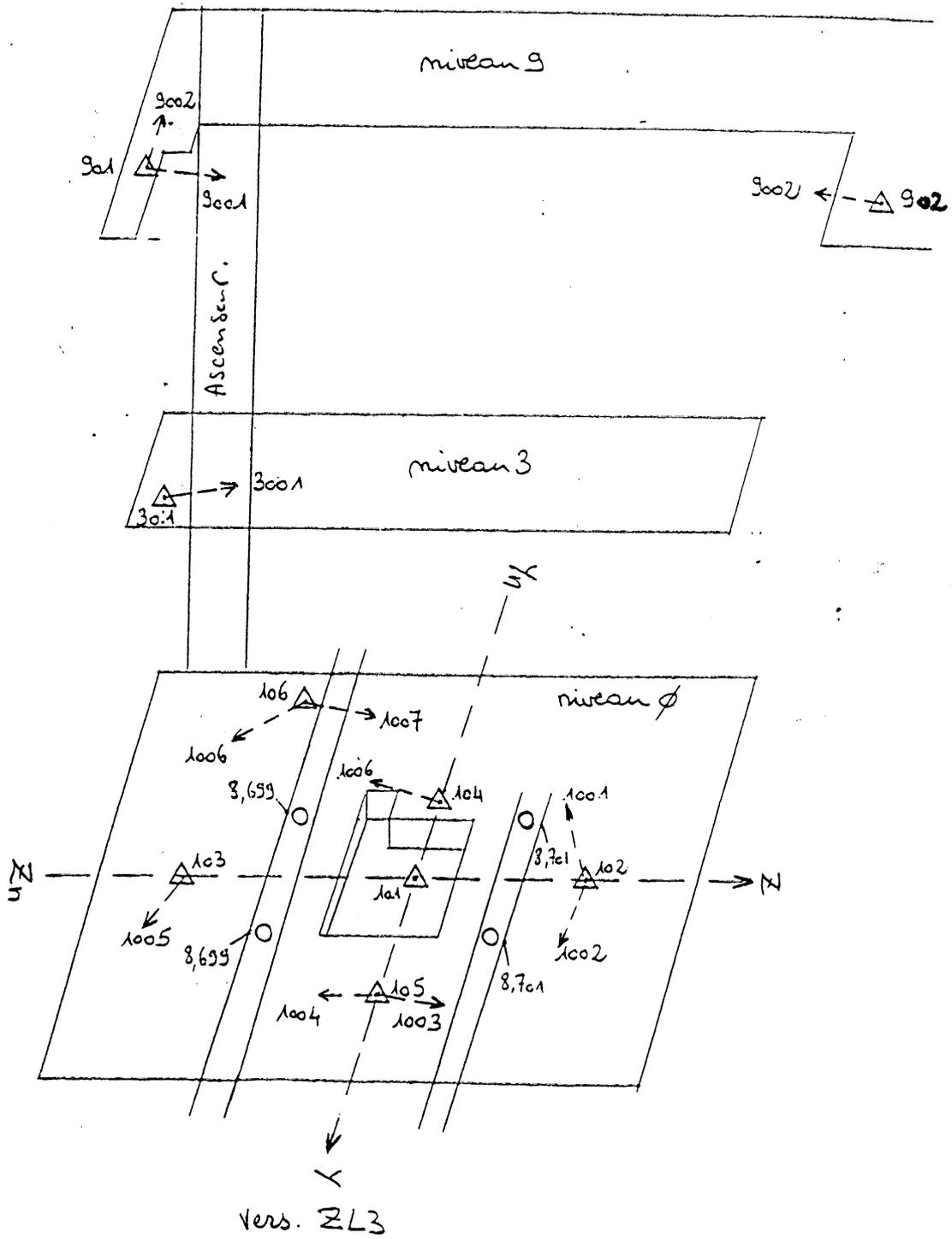
Points de référence du réseau LT BIL



$$\begin{aligned}
 X_{méca} &= Z_{topo} \\
 Y_{méca} &= X_{topo} \\
 Z_{méca} &= Y_{topo}
 \end{aligned}$$

31/08/2012

Annexe 8: Schéma du réseau LT au BIL



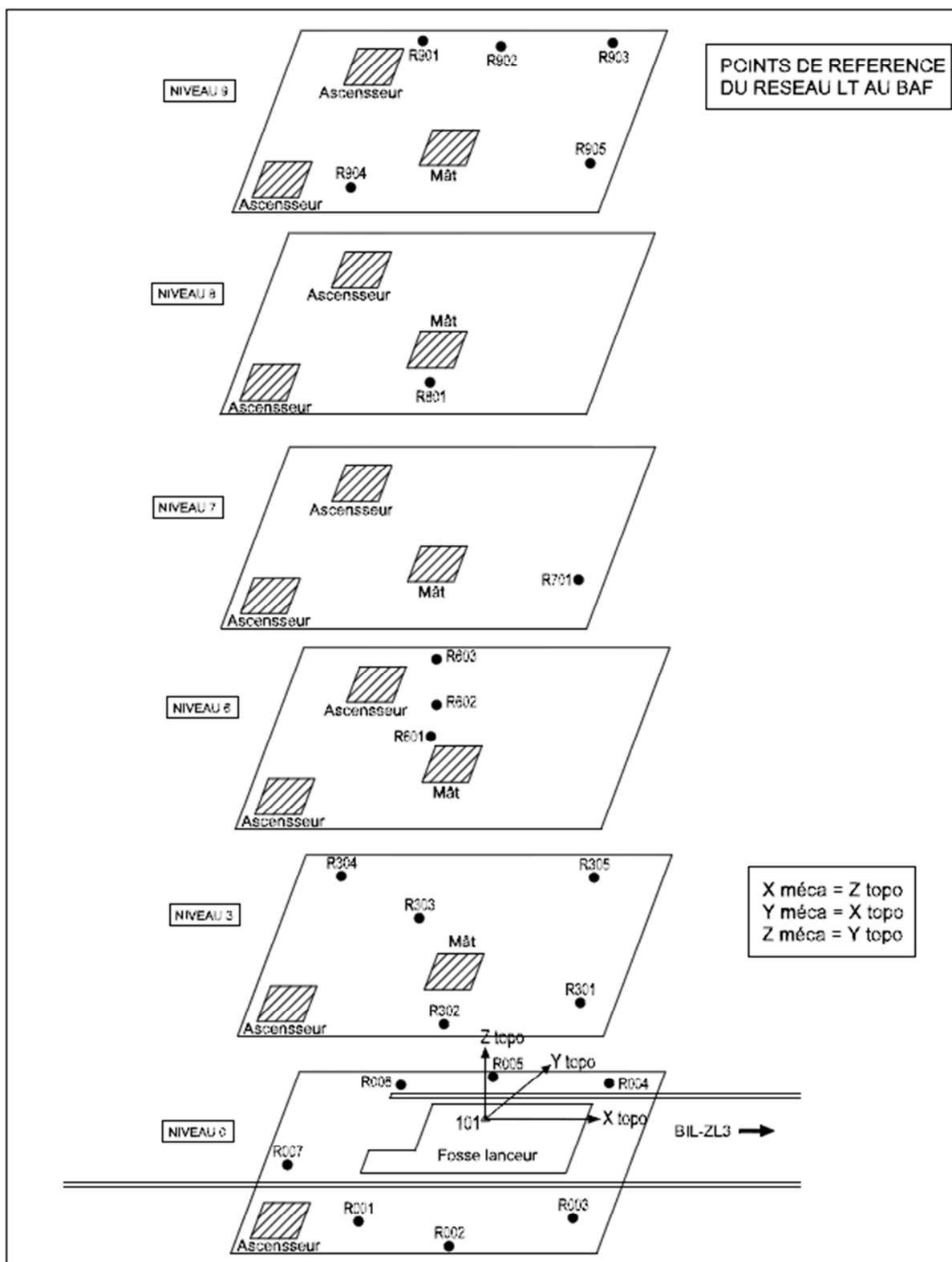
Annexe 9: Schéma du réseau tachéométrique au BAF

Ellipsoïdes d'erreur (à 1 sigma)

	1/2 axe (mm)	Azimut	Site
101	0.3	397.7528	100.0000
	0.0	50.0000	-0.0000
	0.0	150.0000	0.0000
102	0.4	100.5656	-0.5787
	0.2	197.2475	89.0047
	0.2	0.6664	10.9796
104	0.3	10.7887	3.2983
	0.2	126.2059	86.4418
	0.2	110.0975	-13.1391
105	0.3	388.6335	3.4089
	0.2	255.6984	93.1273
	0.1	88.9539	5.9616
103	0.2	99.9993	0.0050
	0.2	399.9612	90.9894
	0.2	400.0000	-9.0108
901	1.7	37.6472	29.1194
	0.9	130.0770	-15.0565
	0.2	202.6560	66.6718
106	0.4	390.2745	3.6452
	0.3	136.4677	94.5140
	0.1	90.0395	-4.0952
301	1.8	42.6856	76.7864
	0.7	145.5440	1.0906
	0.2	45.9598	-23.1856
1001	2.2	371.0475	-0.2571
	2.1	64.9776	97.3052
	0.4	71.0583	-2.6826

1007	1.8	111.9610	0.3652
	1.7	217.7708	95.9930
	0.5	11.9380	3.9902
902	4.3	111.9235	-0.8945
	2.5	15.3783	83.8660
	1.4	11.6922	-16.1082
9001	3.8	116.7423	-5.6138
	3.5	66.2924	92.0259
	1.5	16.2415	-5.6489
3001	4.1	90.8085	38.2734
	3.8	296.3604	61.6131
	0.8	392.5888	-2.5939
1002	1.9	88.1760	5.5726
	1.1	387.8626	3.5654
	0.9	251.7600	93.3793
1003	1.9	14.7064	6.7268
	1.0	114.8934	1.7612
	0.8	231.1321	93.0447
1005	3.7	135.3435	4.8949
	1.2	35.3895	-0.5974
	1.0	343.1004	95.0687
1004	3.7	372.4263	-4.1066
	1.7	72.3770	0.7647
	1.4	360.6688	95.8225
1006	4.6	374.6168	-3.3272
	1.8	74.6077	0.1748
	1.5	371.2627	96.6682
9002	7.3	99.4306	-3.0433
	2.2	0.3081	17.8581
	1.3	188.9798	81.8704

Annexe 10: Extrait du rapport de calcul COMP3D du réseau BAF "tachéomètre" (1997)



Annexe 11: Schéma du réseau LT au BAF



Annexe 12: Photos de l'intérieur du BAF hors présence lanceur

```

clc
clear
format("v",15)

R2012=fscanfMat("R2012.txt");//points réseau LT2012
R2015=fscanfMat("R2015.txt");//points réseau LT2015
taille=size(R2015)
nbpts=taille(1,1)//nombre de points pour la similitude 3D

/--Matrice B
Bx=[]
By=[]
Bz=[]

for i=1:nbpts
    Bx=[Bx;R2015(i,2)-R2012(i,2)]
    By=[By;R2015(i,3)-R2012(i,3)]
    Bz=[Bz;R2015(i,4)-R2012(i,4)]
end

B=[Bx;By;Bz]

/--Matrice A
Ax=[]
Ay=[]
Az=[]
for i=1:nbpts
    Ax=[Ax;1,0,0,0,-R2015(i,4),R2015(i,3),R2015(i,2)]
    Ay=[Ay;0,1,0,R2015(i,4),0,-R2015(i,2),R2015(i,3)]
    Az=[Az;0,0,1,-R2015(i,3),R2015(i,2),0,R2015(i,4)]
end

A=[Ax;Ay;Az]

/--X
N=A'*A

X=inv(N)*A'*B//vecteur solution - Tx, Ty, Tz, Rx, Ry, Rz, k

correct=A*X//résidus

delta=[]//résidus par composante
for i=1:nbpts
    delta=[delta;correct(i,1),correct(nbpts+i,1),correct(2*nbpts+i,1)]
end

nouv2015=[]//coordonnées après similitude 3D
for i=1:nbpts
    nouv2015=[nouv2015;R2015(i,2)-delta(i,1),R2015(i,3)-delta(i,2),R2015(i,4)-
    delta(i,3)]
end

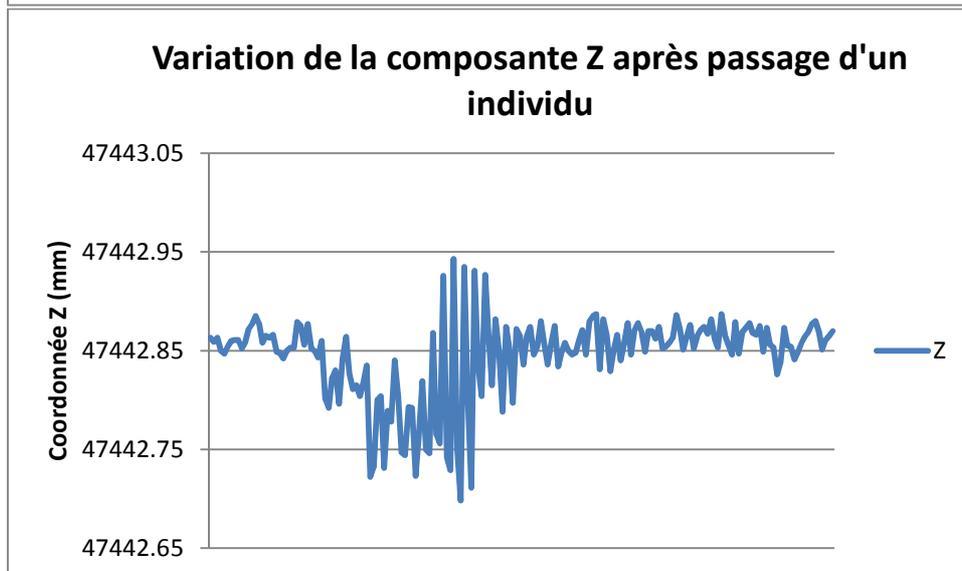
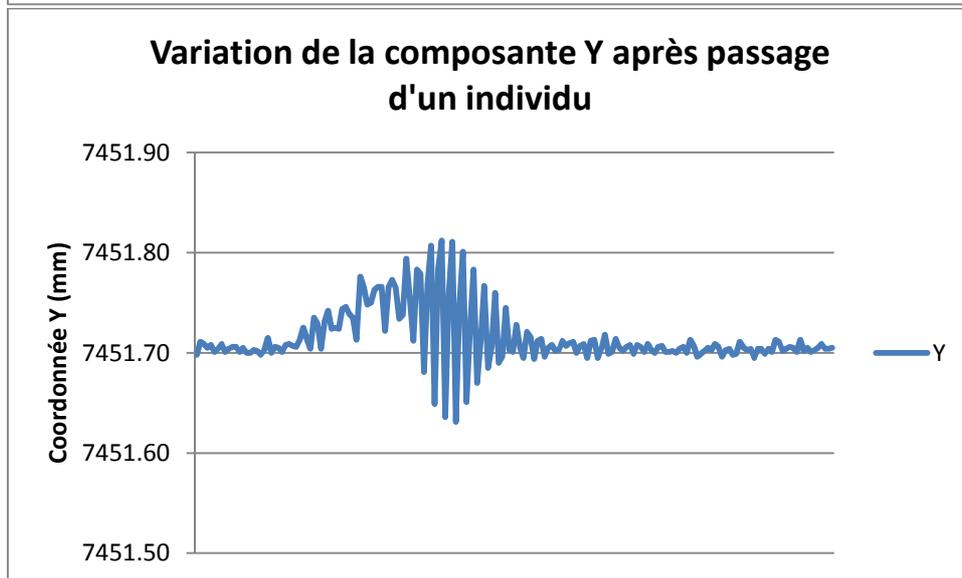
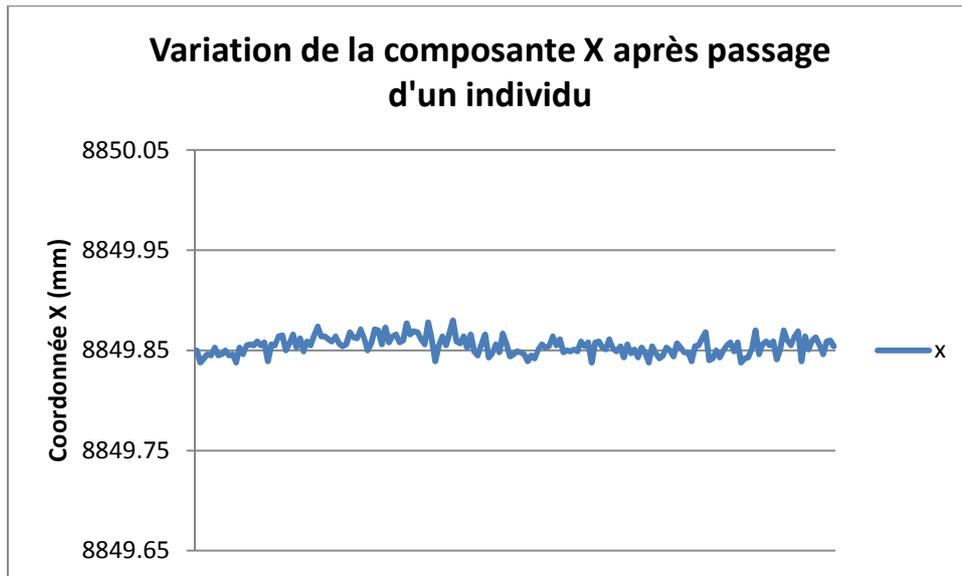
nouv_ecarts=[]//nouveaux écarts
for i=1:nbpts
    nouv_ecarts=[nouv_ecarts;nouv2015(i,1)-R2012(i,2),nouv2015(i,2)-
    R2012(i,3),nouv2015(i,3)-R2012(i,4)]
end

ec3d=[]//écart 3D
for i=1:nbpts
    ec3d=[ec3d;sqrt(nouv_ecarts(i,1)^2+nouv_ecarts(i,2)^2+nouv_ecarts(i,3)^2)]
end

ecarts_points=[R2015(:,1),nouv_ecarts,ec3d]

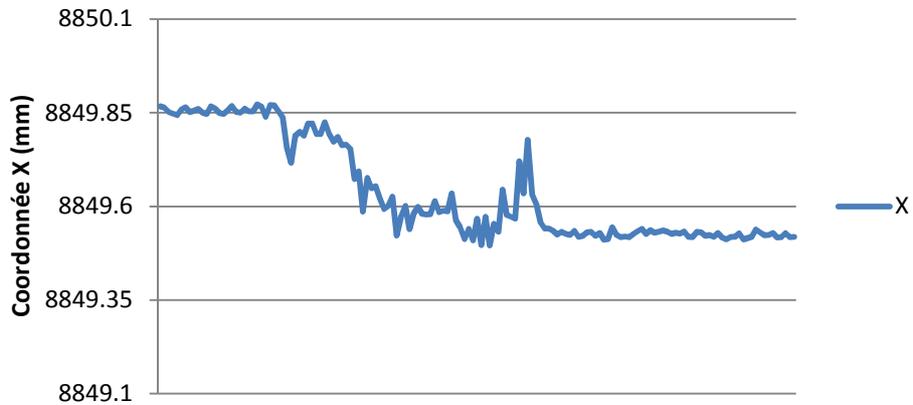
```

Annexe 13: Script de similitude 3D Scilab

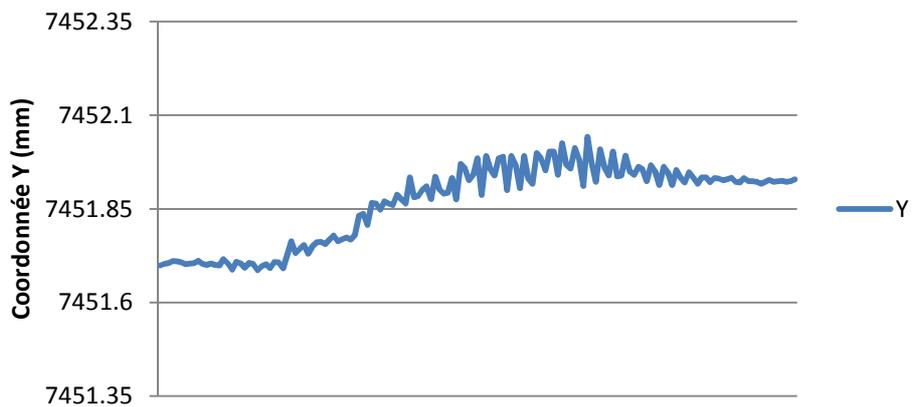


Annexe 14: Évolution des coordonnées d'un point avant, pendant et après le passage d'un individu

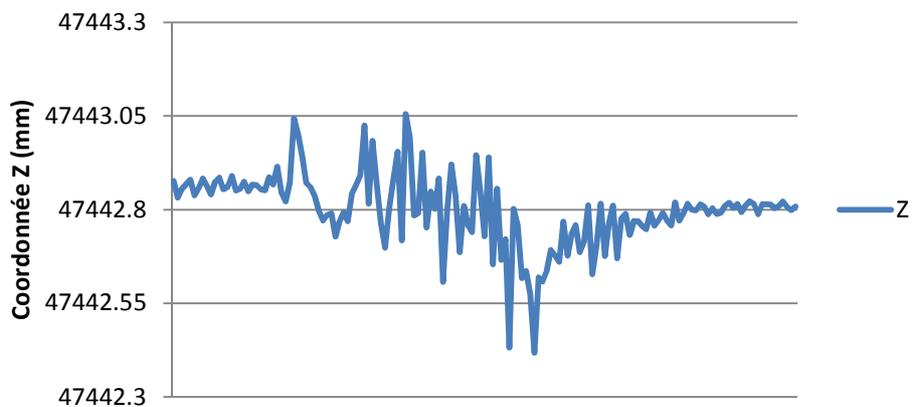
Variation de la composante X après déplacement d'un accès



Variation de la composante Y après déplacement d'un accès

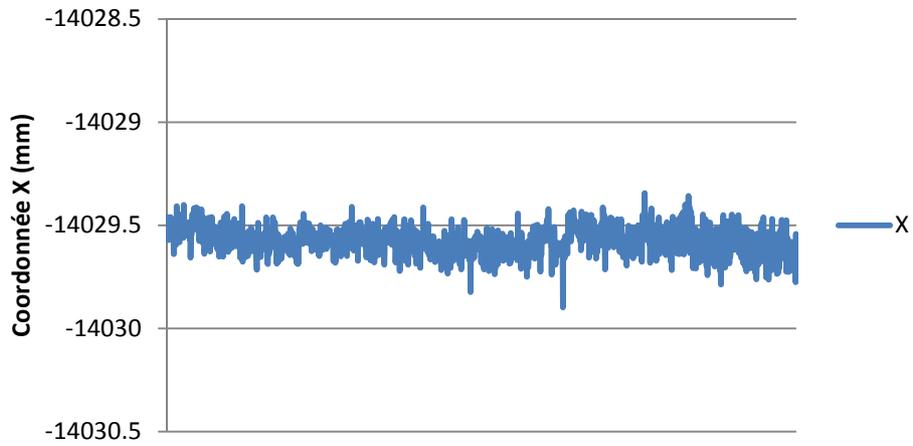


Variation de la composante Z après déplacement d'un accès

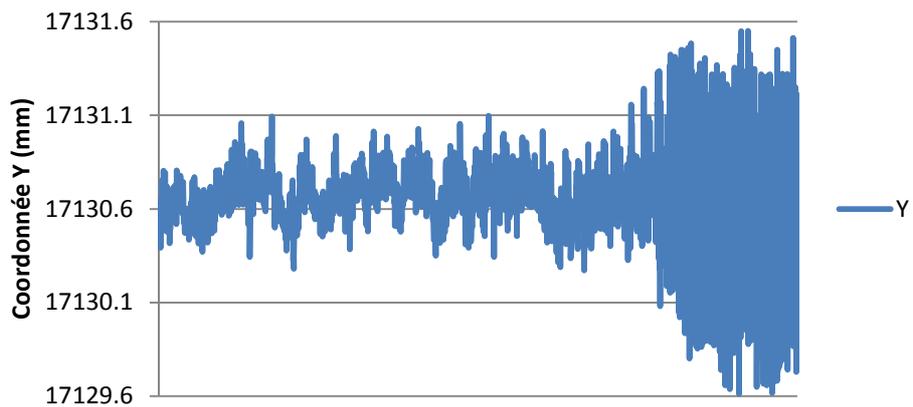


Annexe 15: Évolution des coordonnées d'un point avant, pendant et après le déplacement d'un accès

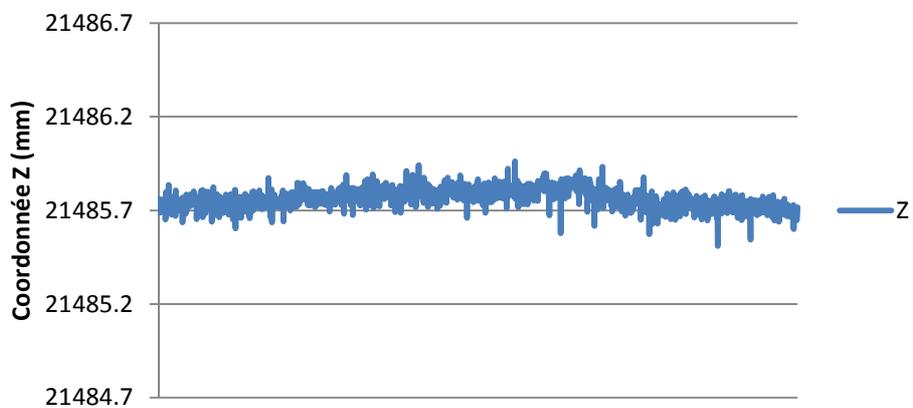
Évolution de la composante X en fonction du temps



Évolution de la composante Y en fonction du temps



Évolution de la composante Z en fonction du temps



Annexe 16: Évolution des coordonnées d'un point lors d'un suivi de 6 heures à une fréquence de 0.1 Hz

Mise en œuvre du Laser Tracker FARO Ion dans le processus des contrôles métrologiques au Centre Spatial Guyanais.

TFE présenté par : M. Julien GUILLOU

Entreprise d'accueil : SATTAS

Société Américaine de Topographie et de
Topographie Appliquée au Spatial



Maître de stage : M. Boureima OUEDRAOGO

Professeur référent : M. José CALI

Président du Jury : Mme Élisabeth SIMONETTO

1 - Contexte

Le Centre Spatial Guyanais, appelé aussi « port spatial de l'Europe », constitue le territoire sur lequel les zones de lancement se trouvent. C'est le CNES³³ qui a la gestion de cette entité foncière, mais c'est Arianespace qui gère le bon déroulement des campagnes de lancement. Ces deux entreprises font appel aux professionnels de la science de la mesure, que sont les géomètres. Les travaux constants sur la base spatiale et, dans les bâtiments accueillant le lanceur Ariane 5, amènent des besoins variés que ce soit en matière de topographie et de métrologie.

La réalité d'enchaînement des campagnes de lancement d'Ariane 5, de Soyouz et de Vega, oblige le service topographique du CSG³⁴ à une réactivité et une disponibilité importantes.

La partie topographie consiste en la mise à jour des plans du CSG, qui représentent une superficie de 790 km². Il s'agit principalement de relever les nouveaux réseaux, d'effectuer du recolement, d'implanter de nouveaux bâtiments... C'est donc grâce à l'utilisation combinée d'appareils de localisation GNSS, de stations totales et de niveaux numériques que le service topographique peut remplir ces missions.

La partie métrologie, quant à elle, repose sur des contrôles dimensionnels, des contrôles géométriques et des contrôles de positionnement. Ces contrôles se déroulent principalement dans les bâtiments accueillant le lanceur Ariane 5 durant son assemblage. Le vieillissement des installations a engendré la multiplication des contrôles métrologiques ces dernières années. Très longtemps effectués au moyen d'un tachéomètre et d'un niveau, ces contrôles sont désormais réalisés, dans la mesure du possible, à l'aide d'un moyen de mesure plus précis, le Laser Tracker FARO Ion.

³³ Centre National d'Études Spatiales

³⁴ Centre Spatial Guyanais

2 – Objectifs

L'utilisation du LT au BIL³⁵ et au BAF³⁶ est imposée par le client Ae³⁷. En effet, FARO propose ce laser de poursuite en garantissant une précision inégalable avec une station totale. En effet, on parle ici d'atteindre une précision radiale de $8 \mu\text{m} + 0.4 \mu\text{m}/\text{m}$ et une précision transversale de $10 \mu\text{m} + 2.5 \mu\text{m}/\text{m}$. Ce moyen de mesure, acquis sans concertation avec le service topographique, souffre cependant d'une lourdeur de mise en place. Le LT est donc en phase de qualification depuis 2012 dans ces deux bâtiments.



Illustration : Laser Tracker Faro Ion

Un réseau de points « LT » a été développé au sein de ces bâtiments, réseau physiquement différent du réseau de points « tachéomètre ». Après avoir pris connaissance des caractéristiques et possibilités du LT, des campagnes de mesure ont été effectuées au BIL et au BAF afin d'une part de vérifier la stabilité du réseau « LT » et de comparer la détermination du réseau « tachéo » avec le LT par rapport à la détermination initiale de ce réseau datant de 1997.

Ces bâtiments présentant une ascension verticale de l'ordre de 60 mètres, les points doivent être répartis aux différents niveaux où ont lieu les opérations. La problématique vient du fait de l'instabilité des plateformes permettant d'accéder et de circuler aux différents niveaux. Va-t-elle à quantifier cette instabilité en simulant un cadre opérationnel lors de la prise de mesure.

Suivant les résultats obtenus, et suivant l'ensemble des critères pouvant affecter les mesures, le choix du matériel à utiliser selon les procédures sera fait, afin d'optimiser les interventions dans un contexte opérationnel réglementé.

3 – Résultats

Les campagnes de mesures réalisées avec le LT ont permis de mettre en évidence certains écarts concernant les réseaux de points, et de comprendre d'où ces écarts pouvaient puiser leur origine.

Une fois les réseaux de points mesurés, la première comparaison a consisté à confronter les coordonnées du réseau LT datant de 2012 à celui venant d'être mesuré. Ressort de cette comparaison, une définition du repère de coordonnées instable, basée sur des éléments présentant des défauts de forme non négligeables, comparés à la précision de l'appareil. Par exemple, pour créer le système de coordonnées, la direction des rails internes aux bâtiments est mesurée, or, des défauts de parallélisme et de linéarité existent. Cette définition ne peut pas être revue pour cause d'utilisation originelle par le client Ae. La solution a été de trouver une transformation euclidienne ou isométrie, conservant donc les longueurs du réseau. La transformation choisie a été une translation d'axe OZ associée à une rotation d'axe OZ. En effet, la similarité a été écartée en partant du principe que le réseau de points présentait une instabilité. C'est donc après avoir déterminé les paramètres de rotation R et, de translation T, puis après les avoir appliqués, que les coordonnées définitives du réseau « LT » ont été arrêtées. Les coordonnées du réseau « tachéo » des deux époques, différent

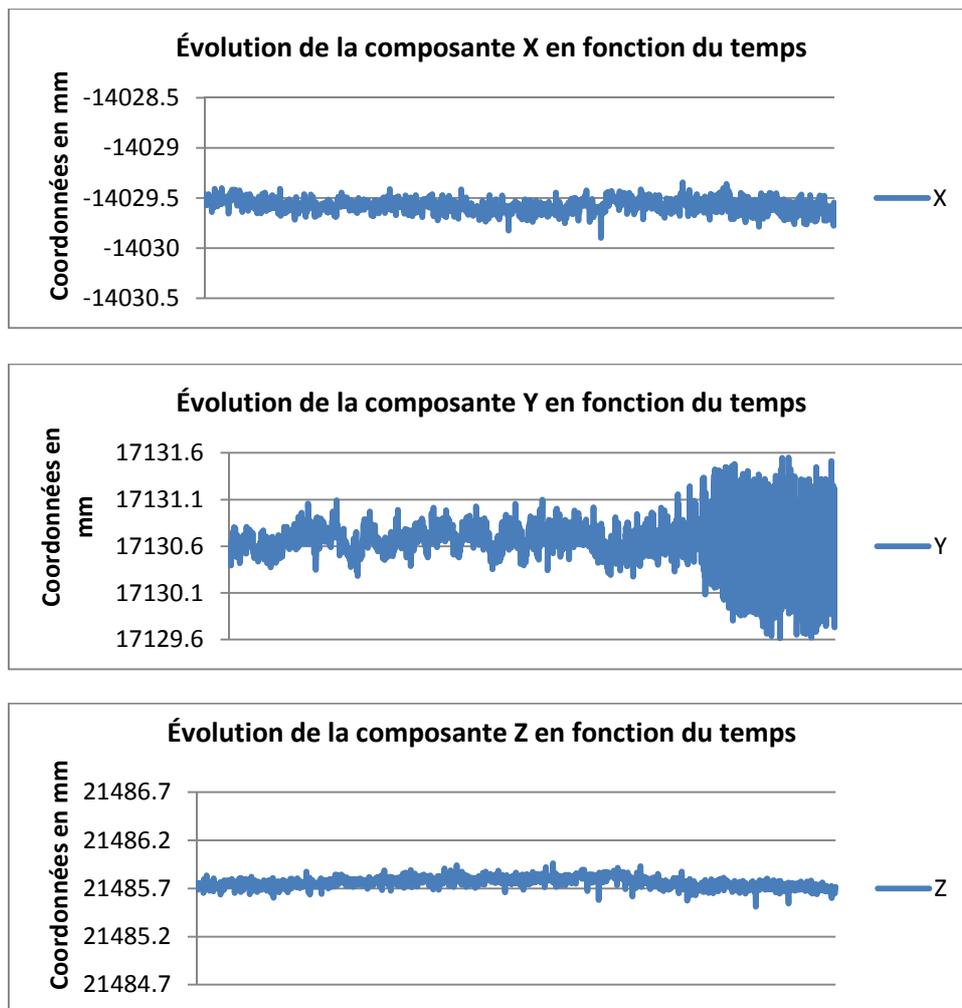
³⁵ Bâtiment d'Intégration Lanceur

³⁶ Bâtiment d'Assemblage Final

³⁷ Arianespace

jusqu'au centimètre au plus haut du réseau. Le rapport de calcul de 1997 va dans le sens de la nouvelle mesure, en associant des ellipses de confiance à ces points pouvant aller jusqu'à 7 mm. Les coordonnées définitives du repère « tachéo » sont finalement figées après application de la transformation calculée avec les points des réseaux « LT » de 2012 et actuels.

C'est cette instabilité, qui, dans un second temps, a été quantifiée grâce à une mesure test. Celle-ci consistait à mesurer en continu un point fixe du réseau, situé à 10 mètres au-dessus du rez-de-chaussée. La période de mesure s'est étalée sur 6 heures, à une fréquence 0.1 Hz soit un point toutes les 10 secondes. Les graphiques situés ci-dessous, rendent compte des résultats de ce test.



Graphiques: Évolution des coordonnées d'un point mesuré en continu pendant 6 heures à une fréquence de 0.1 Hz

En plus de l'instabilité du réseau, c'est la stabilité des plateformes qui est responsable de conditions de mesurage inappropriées pour prétendre faire de la métrologie. En effet, les opérations s'enchaînent et les intervenants se succèdent sur les plateformes qui oscillent sous leur passage et les déplacements d'accès³⁸.

Les effets de ces deux facteurs extérieurs ont donc été également quantifiés.

Le passage d'un individu à proximité de l'appareil provoque des écarts planimétriques et altimétriques de l'ordre de 2 dixièmes de millimètres si l'on mesure au moment même du passage. Cependant, la dérive n'est que temporaire, en effet, après le passage, l'appareil ne bouge pas de

³⁸ Structure mobile en aluminium, permettant d'atteindre les pièces situées en hauteur

position et les coordonnées mesurées avant et après le passage sont identiques à l'incertitude près de l'appareil.

Les déplacements d'accès, quant à eux, sont sources de problème et de déplacement de dispositif³⁹. On s'aperçoit d'un décalage de 0.5 mm en planimétrie contre 0.1 mm en altimétrie.

4 - Apports

Désormais, le réseau « tachéo » est déterminé avec les mesures au LT. Cela permet de garantir une cohérence entre ce réseau et le réseau « LT », car ils sont issus d'une même campagne de mesure.

Le fait d'avoir deux réseaux différents, chacun associé à un moyen de mesure, permet d'anticiper une panne matérielle par exemple, et d'assurer la prestation de mesurage.

Aussi, la mesure en continu sur un point a permis de montrer l'existence de la dilation thermique des piliers des bâtiments à l'échelle d'une journée, et de montrer que les coordonnées des points du réseau, variaient suivant ce modèle de dilation car les cibles et nids magnétiques sont collées dessus. Ce test constitue la preuve à montrer au client Ae pour mettre en avant et annoncer que les incertitudes de mesure vont être élargies.

De plus, la précision absolue des mesures au LT doit être revue, afin de prendre en considération l'ensemble des tests. Auparavant, la précision relative annoncée sur l'ensemble des résultats était de ± 0.05 mm et la précision absolue de ± 0.1 mm. Il convient désormais de calculer cette incertitude absolue en prenant en compte l'écart max 3D (E_{max}) obtenu après recalage sur les nids, une précision constante d'au moins 0.5 mm pour l'instabilité des plateformes, plus la précision relative (σ_{rel}) de chaque mesure.

$$\sigma_{abs} = \sqrt{E_{max}^2 + 0.5^2 + \sigma_{rel}^2}$$

L'ordre de grandeur de cette précision absolue serait le millimètre, soit une incertitude élargie d'un facteur 10 par rapport à la valeur annoncée auparavant. Cette étude aura permis de revoir l'image du LT, vu à l'origine comme un appareil de mesure offrant des résultats au centième de millimètre, sauf qu'en opération sur site, le mieux qui puisse être annoncé est le millimètre.

5 - Conclusion

Le processus des contrôles métrologiques au Centre Spatial Guyanais est inclus dans un cadre réglementé où la mise à jour et la modification de protocoles de mesure se fait après analyses et tests opérationnels. Ainsi, un nombre important de mesures a permis de constater les capacités réelles de l'appareil en conditions opérationnelles. La mise en œuvre du LT au BIL et au BAF est basée sur l'expérience.

Le tachéomètre, du fait de sa portabilité et de son adaptabilité, reste le moyen de mesure le plus complet et celui à considérer pour optimiser les interventions. Cependant, même si son utilisation reste conseillée dans des cas particuliers, on ne peut pas enlever au LT FARO Ion sa facilité de traitement pour des entités géométriques mathématiquement définies, et la visualisation des résultats en temps réel.

Annexe 17: Résumé destinés aux membres du jury

³⁹ Position de l'appareil

GUILLOU Julien - Promotion 2015

Introduction

Le Bâtiment d'Intégration Lanceur (BIL) et le Bâtiment d'Assemblage Final (BAF) sont les deux structures principales qui accueillent le lanceur Ariane 5 avant le tir. C'est dans ces bâtiments qu'ont lieu les **contrôles de revalidation géométrique** de la table de lancement. De nombreuses mesures sont donc réalisées sur celle-ci à l'intérieur de ces bâtiments.

En 2010, l'achat d'un laser de poursuite par Arianespace s'inscrivait dans une **logique d'augmentation de la précision** pour des mesures spécifiques où des coordonnées relatives suffisaient. Actuellement, l'utilisation de cette **machine à mesurer tridimensionnelle** s'est étendue dans le BIL et le BAF où des réseaux de points ont été déterminés en 2012 pour permettre de travailler en absolu. Ainsi, les observations tachéométriques ont laissé leur place aux **mesures par palpage**.

Matériel et objectifs



Laser Tracker FARO Ion

Le Laser Tracker Faro Ion, un **appareil de métrologie dimensionnelle**:

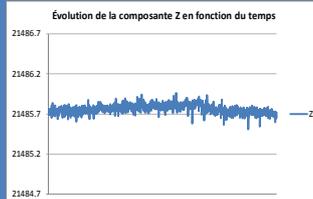
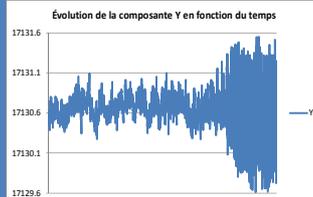
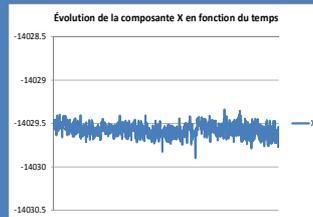
Précision du distancemètre: $8 \mu\text{m} + 0.4 \mu\text{m/m}$

Précision angulaire: $10 \mu\text{m} + 2.5 \mu\text{m/m}$

- **Campagne de revalidation des nids magnétiques au BIL et au BAF** : contrôle de stabilité du réseau de points.
- **Campagne de mesure des cibles utilisées par les tachéomètres**: nouvelle définition du réseau tachéomètre.
- **Stabilité des plateformes des bâtiments**: paramètres externes affectant les mesures.
- **Stabilité de la structure accueillant les réseaux des points**: recherche d'une éventuelle déformation des piliers.
- Éléments tendant à une **utilisation raisonnée du Laser Tracker**.

Résultats

- Des **conditions de mesure inappropriées** pour de la métrologie dimensionnelle:
 - temps accordé
 - instabilité des plateformes
 - simultanéité des opérations et proximité des intervenants
- La **mesure au Laser Tracker** des nids magnétiques du réseau « LT » et du réseau de cibles du tachéomètre:
 - une campagne de mesure rapide
 - la définition du système de coordonnées approximative
- Les réseaux « LT » et « tachéomètre » recalculés:
 - Un EMQ de 2.1 mm entre la détermination du LT de 2012 et de 2015
 - Un EMQ de 5 mm sur les points du tachéomètre



Graphiques 1 à 3: Évolution des coordonnées d'un point lors d'un suivi de 6 heures à une fréquence de 0.1 Hz

- Un réseau mobile au cours de la journée
 - dilatation thermique des piliers
 - des écarts sur Y à ± 1 mm

- **L'utilisation de la nouvelle détermination des réseaux**:
 - Écarts de position de l'ordre du millimètre entre résultats de mesurande du LT et du tachéomètre
- Les **paramètres externes** responsables de la dégradation de la précision:
 - simulation du passage d'une personne à proximité du LT au niveau d'une plateforme → une mesure à ± 0.1 mm
 - simulation du déplacement d'un accès → un dispositif décalé de 0.5 mm après le déplacement
- Le LT à privilégier pour des mesures dans des lieux où **stabilités thermique et mécanique** sont assurées.

Conclusion

- L'incertitude des résultats de mesurande principalement due aux paramètres externes: les spécifications de l'appareil négligeables sur le résultat final.
- Des procédures de mesure à revoir pour cause de tolérances assez larges pour permettre l'utilisation du tachéomètre.
- Le Laser Tracker, utilisé dans de bonnes conditions, un outil pour déterminer géométrie, dimension et position.

Liste des figures

FIGURE 1: HIERARCHIE DES DEMANDEURS D'ACTIVITES	17
FIGURE 2: LOI DE PROBABILITE RECTANGULAIRE	23
FIGURE 3: COMPARAISON DE LA PRECISION TRANSVERSALE ENTRE LE LT ET LE TS30	26
FIGURE 4: COMPARAISON DE LA PRECISION RADIALE ENTRE LE LT ET LE TS30	26
FIGURE 5: COMPARAISON DE LA PRECISION 3D EN FONCTION DE LA DISTANCE POUR UN ANGLE VERTICAL DE 100 GON	27
FIGURE 6: ÉTAPES NECESSAIRES POUR OBTENIR LES CARACTERISTIQUES D'UN CERCLE.....	29
FIGURE 7: CONSEQUENCE D'UN OUBLI DE COMPENSATION DE PALPEUR	29
FIGURE 8: LES DIFFERENTES OPERATIONS EN LIEN AVEC LES PALETTES	36

Liste des illustrations

ILLUSTRATION 1: LA GUYANE, DOM DE LA FRANCE	11
ILLUSTRATION 2: PLAN DE SITUATION DU CENTRE SPATIAL GUYANAIS	11
ILLUSTRATION 3: LOGOS DES ACTEURS PRINCIPAUX.....	11
ILLUSTRATION 4: SCHEMA DU LANCEUR ARIANE 5	12
ILLUSTRATION 5: CHEMINEMENT REALISE PAR UN LANCEUR A5.....	12
ILLUSTRATION 6: SCHEMA DE LA TABLE.....	13
ILLUSTRATION 7: LOGO SATTAS	15
ILLUSTRATION 8 : LASER TRACKER FARO ION	21
ILLUSTRATION 9: SMR DE 1.5", 0.875"ET DE 0.5"	24
ILLUSTRATION 10: SCHEMA RECAPITULATIF DES POSSIBILITES DE CONFORMITE	33
ILLUSTRATION 11: PHOTO VUE DE DESSUS D'UNE PALETTE	34
ILLUSTRATION 12: PHOTO VUE DE COTE D'UNE PALETTE	34
ILLUSTRATION 13: COUPE VERTICALE D'UNE PALETTE EN CONFIGURATION	35
ILLUSTRATION 14: AMENAGEMENT INTERNE DU BIL	40
ILLUSTRATION 15: CIBLE DU RESEAU TACHEOMETRE	41
ILLUSTRATION 16: COUP DE POINTEAU SUR PLATE-FORME	41
ILLUSTRATION 17: NID MAGNETIQUE POUR SMR 1.5"	41
ILLUSTRATION 18: CROQUIS DU REPERE BIL	42
ILLUSTRATION 19: AMENAGEMENT INTERNE DU BAF.....	44
ILLUSTRATION 20: CROQUIS DU REPERE BAF.....	45
ILLUSTRATION 21: DIAGRAMME DE KAORU ISHIKAWA REPRESENTANT LA REGLE DES 5M	53
ILLUSTRATION 22: DEPLACEMENT DU PILIER HEB.....	55

Liste des tableaux

TABLEAU 1: APPAREILS UTILISES PAR LE SERVICE TOPOGRAPHIE	16
TABLEAU 2: PRECISIONS DU LASER TRACKER FARO ION ET DE LA STATION TOTALE LEICA TS30	26
TABLEAU 3: DISPOSITIFS DE MESURE AU BIL.....	43
<i>TABLEAU 4: RECALAGE ALTIMETRIQUE</i>	<i>43</i>
TABLEAU 5: CALCUL DE LA DIRECTION DE L'AXE X	44
TABLEAU 6: RECAPITULATIF DES DEPLACEMENTS DE DISPOSITIF EFFECTUES AU BAF.....	46
TABLEAU 7: ÉCARTS BRUTS CONSTATES DU RESEAU LT AU BIL	49
TABLEAU 8: ÉCARTS BRUTS CONSTATES DU RESEAU LT AU BAF.....	50
TABLEAU 9: TABLEAU 9: ÉCARTS BRUTS CONSTATES RESEAU « TACHEO » AU BIL.....	51
<i>TABLEAU 10: ÉCARTS BRUTS CONSTATES RESEAU « TACHEO » AU BAF.....</i>	<i>51</i>

Mise en œuvre du Laser Tracker FARO Ion dans le processus des contrôles métrologiques au Centre Spatial Guyanais.

MÉMOIRE présenté en vue d'obtenir le **DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM**

Spécialité : **Géomètre et Topographe**

Soutenu par Julien GUILLOU le 9 Juillet 2015

Résumé

Peu connu comme moyen de mesure dans la profession de géomètre, le Laser Tracker, aussi appelé laser de poursuite, est comparée à une Machine à Mesurer Tridimensionnelle portable. Son utilisation est optimisée pour le contrôle de pièces usinées de petite et grande dimensions, jusqu'à quelques mètres. Sa précision supérieure, en comparaison à une station totale, fait qu'on retrouve le Laser Tracker dans les domaines de l'industrie automobile, de l'aéronautique pour effectuer de la métrologie dimensionnelle. La mise en place de cet appareil de mesure par palpation, c'est-à-dire par contact, dans une activité, peut revêtir certaines difficultés à cause d'une certaine lourdeur de mise en place, et d'une philosophie d'approche des mesures différente. Sera développée dans ce mémoire la mise en place du Laser Tracker dans deux bâtiments accueillant le lanceur Ariane5 au Centre Spatial Guyanais, à l'intérieur d'un réseau de points lors d'une campagne de validation. Au terme des mesures, un bilan sera dressé quant à la précision des réseaux du LT et du tachéomètre dans ces bâtiments.

Mots-clefs

Laser Tracker, MMT, métrologie dimensionnelle, mesure par palpation.

Abstract

Little known as means of measure in the profession of surveyor, Laser Tracker is compared to a portable Coordinate Measuring Machine (CMM). Its use is optimized for small and large machined parts, to few meters. Its superior accuracy, in comparative to a total station, makes us find Laser Tracker in the fields of automobile industry, aeronautic to make dimensional metrology. The setting of this measuring instrument by contacts, in an activity, can have some difficulties because of some heaviness of setting, and a different philosophical approach of measures. Will be developed in this memory the setting of Laser Tracker in two buildings hosting the Ariane 5 launcher at the Guyana Space Centre, inside of a network of points during a validation campaign. At the end of the measures, a balance sheet will be dressed for the accuracy of networks of the LT and the tachometer in these buildings.

Key words

Laser Tracker, CMM, dimensional metrology, measure by contacts.