

Le métrologue et le topomètre

■ Alain MARTIN-RABAUD

Confronté depuis des années à l'intervention en milieu industriel avec des moyens issus de la géodésie, il m'a semblé intéressant d'avancer des explications au paradoxe suivant : comment, à partir d'une démarche qui semble les opposer, le métrologue et le topomètre peuvent-ils garantir et obtenir un niveau de fiabilité de leurs mesures aussi proche ? Nous tenterons dans cet article de mieux comprendre ces approches et d'en tirer quelques conclusions simples.

■ mots clés

métrologie, topométrie, fiabilité, incertitude, cahier des charges, mesure 3D

Quelques définitions

En consultant un dictionnaire, on découvre que la métrologie est la "science de la mesure". Peut-on se contenter de cette définition, très concise et donc forcément peu compréhensible.

Aimé Defix, professeur de métrologie à l'École Supérieure de Métrologie, définissait la métrologie comme étant "la recherche infinie d'une vérité insaisissable". Cette définition a l'avantage d'être très réaliste puisque le métrologue ne peut connaître avec certitude quelle est la valeur vraie de la grandeur qu'il mesure.

■ Deux citations permettent de préciser dans quel contexte se situe le travail du métrologue :

"Mesurer, c'est comparer une grandeur physique inconnue avec une grandeur de même nature prise comme référence, à l'aide d'un instrument. C'est exprimer le résultat de cette comparaison à l'aide d'une valeur numérique, associée à une unité qui rappelle la nature de la référence, et assortie d'une incertitude qui dépend à la fois des qualités de l'expérience effectuée et de la connaissance que l'on a de la référence et de ses conditions d'utilisation.

Les méthodes et conventions qui régissent la définition, l'évaluation et l'expression des résultats de mesure, unités et incertitudes sont partie intégrante du langage commun, à vocation universelle, de la métrologie"⁽¹⁾

"Chacun reçoit ou transmet quotidiennement des résultats de mesures : l'heure, la température extérieure, la vitesse de la voiture, le bruit dans la ville, l'indice de la qualité de l'air, etc. Tous ces chiffres donnent une impression de certitude, et pourtant aucune mesure n'est rigoureusement exacte. La métrologie propose les méthodes et les moyens d'y voir plus clair. Dans une société technologique, maîtriser la mesure est essentiel. Dans une société de communication, comprendre la mesure est fondamental. Dans une société de plus en plus concurrentielle, réglementer par la mesure est devenu vital."⁽²⁾

La référence du métrologue doit être le Vocabulaire International de la Métrologie (VIM)⁽³⁾. On y trouve la définition des différents termes utilisés dans ce métier : mesurage, mesurande, exactitude d'un instrument, répétabilité et reproductibilité d'une mesure, calibrage, ajustage, réglage, étalonnage, résolution, justesse, fidélité.

Curieusement pour le néophyte, le terme de précision y est banni, parce qu'il n'est pas assez... précis pour différencier l'exactitude d'un instrument, l'incertitude d'un mesurage ou la résolution d'un afficheur... De ce fait, nous n'utiliserons plus ce mot dans la suite de cet article.

■ La topométrie semble un mot moins courant. En voici deux définitions :

"Ensemble des travaux effectués pour procéder aux relevés métriques nécessaires à l'établissement d'une carte."⁽⁴⁾

"La topométrie :

1. phase d'un lever topographique ou d'une implantation qui fournit ou utilise les valeurs numériques de tous les éléments planimétriques et altimétriques
2. technique de lever ou d'implantation à grande ou très grande échelle"
⁽⁵⁾

Mais les lecteurs de XYZ sont certainement plus coutumiers de ce terme que de la métrologie.

Approche métrologique d'une prestation de mesure

La difficulté d'une prestation de mesure se situe au niveau de la maîtrise de l'ensemble des éléments qui permettent de garantir en même temps une réponse pertinente au besoin du prescripteur de la mesure et le niveau d'incertitude requis.

L'approche métrologique de la mesure doit idéalement s'appuyer sur la norme NF EN ISO 9001:2000. Nous en décrivons ici une version plus personnelle, mais réaliste puisque fondée sur une pratique régulière depuis de nombreuses années.

(1) Marc Himbert du CNAM.

(2) *Quelle place pour la métrologie en France à l'aube du XX^e siècle ?*, Rapport commun Académie des sciences-CADAS, Avril 1996.

(3) Vocabulaire International de la Métrologie, intégré dans la norme NFX 07-001 de 1994

(4) Institut de topométrie (Topogr. 1980)

(5) Lexique topographique de l'AFT (1991)

■ ■ ■ Une prestation de mesure débute par la rédaction d'un **cahier des charges**, effectuée logiquement par le prescripteur des mesures.

Ce cahier des charges doit être rédigé en indiquant prioritairement les fonctions à assurer et les contraintes. Les fonctions concernent bien évidemment la définition de ce qui est à mesurer ou à régler : en effet, la plupart du temps, une prestation de mesure n'a pas pour finalité d'éditer un tableau de résultats, mais elle sert à qualifier un appareil (prestation de contrôle) ou à donner des valeurs qui seront utilisées pour modifier l'appareil (prestation de réglage).

De ce fait, le prescripteur de la mesure doit préciser les critères d'acceptation de la mesure, exprimés sous différentes formes : incertitude sur les éléments à mesurer, tolérance sur la cote fonctionnelle ou le positionnement...

Les critères qu'il définira dans ce cahier des charges lui serviront à déclarer la conformité du résultat de la mesure. On voit ici l'importance, tant pour le prescripteur que pour le métrologue de définir ces critères de manière acceptable pour tous. Le contrat passé ensuite entre les deux parties sera validé par le respect de ces critères. D'une manière générale, le besoin exprimé par le prescripteur est rare-

ment suffisant pour celui qui réalise la mesure : il est très souvent nécessaire d'éclaircir un grand nombre de points que le métrologue doit obtenir soit en demandant des informations complémentaires au prescripteur, soit en analysant lui-même le travail à réaliser. La compréhension de ce cahier des charges se traduit donc par une **spécification de mesure**.

Que doit-elle contenir ? Bien évidemment, c'est le document de réponse du cahier des charges, donc il s'agit d'un document démontrant la bonne interprétation du problème posé, collectant toutes les informations supplémentaires acquises pendant l'analyse du cahier des charges et donnant celles relatives aux instruments utilisés (type, exactitude, étalonnage), à la démarche de mesure utilisée (séquencement des opérations) et à la partie planification (c'est particulièrement essentiel si la mesure intervient dans un cycle de travaux ou de production, afin que le prescripteur puisse s'assurer de l'absence de gêne dans les travaux de mesure par des obstacles, des appareils générant des vibrations...).

Elle doit bien entendu contenir tous les points de contrôle qui permettront à l'opérateur et/ou superviseur (souvent c'est la même personne) de garantir que

le résultat final sera atteint, tant en terme de capacité à l'obtenir qu'au respect des incertitudes visées. Cette justification s'appuiera sur un calcul d'incertitude prévisionnel qui prendra en compte les différents paramètres : les caractéristiques des instruments utilisés, les conditions de mesure (environnement, pièce...), la méthodologie employée pour aboutir aux caractéristiques calculées...

Il est essentiel que cette spécification soit soumise au prescripteur pour s'entendre sur le contenu de la prestation et ses attendus. C'est une réponse au cahier des charges qui permet, préalablement à la mesure, de vérifier que tous les éléments de base de la prestation ont bien été identifiés, que les méthodes proposées sont bien en conformité avec les attentes du prescripteur, que le déroulement de la prestation ne peut dégrader la qualité des résultats attendus...

Cette spécification peut servir ensuite de base au rapport de mesure final. Elle servira aussi à écrire les gammes de mesure, qui sont les fiches de travail que l'opérateur qui réalisera la mesure utilisera sur le terrain.

A partir de cette description de la méthodologie, comment le métrologue doit-il organiser son travail pour être en conformité avec cette démarche ?

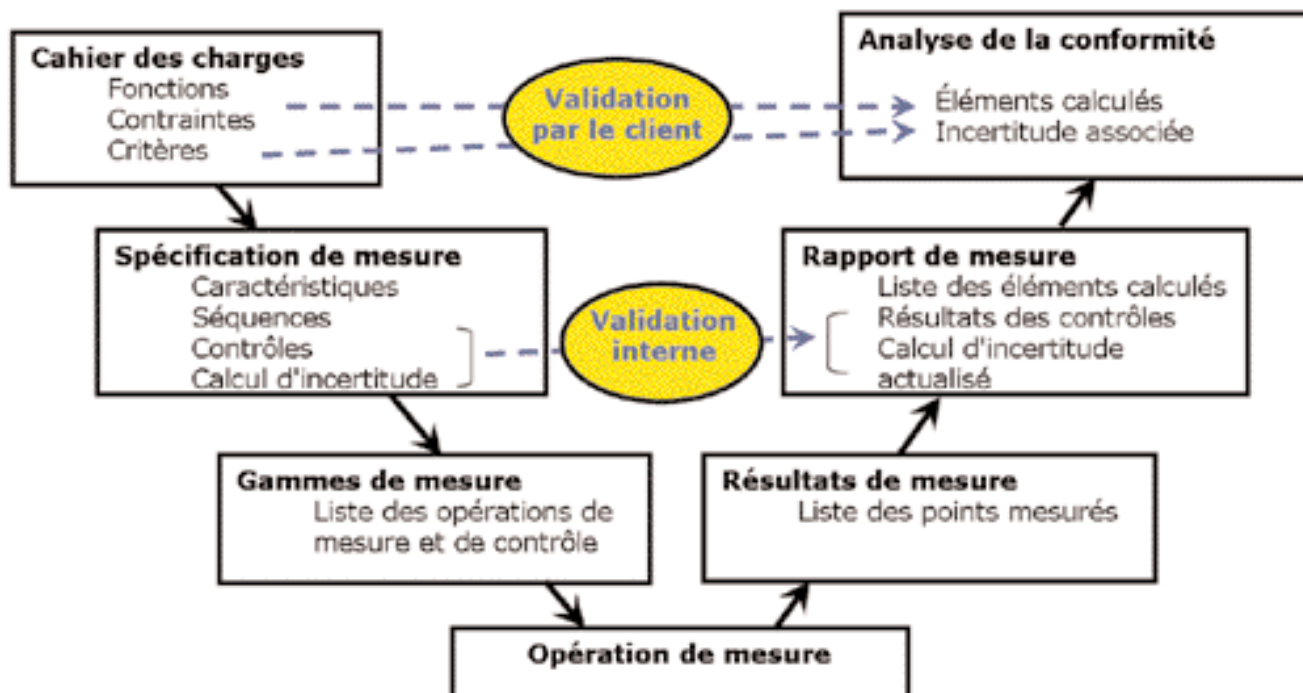


Figure 1 : schéma de la démarche métrologique d'une prestation de mesure

Il faut considérer les trois étapes de la prestation : la préparation, la prestation proprement dite et le rendu des résultats.

La préparation de la prestation de mesure

Le métrologue, après avoir identifié le besoin du prescripteur et s'être accordé avec lui sur la méthodologie, doit collecter tous les éléments nécessaires à la prestation :

- Établir le bilan prévisionnel d'incertitude (calcul d'incertitude) des éléments à déterminer (résultats des calculs et traitements des données) et en déduire les incertitudes nécessaires sur les points de mesure, les exigences sur les moyens de mesure et sur les outillages nécessaires, tous les points de contrôle qui permettront, pendant le déroulement de la prestation, de s'assurer que l'incertitude finale sera bien obtenue, les critères qui permettront de valider ces contrôles et d'envisager les actions correctives, dans le cas où ces critères ne sont pas respectés
- Définir précisément les moyens nécessaires et s'assurer qu'ils répondent aux exigences requises : exactitude des instruments de mesure, étalonnage et vérification si nécessaire
- Rédiger les gammes de mesure et de contrôle

La prestation de mesure proprement dite

Avec une telle préparation, il est évident que la prestation de mesure est très guidée et ne peut pas donner lieu à des dérives importantes, hormis bien entendu les imprévus inhérents à ce type d'activité. La démarche du métrologue a pour but de réduire le risque d'imprévus à un niveau le plus faible possible et si possible à proposer a priori des solutions à ces imprévus.

Cette démarche a pour avantage supplémentaire de permettre, tant au prestataire qu'au prescripteur, de connaître à tout moment le niveau d'incertitude réel de chaque étape et donc de réajuster le niveau d'incertitude final. Ceci

permet de vérifier que le niveau requis sera atteint en final et le plus souvent amélioré. Ensemble, si des contraintes supplémentaires apparaissent (les imprévus), ils pourront prendre la décision la plus adaptée en fonction des objectifs finaux.

Le rendu des résultats

Compte tenu du niveau de préparation, ce travail ne doit être qu'une collecte des données, le traitement de celles-ci pour obtenir les résultats attendus, une mise à jour du calcul d'incertitude et l'édition du rapport final.

Le prestataire mettra en évidence de cette manière la qualité obtenue et la conformité des résultats à l'attente initiale, tant sur l'aspect mesure que sur le niveau de l'incertitude obtenu.

En final, le prescripteur jugera ce compte rendu par rapport aux fonctions et aux exigences définies dans son cahier des charges initial.

On voit bien au travers de ce descriptif que le travail initial d'accord entre le prescripteur et le prestataire ainsi que la préparation de la mesure sont la clé de voûte de cette démarche.

■ Est-ce réaliste ? Peut-on imaginer s'en passer ?

Comme M. Jourdain faisait de la prose sans le savoir, la plupart des prestataires de mesure pratiquent cette démarche. A moins d'un amour immodéré pour l'improvisation et d'un certain goût du risque, chaque prestataire peut témoigner d'avoir recherché l'accord avec son prescripteur sur le contenu du cahier des charges, chaque prescripteur peut témoigner d'avoir écrit un cahier des charges, aussi réduit soit-il, en incluant autant les éléments qu'il souhaite obtenir (les fonctions), qu'en définissant les contraintes et les critères de satisfaction des résultats obtenus.

Évidemment, ces cahiers des charges ne sont pas toujours conformes aux normes en vigueur, bien entendu aussi, le prestataire omet souvent les aspects de justification des incertitudes, les points de contrôle... Mais chacun assure une grande partie de cette démarche.

Quelle est la différence entre l'approche du métrologue et celle du topomètre ?

Malgré de grandes similitudes, les deux concepts sont souvent opposés. Et pourtant personne ne doute du sérieux et du professionnalisme de ces deux métiers. Quelles sont alors les différences et faut-il les opposer ?

La topométrie repose sur une approche plus globale dans le sens où les méthodes pratiquées sont supposées établies et donc qualifiées par la pratique. Elle repose aussi sur le principe que l'instrument n'est pas exact et que c'est par une redondance des mesures, voire des moyens, que l'on peut s'assurer de la qualité du résultat.

De ce fait, l'approche d'une prestation de mesure est très différente au départ : le topomètre préférera augmenter le nombre de points de mesure, utiliser différents moyens de mesure, réaliser des répétabilités pour garantir en final l'incertitude recherchée. L'instrument n'étant pas considéré comme exempt d'imperfections, le topographe effectuera des opérations systématiques de double retournement sur les théodolites, par exemple, pour éliminer la majeure partie des défauts géométriques de l'appareil. Associer aux mesures issues des tachéomètres ou des relevés GPS des mesures de nivellement, des relevés au décamètre ou au distancemètre, par exemple, permet d'augmenter la fiabilité du résultat final, sans pour autant améliorer le niveau d'incertitude de la mesure élémentaire : le calcul global des mesures qui permet d'identifier les écarts sur les points et de décider de supprimer les données peu fiables ou sources d'erreur sur le modèle 3D final. De ce fait, la qualité du résultat final sera garantie par cette approche globale.

On voit ici des approches très différentes : le métrologue recherche a priori à garantir le résultat final, le topomètre se donne les moyens de garantir a posteriori ces résultats.

■ Pourquoi une telle différence ?

Le topomètre, issu du monde de la géodésie, travaille la plupart du temps sur

- des activités qui ne se répètent pas, du fait que, même si la prestation est identique, la configuration locale est très différente: relever le profil d'une route est toujours identique, sauf que les routes ne sont jamais les mêmes, les appareils ne seront pas placés de la même manière, les points relevés seront différents...

Le métrologue, qui intervient la plupart du temps dans un processus de fabrication, se trouve confronté à des opérations répétitives où le principe de base, c'est de libérer très rapidement le produit contrôlé. De ce fait, il est important pour lui et pour son prescripteur, de réduire le temps entre le moment où la mesure a été réalisée et le résultat attendu (conformité du produit ou élément de réglage à fournir).

En résumé, en utilisant une métaphore, si un topomètre doit traverser une rivière à l'aide d'un pont en corde, il s'assurera que tous les éléments de sécurité (corde tendu au dessus du pont, par exemple) lui garantissent la traversée même si une ou des cordes se rompent. Le métrologue se donnera les moyens de garantir a priori qu'il arrivera à traverser sans encombre: de ce fait, il vérifiera la qualité des cordes, analysera la méthode... pour que les cordes ne se rompent pas.

Qui a raison, qui a tort? Personne évidemment. La raison nous conduit à penser que l'idéal se situe dans la combinaison de ces deux méthodes. Les contraintes financières et de délai (pas toujours raisonnables) montrent que pratiquer la totalité des deux méthodes n'est pas viable et donc les conditions du travail à réaliser vont imposer de trouver un compromis raisonnable entre ces deux méthodes.

Exemple du mesurage de voitures de tramway à l'aide d'un tachéomètre

Le problème posé par le prescripteur consiste à réaliser, en particulier, la mesure de la largeur des caisses des tramways destinés au marché australien. L'objectif final de cette mesure, non traité ici, est de garantir que, compte tenu des différentes contraintes (position des rails, tolérances de positionnement des boggies sur les rails, positionnement des boggies sur la caisse), les tramways lors des différents croisements, ne se percutent pas, dans toutes les configurations. De ce fait, le prescripteur impose au constructeur de la caisse de garantir une tolérance de largeur de caisse de ± 3 mm.



Figure 2 : mesure finale d'un CITADIS ALSTOM à l'aide d'un tachéomètre TDA 5005 LEICA, d'un prisme BAECHLER dia. 40 mm, d'une commande à distance infra-rouge et du logiciel Métride Dim Master

L'analyse de ce cahier des charges permet au constructeur, qui s'engage pour assurer la fonction de prestataire de mesure au sein de ses équipes de production, de choisir une méthode de relevé tridimensionnel par tachéomètre dont les caractéristiques élémentaires sont:

- Incertitude angulaire à $\pm 2,5 \mu\text{rad}$ ($0,15 \text{ mgon}$) à 1 écart type selon la norme ISO 17123-3
- Incertitude en distance à $\pm 0,5 \text{ mm}$ à 1 écart type selon la norme ISO 17123-4

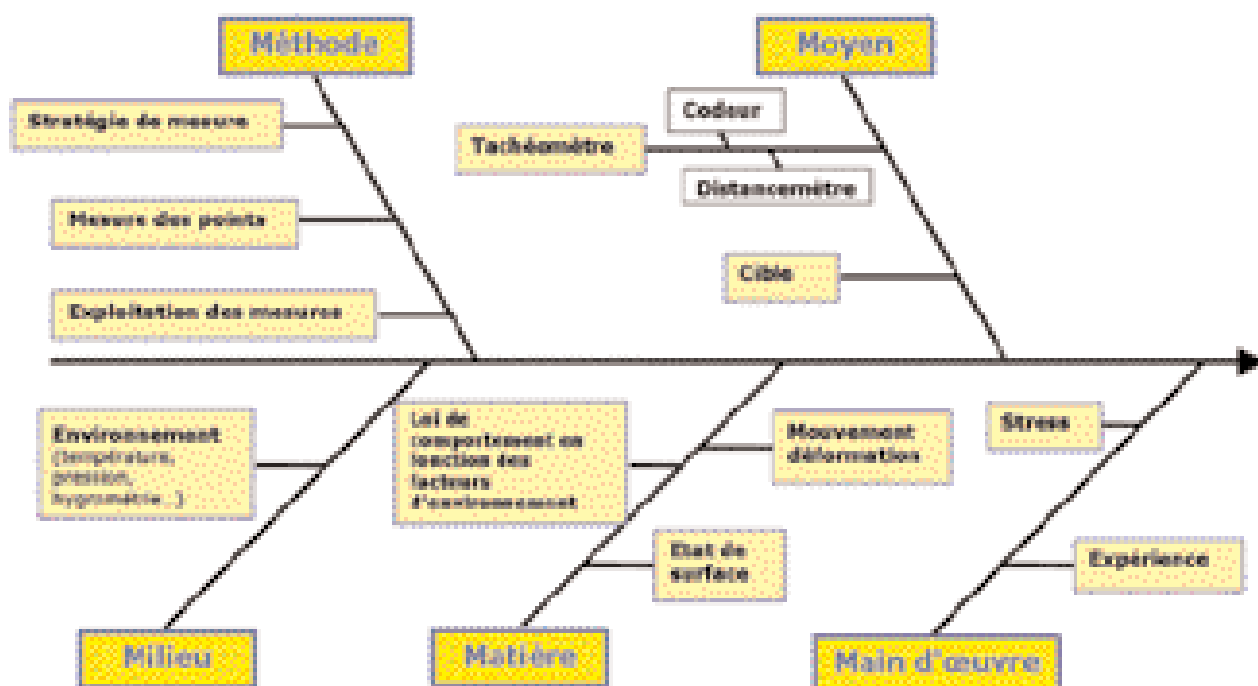


Figure 3 : diagramme 5M pour analyser les sources d'incertitude

En première analyse, il semble que le prestataire puisse obtenir une incertitude sur la largeur de la caisse à ± 1 mm environ.

Pour respecter ce qui est proposée plus haut, il conviendrait de dérouler l'ensemble de la démarche. Pour garantir le niveau d'incertitude requis, nous avons aidé le prestataire à définir la méthode de mesure, à mettre en place l'ensemble des points de contrôle.

■ Quels sont les éléments dont nous disposons pour l'aider dans cette analyse ?

En premier lieu, l'analyse de la méthode de mesure et de calcul s'appuie sur la démarche du 5M⁽⁶⁾ du procédé mis en place, dont le diagramme présenté en figure 3 est un résumé. Il met en évidence toutes les sources d'incertitude induites par cette méthode.

Les sources d'incertitude identifiées, nous avons qualifié l'appareil de mesure et surtout mis en place une méthode de surveillance par un étalonnage sur la mesure de distance et une vérification des capteurs selon la norme ISO 17123.

L'étalonnage présenté en figure 4 montre que, pour un appareil de ce type, les erreurs de justesse peuvent être réduites à 0,2 mm en intégrant la courbe d'étalonnage dans le calcul de la distance. Une surveillance annuelle de l'instrument et un étalonnage en cas de dérive excessive de la mesure de distance (écart supérieur à 0,5 mm) permettent de garantir que l'incertitude sur la distance ne dépassera pas la valeur de 0,5 mm.

De même, sur la mesure angulaire, l'incertitude obtenue par analyse des différents facteurs aboutit à une estimation de l'ordre de 10 μ rad (0,6 mgon) alors que le constructeur garantit son instrument à un niveau 4 fois inférieur selon la norme ISO 17123: cette estimation par le constructeur ne concerne que le codeur angulaire, dans une situation

(6) diagramme dit d'Hishikawa ou "arête de poisson" qui permet de disséquer un procédé entre 5 domaines : moyen, méthode, milieu, matière et main d'oeuvre. Il permet d'identifier les sources de problème - en métrologie, il est souvent utilisé pour identifier les sources d'incertitude d'une méthode de mesure, comme c'est le cas ici.

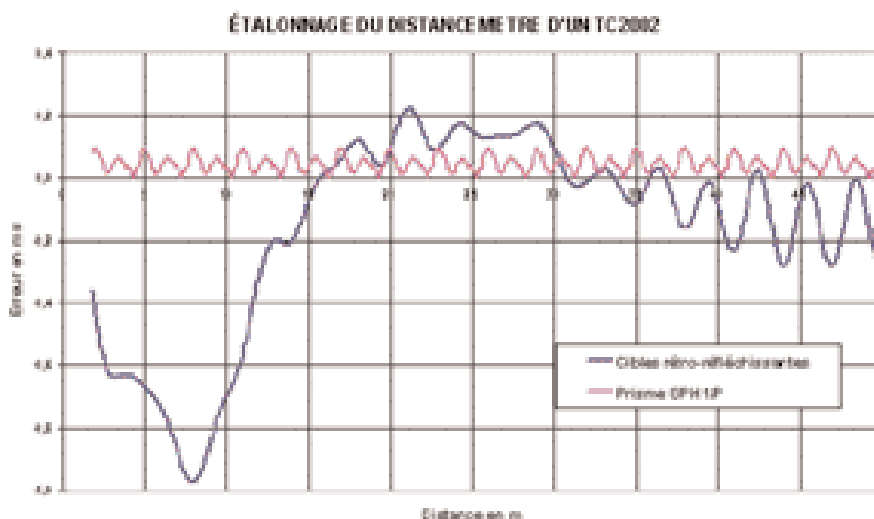


Figure 4 : exemple d'étalonnage du distancemètre d'un tachéomètre sur deux types de cible (prisme et scotch-light)

idéale où les erreurs géométriques de l'appareil, les erreurs de visée... sont parfaitement maîtrisées.

Exemple de calcul d'incertitude sur une telle application

Deux éléments essentiels sont déterminés lors de ces contrôles: la planéité des faces latérales de la voiture et la largeur de caisse.

Les données de ce calcul :

- Dimensions de la caisse: longueur 27 m, largeur 3 m, hauteur 5 m

- Incertitudes élémentaires du capteur: $\delta\alpha = 10 \mu$ rad (ou 0,6 mgon), $\delta D = 0,5$ mm (critère de retour de l'appareil pour étalonnage)

- Le référentiel-objet est orienté en X par l'axe de la voiture, la verticale étant donnée par l'appareil

La planéité des faces latérales est obtenue par mesure directe depuis une station de mesure, le tachéomètre étant installé en extrémité de la voiture (comme présenté en figure 2). Les incertitudes de mesure de planéité sont uniquement liées à l'axe Y du référentiel et peuvent s'exprimer de la manière suivante :

$$\partial y = \sqrt{\sin^2(H_A) \cdot \sin^2(V_A) \cdot \partial D^2 + D^2 \cdot (\cos^2(H_A) \cdot \sin^2(V_A) + \sin^2(H_A) \cdot \cos^2(V_A)) \cdot \partial \alpha^2}$$

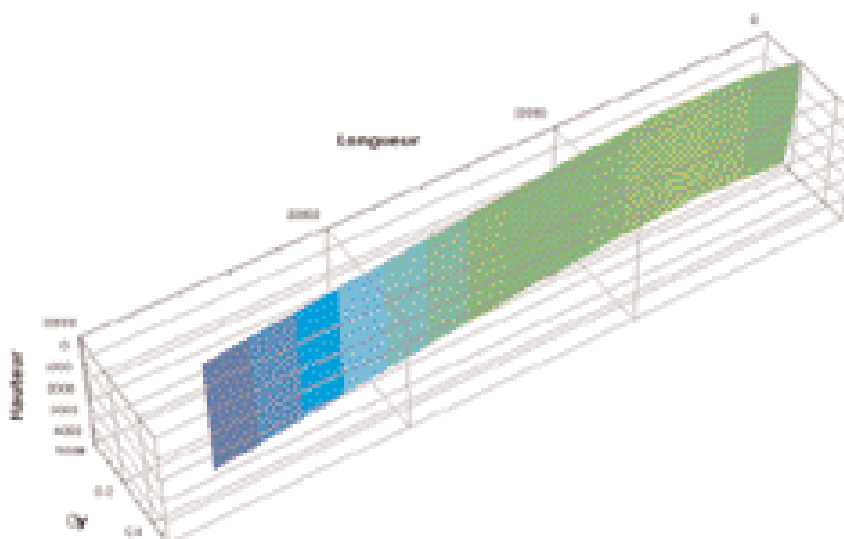


Figure 5 : incertitude de planéité de la face latérale de la voiture

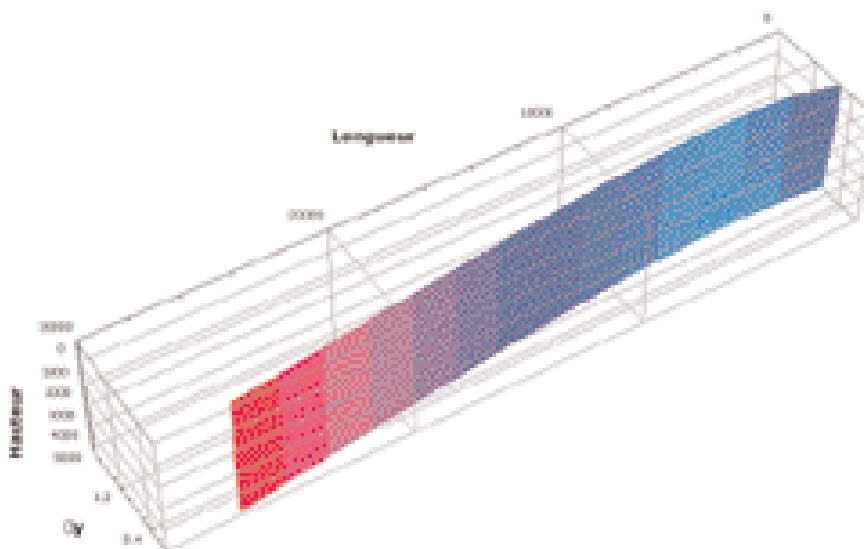


Figure 6 : incertitude de largeur de caisse

■ ■ ■ La figure 5 représente les variations de cette incertitude sur toute la face de la voiture, en considérant que l'appareil est approximativement placé dans l'alignement de la face (décalage de 2 m).

On voit qu'à partir des niveaux d'incertitude élémentaires, l'incertitude réellement constatée sur l'élément mesuré est particulièrement diminuée par un choix adapté de positionnement du système de mesure : l'incertitude maximale est de l'ordre de 0,3 mm en extrémité de la pièce (à 27 m) et l'incertitude minimale est inférieure à 0,1 mm à 4 m du début de la pièce.

La mesure de largeur de caisse nécessite un relevé de chaque côté de la voiture et donc un déplacement du tachéomètre. Ceci entraîne une augmentation de l'incertitude de mesure liée à ce report et un cumul des mesures de planéité de chaque côté de la voiture. Sur la figure 6, on remarque alors que l'incertitude augmente de manière notable, avec un minimum de 0,2 mm à 4 m et un maximum de 0,5 mm à 27 m.

Cet exemple illustre bien l'intérêt de l'analyse d'incertitude : avec un appareil dont l'un des composants présente une incertitude de 0,5 mm, il est possible de réaliser des mesures avec un niveau nettement amélioré.

Il montre aussi la puissance d'une analyse préalable, qui permet de sélectionner la méthode la plus adaptée à une prestation plutôt que de choisir un instrument d'un niveau d'exactitude trop élevé.

Éléments de conclusion

Cet article n'a aucune prétention à donner des leçons sur les métiers présentés ici. Il cherche à montrer la richesse de ces deux métiers, où chacun peut s'enrichir des expériences et des pratiques des autres. C'est d'ailleurs grâce à l'animation du groupe de travail "MTPO" (Mesures Tridimensionnelles par Procédés Optiques) du Collège Français de Métrologie que nous avons pu découvrir l'intérêt d'une telle confrontation⁽⁷⁾.

Les éléments qui peuvent en être extraits sont les suivants :

- La démarche du métrologue est souvent une analyse a priori, ce qui permet de prédire les problèmes. Cependant, le métrologue réduit souvent sa démarche à un seul moyen de mesure et oublie la richesse du mélange de mesures, pour augmenter la qualité de la prestation et sa fiabilité.

(7) voir XYZ n°98.

- La démarche du topomètre est plutôt a posteriori, ce qui pourrait le mettre en danger s'il ne multipliait pas les mesures. Il gagnerait donc en performance s'il acceptait une certaine analyse préalable pour réduire justement les répétitions de mesure, le doublement des moyens de mesure...

Une analyse plus approfondie permettrait probablement de définir une troisième voie entre le métrologue et le topomètre. La plupart du temps, ceux qui ont conscience de ces deux approches la trouve naturellement, par la recherche d'un compromis entre la préparation raisonnable et le traitement a posteriori le plus efficace possible. ●

Contact

Alain MARTIN-RABAUD

Métride s.a.

444, rue des Jonchères – 69730 GENAY (France)

Téléphone : 04 72 08 77 77

Fax : 04 72 08 77 79

email : info@metride.fr

Site Web : www.metride.fr

ABSTRACT

KEY WORDS: metrology, topometry, fiability, uncertainty, specification, 3D measurement.

Confronted since years with the intervention in industrial field with means resulting from geodesy, it seemed to me interesting to advance explanations to the following paradox: how, starting from a step which seems to oppose them, metrolog and the topometer can guarantee and obtain a level of reliability of their measures so close? We will try in this presentation to better understand these approaches and to draw some simple conclusions from them.