

**CONCEPTION DES MOYENS D'ETALONNAGE
DES INSTRUMENTS DE TOPOMETRIE
PAR SOLDATA-IGN SUR LE SITE DU LASER MEGAJOULE**

Société d'accueil : SolData
PFE présenté par : **Marion LEMELLE**
Directeur (directrice) du PFE : Christophe PERRIN
Correcteurs : Jacques LEDIG – Gilbert FERHAT



Introduction

Depuis la signature du Traité d'Interdiction Complète des Essais Nucléaires (TICE) en 1996, la France a engagé un vaste programme de simulation nucléaire. Le Laser Méga Joule (LMJ) est un élément essentiel de ce programme. Il s'agit d'un immense laboratoire où des tirs de simulations nucléaires sont prévus à partir de 2015.

Le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) de la Direction des Applications Militaires (DAM) est le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre du chantier du LMJ.

En 2006, le groupement SolData-IGN a signé avec le CEA le contrat nommé « Topométrie LMJ ».

Les missions de ce contrat sont :

- La conception et l'installation d'un réseau de points de précision sub-millimétrique au sein du bâtiment du LMJ. La précision exigée par le CEA est selon les zones du bâtiment de $\pm 0,25$ à $\pm 0,05$ mm sur les coordonnées planimétriques et altimétriques des points du réseau.
- Le suivi des déformations du bâtiment.
- De transmettre au CEA l'instrumentation (tachéomètres, lasers trackers) et les références nécessaires (prismes, barres de mise à l'échelle) pour la mesure et le maintien du réseau sub-millimétrique.
- De fournir au CEA les moyens de soutien au produit Topométrie LMJ (contrôle et étalonnage des instruments).
- La conception du commande-contrôle d'ensemble (CCE) qui permet acquisition, traitement, visualisation et archivages des données.

J'ai réalisé mon Projet de Fin d'Etudes (PFE) sur le chantier du LMJ pour l'entreprise SolData. L'objectif de mon PFE était de concevoir les études préliminaires des moyens de soutien spécifiques au produit Topométrie LMJ.

1. Objectifs du PFE

Les moyens de soutien spécifiques sont les moyens de soutien conçus spécialement pour la topométrie du LMJ.

Il s'agit de :

- concevoir un banc d'étalonnage des distancemètres,
- mettre en place des moyens de contrôle spécifique des instruments,
- mettre en place des moyens de contrôle des systèmes mécaniques (barre de mise à l'échelle, dispositif de traversée).

Mon mémoire d'ingénieur est principalement orienté vers la conception du banc d'étalonnage au LMJ.

Pendant mon stage il m'était demandé de réaliser l'étape de Revue de Conception Préliminaire (RCP) des moyens de soutien spécifiques.

Afin de respecter le cadre réglementaire de la gestion documentaire du LMJ cela implique la rédaction des documents suivants :

- la Spécification Techniques des Besoin (STB) Préliminaire des moyens de soutien spécifiques,
- le Plan de Justification de la Définition (PJD) Préliminaire des moyens de soutien spécifiques,
- le Dossier de Définition (DD) Préliminaire des moyens de soutien spécifiques,
- le Dossier Justificatif de la Définition (DJD) Préliminaire des moyens de soutien spécifiques.

En résumé, il s'agit :

- STB : d'exprimer des performances techniques attendues du banc d'étalonnage,
- DD : de définir et décrire le banc d'étalonnage,
- PJD/DJD : de justifier la définition au regard des exigences techniques de la STB.

La rédaction et le contenu de ces documents est réglementée par la Recommandation Générale de l'Aéronautique 000 40¹.

2. Etat de l'art : Pourquoi un banc d'étalonnage ?

Dans le domaine de la métrologie, on cherche souvent à atteindre des précisions inférieures au millimètre. Pour la détermination du réseau-sub-millimétrique, c'est l'erreur du distancemètre qui dégrade la précision des mesures. Dans ce cas, il devient indispensable de connaître les erreurs instrumentales systématiques du distancemètre. L'instrument à étalonner est principalement le tachéomètre Leica TCA 2003. Il est aussi prévu d'utiliser le banc pour contrôler les lasers de poursuite² Leica LTD640 et API3.

Les erreurs systématiques du distancemètre qui peuvent être déterminées sur un banc d'étalonnage sont : l'erreur de la constante d'anallatisme et l'erreur cyclique.

Erreur de la constante d'anallatisme :

L'erreur de la constante d'anallatisme est la même pour un couple prisme-instrument. Elle est due au décalage entre les centres de phases du distancemètre et du réflecteur.

Pour le tachéomètre TCA 2003 avec le prisme swoxed, cette erreur est d'environ : $c \approx 35,2$ mm.

Erreur cyclique de phase :

L'erreur cyclique est une erreur périodique de la distance mesurée. Elle est due à des défauts d'isolation entre la zone d'émission et de réception de l'instrument. Comme l'état électrique de l'appareil se répète toutes les demi-longueurs d'onde de modulation, l'erreur cyclique de phase se produit avec la même périodicité. L'amplitude crête à crête de l'erreur cyclique varie entre 0,5 et 1,5 mm pour le TCA 2003.

Pour déterminer ces deux erreurs, il faut comparer les distances provenant du distancemètre avec des distances « vraies ». Ces distances « vraies » sont mesurées par un interféromètre. L'interféromètre émet un laser He-Ne ($\lambda = 633$ nm) et donne des distances relatives avec une précision de $\pm 0,4$ $\mu\text{m/m}$. Pour que ces distances relatives puissent être mesurées, il faut impérativement que le réflecteur de l'interféromètre soit placé dans l'alignement du laser, la tolérance d'alignement est environ ± 2 mm.

La formule de l'erreur cyclique de l'instrument est modélisée à partir des écarts de distances par une série de Fourier. La série de Fourier permet de « retrouver » une fonction à l'aide d'une suite de coefficients. En conséquence, la comparaison des distances doit impérativement être réalisée sur une plage de mesure étendue afin que les coefficients de Fourier soient représentatifs.

La solution proposée pour détecter les erreurs systématiques du distancemètre est donc le banc d'étalonnage. A l'heure actuelle, il existe seulement deux bancs d'étalonnage des distancemètres électroniques en France : celui de l'ESGT³ et celui de l'ESRF⁴.

¹ RG Aéro 00040 : Définit les spécifications de management de programme dans l'industrie

² Instrument de mesure muni d'un interféromètre et d'un distancemètre capable de poursuivre le prisme lorsque celui-ci est déplacé à la main. Il permet de déterminer la position d'un point en 3D avec une précision de ± 10 $\mu\text{m} + 5$ ppm.

³ ESGT : Ecole Supérieur des Géomètres Topographes

3. Concept nouveau : un banc d'étalonnage au LMJ

✓ Exigences du CEA

Les exigences du CEA sont citées dans la STB⁵ de référence du contrat « Topométrie LMJ ». Pour le banc d'étalonnage, il y est écrit :

« Il sera nécessaire de disposer dans l'installation d'un banc d'étalonnage répondant aux exigences techniques de l'accréditation COFRAC, permettant d'étalonner les télémètres sur la distance la plus longue à mesurer, en corrigeant l'effet des gradients environnementaux. »

Afin de répondre correctement au besoin du client, l'analyse de la faisabilité de ces exigences est une étape indispensable.

✓ Le COFRAC (COMITÉ FRANÇAIS d'ACCREDITATION)

Le COFRAC est une association sans but lucratif créée en 1994 et régie par la loi de 1901.

Le but du COFRAC est de créer un système compatible aux pratiques européennes et internationales en termes d'accréditation des opérateurs de l'attestation de conformité.

Pour être accrédité COFRAC, le banc d'étalonnage doit répondre à des exigences techniques concernant : le personnel, les conditions climatiques du local, l'incertitude de mesure, la traçabilité des résultats, etc.

En fonction des exigences du CEA et du COFRAC, nous avons réalisé des choix de concept pour le banc du LMJ puis retenu le concept suivant.

✓ Concept retenu

L'interféromètre étalon et le distancemètre sont placés à chaque extrémité du banc. Les prismes de ces deux instruments sont fixés sur un chariot qui se déplace le long d'un rail. Les conditions climatiques du laboratoire doivent être connues, des stations météorologiques sont placées à proximité des instruments et des prismes. L'image suivante présente le déroulement des mesures sur le banc d'étalonnage.

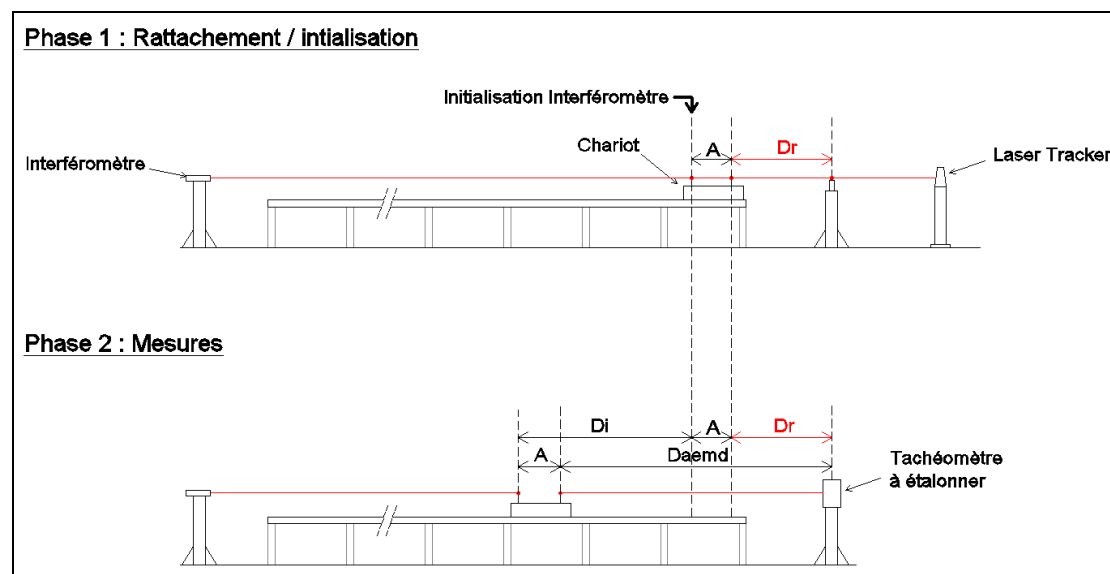


Figure 1 : Concept du banc d'étalonnage

Avec D_i : Distance interférométrique, c'est une distance relative entre deux positions du chariot,
 D_r : Distance de rattachement entre l'axe du tachéomètre à étalonner et la position initiale du chariot,
 D_{aemd} : Distance mesurée par le distancemètre = l'Appareil Electronique de Mesure de Distance (AEMD)

⁴ ESRF : European Synchrotron Radiation Facility / Accélérateur de Particules situé dans la région de Grenoble

⁵ STB de Topométrie LMJ : Document rédigé par le CEA qui regroupe les exigences techniques du CEA pour les missions du contrat « Topométrie LMJ ». C'est un document différent de la STB des Moyens de Soutien Spécifique que j'ai rédigée.

A : Distance entre les prismes, c'est une constante.

La distance de rattachement est mesurée par le laser tracker. L'étalonnage est réalisé pour un couple prisme/instrument (à cause de la constante d'anallatisme). Le chariot se déplace d'un pas de 10 cm, les mesures sont prises simultanément à chaque arrêt du chariot.

L'interface homme-machine du banc est gérée le logiciel GW ETALONNAGE qui permet :

- le pilotage du chariot, du distancemètre et de l'interféromètre
- l'acquisition et le stockage des données du distancemètre, de l'interféromètre et de la station météorologique.

Une fois corrigée des corrections climatiques, on calcule les écarts entre les distances par la formule :

$$E_{aemd} = \Delta D = (D_r + D_i) - D_{aemd}$$

L'étape suivante est de modéliser une courbe par une série de Fourier qui permet de retrouver les paramètres de la fonction d'étalonnage. La fonction de la courbe d'étalonnage, C_e est de la forme :

$$C_e = c + \underbrace{\sum_{i=1}^{\infty} \left[x_i \sin \left(\frac{2\pi d}{\lambda_m / 2_i} \right) + \sum_{i=1}^{\infty} \left[y_i \cos \left(\frac{2\pi d}{\lambda_m / 2_i} \right) \right] \right]}_{\text{Erreur cyclique}}$$

Constante d'anallatisme

Une fois le concept retenu, j'ai établi une analyse préliminaire sur l'incertitude du banc d'étalonnage.

4. Incertitude d'étalonnage

Afin de répondre aux exigences de l'accréditation COFRAC, il faut déterminer l'incertitude d'étalonnage du banc en suivant le processus indiqué par la norme ISO-17025. Les étapes de ce processus sont :

- La définition du mesurande, l'analyse du processus de mesure et la détermination du modèle mathématiques.
- L'estimation des incertitudes-types.
- L'estimation de l'incertitude composée.
- L'expression du résultat final.

Après avoir appliqué ces étapes, j'ai estimé une incertitude théorique d'étalonnage pour le futur banc du LMJ, dont le résultat est :

$$I = \pm 0,95 \text{ ppm}$$

Cette valeur est faible mais elle est théorique, elle sera affinée en retour d'expérience du banc par :

- l'estimation d'incertitude de type A⁶,
- une meilleure connaissance des précisions de mesures de l'interféromètre et du laser tracker,
- une connaissance des évolutions de la structure du banc (dilatation du rail, des piliers, etc.)

5. Résultats

Les résultats obtenus au terme de mon projet de fin d'étude sont :

- La STB des moyens de soutien spécifiques qui indique la performance attendue du banc.
- Le DD-DJD qui regroupe les descriptions et les plans des constituants du banc (rail, chariot, pilier, interféromètre, etc.) et leurs justifications.
- Des notes techniques qui accompagnent le DD-DJD concernant : les choix de concept des constituants, l'incertitude d'étalonnage.

Conclusion

Une fois que le CEA aura validé les études préliminaires, la prochaine étape est l'étude de conception détaillée, en parallèle il faut développer le logiciel GW ETALONNAGE.

Ce banc d'étalonnage est prévu pour 30 ans, au cours de ces années, il faudra prévoir des évolutions du banc en fonction des avancées technologiques des instruments.

⁶ Evaluations fondées sur des répétitions de mesure