HAL
open science

La mesure des angles au BNM-LNE : création d'une nouvelle référence de mesure angulaire

Stéphane Leleu, Jean-Marie David, Georges-Pierre Vailleau

To cite this version:

Stéphane Leleu, Jean-Marie David, Georges-Pierre Vailleau. La mesure des angles au BNM-LNE : création d'une nouvelle référence de mesure angulaire. 11e Congrès International de Métrologie, Oct 2003, France. pp.7. hal-00948102

HAL Id: hal-00948102

https://hal.science/hal-00948102v1

Submitted on 26 Feb 2014

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.

Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers ParisTech researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: http://sam.ensam.eu
Handle ID: .http://hdl.handle.net/10985/7756

To cite this version :

Stéphane LELEU, Jean-Marie DAVID, Georges-Pierre VAILLEAU - La mesure des angles au BNM-LNE : création d'une nouvelle référence de mesure angulaire - 2003

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository Administrator : archiveouverte@ensam.eu

LA MESURE DES ANGLES AU BNM-LNE
CREATION D'UNE NOUVELLE REFERENCE DE MESURE ANGULAIRE

S. Leleu[1], J.M.David[1] et G.P. Vailleau[2]
[1] L2MA – ENSAM : 8, boulevard Louis XIV – 59046 Lille Cedex
[2] BNM-LNE : 1, rue Gaston Boissier – 75724 Paris Cedex 15

Résumé

L'objet de cet article est la présentation du plateau de référence angulaire développé au BNM-LNE. Nous dégageons, après avoir présenté les différents étalons angulaires, les objectifs à atteindre pour un instrument de référence angulaire. Le principe d'élimination réciproque d'erreurs de deux codeurs est présenté avec la solution apportée pour s'affranchir du défaut de sous échantillonnage inhérent à ce principe. La présentation du bilan d'incertitudes et son résultat d'une incertitude type de ± 0,04" pour la mesure de polygones angulaires sont validées par la participation à la campagne d'intercomparaison EUROMET 371.

Abstract

The object of this article is to present the angular reference plate developed by the BNM-LNE. After having presented the angular standards we draw the purposes to reach for an angular reference instrument. The principle of two encoders' errors elimination is presented with the solution carried out to free itself from under sampling defaults inherent to this measuring principle. Presentation of the assessment of uncertainties and its result of a standard uncertainty of ± 0.04" for the measurement of angular polygons are validated by the participation at the comparative survey EUROMET 371.

Introduction

L'unité d'angle du Système International est le radian. Sa définition, donnée par la norme NF X 02-006, est la suivante : "Le radian est l'angle plan compris entre deux rayons qui interceptent sur la circonférence d'un cercle, un arc de longueur égale à celle du rayon." Les autres unités couramment utilisées sont :

- le tour qui selon la définition précédente est égal à 2π radians.
- le degré décomposant un tour en 360 secteurs angulaires égaux et ses sous-multiples la minute (') et la seconde d'angle (").

La nature abstraite de l'unité d'angle, basée uniquement sur des considérations géométriques, lui confère en théorie une large accessibilité. Il n'existe donc pas de chaîne d'étalonnage proprement dite pour les angles comme pour les autres unités telles que le mètre par exemple qui fait référence à un étalon relevant d'une convention arbitraire. Mais dans la pratique, les difficultés sont les mêmes qu'en métrologie des longueurs, car il faut souvent matérialiser un angle étalon par des instruments. De plus, il faudra assurer la comparaison de l'angle à mesurer avec la référence utilisée et ce avec une incertitude la plus faible possible.

Les étalons d'angles

Il existe deux types de références : les angles matérialisés basés sur la division du cercle tels que les polygones, cales étalon d'angles, plateaux continus ou à indexage, et les angles repérés par variation de longueur : barres sinus, niveaux, option angle des lasers interférométriques, lunettes autocollimatrices.
Nous nous limiterons dans la suite de l'article à l'étude des étalons matériels de grande course présentant un faible niveau d'incertitudes.

Les polygones

Les polygones, dont la principale qualité est leur stabilité dans le temps, sont utilisés en tant que référence matérielle et peuvent, associés à un détecteur de zéro, permettre de calibrer d'autres systèmes de mesure angulaire. Etant de plus facilement transportables, ils sont retenus comme étalons au niveau des comparaisons entres les laboratoires nationaux.
Les polygones les plus couramment utilisés sont réalisés en ZERODUR, en verre ou en acier et présentent de 4 à 24 faces. Le mesurande est défini par l'angle entre les normales aux faces. Pour écrire la fermeture du cercle, il est indispensable de travailler avec les projections des normales dans un plan de mesure. Ce plan est généralement défini comme étant le plan pour lequel la somme des carrées des erreurs pyramidales de toutes les faces du polygone est minimale.
Outre les recommandations classiques de centrage du polygone sur l'instrument de mesure, plusieurs précautions doivent être mises en œuvre afin de garantir la reproductibilité de leur caractérisation. La première apparaît au niveau de la détermination de la normale aux faces. En effet, les faces du polygone, qui sont nominalement planes, possèdent en réalité des défauts de forme. La normale à la face sera donc définie comme la normale à un plan moyen. Or la caractérisation du plan moyen dépend de la zone de la face réellement utilisée par l'instrument de visée et de la technologie employée. Ainsi un même polygone physique peut avoir des caractéristiques différentes selon les instruments utilisés et les conditions de mise en œuvre.
Les meilleurs polygones ont des défauts de planéité inférieur à $\lambda/20$ soit une trentaine de nanomètres. L'utilisation de différentes lunettes autocollimatrices comme détecteur optique ayant des diamètres de faisceau différents, et en particulier inférieur à la plus grande dimension des faces, peut amener des dispersions de plus de 0,5" sur la mesure des angles entre faces [1]. Par contre, il apparaît que tant que la totalité de la face du polygone

est comprise dans le faisceau de la lunette, le défaut de planéité de la face est moins influent.
La seconde difficulté réside dans la réalisation d'un montage minimisant ses déformations lors de sa fixation sur l'instrument de mesure. Un dernier point concerne la sensibilité du faisceau optique aux variations de l'environnement. Il est nécessaire de réduire au minimum la longueur du chemin optique et de le protéger sans rompre la symétrie du polygone (Figure 1)

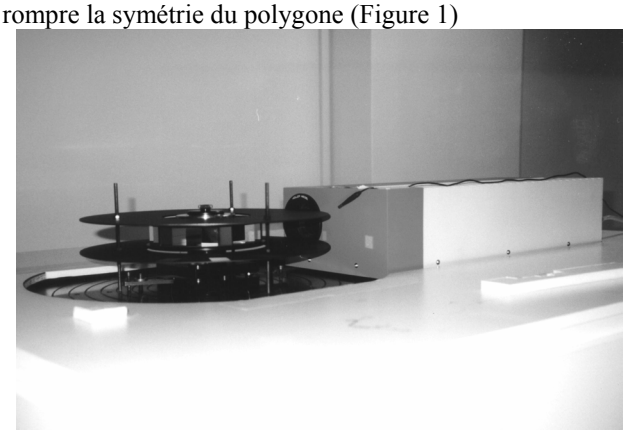

Figure 1 : Polygone et lunette autocollimatrice

Les plateaux angulaires

Les plateaux angulaires permettent de générer des angles par rotation d'un solide terminal par rapport à un solide fixe. On trouve les plateaux indexés, basés sur la division du cercle matérialisée par deux dentures HIRTH. La qualité de réalisation et le nombre de dents conditionnent la qualité de positionnement et sa répétabilité. Les réalisations les plus connues sont les plateaux MOORE. L'exactitude est améliorée par un moyennage des effets au niveau de chaque point de contact. On peut citer le plateau MOORE 1440, qui permet de générer 1440 positions par tour avec une exactitude de ± 0,2".
On trouve aussi les plateaux continus qui dissocient la mise en position de la mesure angulaire. La mise en position est assurée par une structure mécanique assurant une liaison pivot et la mesure de l'angle de rotation principal est assurée par un codeur angulaire. Ces codeurs peuvent être absolus ou incrémentaux, basés sur des procédés opto–électroniques ou magnétiques. L'un des codeurs industriels les plus performants est le RON 905 de Heidenhain avec une exactitude de ± 0,2" et une résolution de 0,035". Le problème qui se pose reste leur calibration qui est difficile à cause de la non répétabilité de leurs défauts suivant le tour étudié et la présence des erreurs d'interpolation qui sont à variation très rapide.
Certains plateaux, comme celui du Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (P.T.B.) allemand, développés avec la société Heidenhain sont équipés de codeurs spécifiques dont l'amélioration de performances est basée sur une augmentation du diamètre du disque, du nombre de têtes de lectures et le développement de stratégies d'étalonnage.
La méthode d'évaluation des angles du plateau de référence du BNM-LNE, objet de cet article, a pour objectif de préserver l'aspect géométrique de l'unité d'angle en reconstruisant en permanence l'étalon angulaire par division du cercle, ce qui permet de s'affranchir de la stabilité à long terme de étalon ainsi matérialisé. Le principe retenu repose sur l'élimination réciproque d'erreur de deux codeurs introduit par le National Physical Laboratory (N.P.L.) [2].

Les goniomètres laser

Ce système est issu des recherches menées dans les années 1970 et qui ont conduit dans un premier temps aux gyroscopes laser. Le principe est basé sur l'utilisation d'une source laser et d'un ensemble de miroirs disposés de façon à faire parcourir aux rayons lumineux deux trajets polygonaux en sens contre–rotatif. Une rotation du polygone angulaire à caractériser autour de son axe se traduit par des différences de fréquences entre les faisceaux qui permettent de mesurer les écarts angulaires. Cet instrument est aujourd'hui la référence angulaire pour plusieurs laboratoires comme par exemple le Slovak Institute of Metrolgy (S.M.U.).

Les principes de mesure angulaire

La mesure angulaire consiste en la comparaison de l'angle à qualifier avec un angle de référence qui est soit généré (exemple par un plateau rotatif) soit matérialisé (exemple par la position des systèmes de visée optique). Dans le premier cas, l'utilisation d'un plateau étalonné permet une comparaison directe de l'angle à mesurer avec l'angle de rotation du plateau. Dans le second cas, il est nécessaire de faire intervenir la fermeture géométrique du cercle pour déterminer les différentes valeurs angulaires.

Principe de l'élimination d'erreurs

Dans le cas de la mesure d'un polygone par un plateau pivotant, une méthode, connue sous le nom de multi-retournement, consiste à mesurer chaque angle entre face du polygone, non plus par un seul secteur du plateau, mais par chaque secteur angulaire du plateau. En pratique, un polygone de n faces est mesuré n fois avec une rotation relative de 360°/n du polygone par rapport au plateau entre chaque mesure. La procédure permet donc d'obtenir n^2 mesures où chaque secteur angulaire du plateau aura mesuré tous les angles du polygone et réciproquement. Il en résulte la possibilité de séparer les erreurs du polygone des erreurs systématiques de justesse du plateau ainsi qu'une diminution de certaines des incertitudes de mesures d'un facteur $\sqrt{\mathbf{n}}$ par moyennage.

Le plateau de référence du BNM-LNE

Le BNM-LNE a initié en 1994, en collaboration avec le Laboratoire de Métrologie et Mathématiques Appliquées de l'ENSAM de Lille, un projet de recherche avec comme objectif le développement d'une nouvelle référence nationale de mesure d'angle. Le choix s'est porté sur un plateau pivotant continu offrant la plus grande souplesse d'utilisation et la possibilité de qualifier l'ensemble des étalons d'angles couramment utilisés.
La définition des objectifs à atteindre pour un instrument de mesure destiné à devenir une référence est un exercice difficile. Le critère d'exactitude est primordial et le niveau de satisfaction à atteindre est "le mieux possible". Des limites vont cependant se présenter, liées aux coûts de développement et de réalisation, aux délais du projet ainsi que des compétences mobilisées. Le projet s'est rapidement orienté vers la conception et la réalisation d'un plateau pivotant de très haute précision. Le niveau d'exactitude minimal à atteindre sur l'angle de rotation

principal est une incertitude de mesure élargie (k=2) meilleure que ± 0,1" sur une course de plus de 360 degrés de manière continue et pour le guidage en rotation l'incertitude élargie sur la position d'un point de l'espace de travail devra être inférieure à 0,5 micromètre sur un volume de 500 millimètres. Dans un souci de fiabilité et de délai, aucun nouveau composant ne sera étudié durant le projet. Le plateau intégrera donc des éléments disponibles sur le marché et fera appel à des concepts novateurs et des stratégies d'élimination d'erreurs qui devrait permettre d'atteindre les objectifs fixés.

Fonctions d'un plateau pivotant

Un plateau pivotant assure deux fonctions principales distinctes, une première concerne la mise et le maintien en position (fonction de guidage) et la seconde réalise la mesure angulaire suivant l'axe de révolution. Bien que l'analyse des sources d'incertitudes sur la détermination des valeurs angulaires d'un plateau pivotant montre que l'influence des défauts de guidage est secondaire, le projet a consisté à la maîtrise globale du mouvement de rotation.

La fonction guidage a fait l'objet de la première concrétisation d'une voie nouvelle de conception de machines de précision qui a été engagée par notre laboratoire [3]. Elle est basée sur la simplification de la chaîne métrologique des machines. Ce principe amène la dissociation de la structure métrologique de la structure porteuse de la machine, permettant une optimisation de celles-ci. Ainsi la mise en position du plateau est assurée par une structure mécanique classique et la position de l'élément terminal est mesurée en permanence par des capteurs capacitifs en nombre redondant. L'incertitude type finale obtenue sur le guidage est inférieure à 0,25 micromètres pour l'ensemble des points de l'espace de travail. Une amélioration des performances est envisageable en augmentant le nombre de capteurs ou leur exactitude.

Le système de mesure angulaire

L'offre standard de fourniture de codeur angulaire, quels que soient le constructeur et la technologie choisis, présente un niveau d'exactitude très insuffisant pour satisfaire nos objectifs. La complexité et le coût de développement d'un codeur spécifique étant importants, nous avons choisi d'appliquer une voie développée depuis plusieurs années au sein de notre laboratoire : le principe d'élimination d'erreurs.

Principe de mesure Les avantages des techniques d'élimination d'erreur sont multiples et correspondent bien à ce que l'on peut attendre d'un instrument de mesure : l'exactitude et la fiabilité.

Le principe de mesure angulaire d'un codeur optique incrémental étant basé sur la division du cercle, il ne présente pas d'erreur de justesse sur un tour complet de son disque (mesure d'un angle de 360 degrés). Alors que pour la mesure d'un angle quelconque, seule une partie des graduations du disque est utilisée et peut donc engendrer une erreur de justesse sur la mesure si le disque présente une erreur de graduation. Pour que le codeur ne présente pas d'erreur de justesse quel que soit l'angle mesuré, il serait intéressant que toutes les graduations du disque puissent être lues.

Le système d'acquisition angulaire du plateau est donc composé de deux codeurs, montés en vis-à-vis, dont les disques gradués sont liés de façon rigide et entraînés en rotation constante (Figure 2). Ce montage sera appelé dans la suite du texte le Double Codeur.

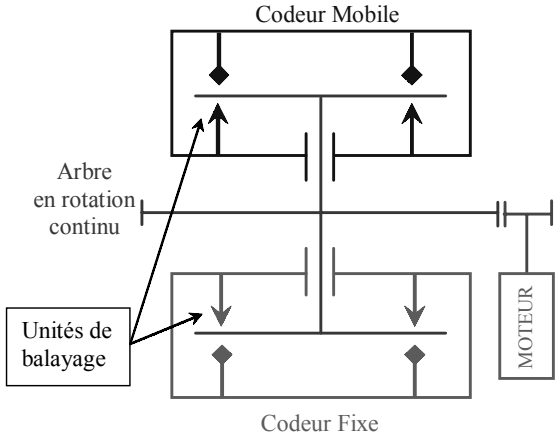

Figure 2 : Montage du Double Codeur

L'information donnée par ce système après une révolution de l'arbre central est la position angulaire du corps du codeur mobile fixé à l'élément terminal du plateau par rapport au corps du codeur fixe.

L'augmentation de l'exactitude est décomposable en plusieurs aspects : La redondance des mesures effectuées permet de diminuer l'incertitude de mesure par cumul statistique et d'améliorer la résolution par moyennage. L'erreur de justesse est, quant à elle, éliminée par la méthode de mesure. Cependant cette technique a un inconvénient lié au temps de mesure. L'accès à une évaluation précise de l'angle nécessite une révolution complète du système de codeurs utilisé. La vitesse de rotation des codeurs est principalement limitée par la chaîne d'acquisition, elle est actuellement de 30 tr/min. La mesure de la position angulaire du plateau nécessite donc 2 secondes.

Elimination réciproque des erreurs de justesse

Durant une révolution de l'arbre central du double codeur, une carte d'acquisition placée dans un ordinateur de type PC saisit de manière synchronisée les valeurs angulaires de chacun des codeurs. Les mesures des codeurs sont codées dans [0°, 360°[, la valeur 0° correspondant au passage devant la raie de référence du codeur. La différence instantanée des deux lectures des codeurs donne une estimation de la position relative de leur corps entaché des erreurs de justesse de chaque codeur. La moyenne des différences sur une révolution complète de l'arbre centrale du Double Codeur donne donc la valeur angulaire de la rotation du plateau sans erreur de justesse car la mesure est obtenue par intégration de toutes les graduations des deux disques des codeurs. Pour s'affranchir de l'impossibilité pratique de garantir la stabilité du pas d'acquisition des codeurs, l'angle est évalué au moyen d'une intégration des différences instantanées par la méthode des trapèzes (Figure 3) :

$$\alpha = \frac{1}{360} \cdot \int_0^{360} \left[\theta_{lumobile} - \theta_{lufixe} \right] d\theta$$

L'angle ainsi obtenu est une mesure absolue de la position des corps des codeurs mobile par rapport au codeur fixe. Le zéro du système de mesure correspond à la position physique pour laquelle les raies de référence des codeurs parfaitement alignées.

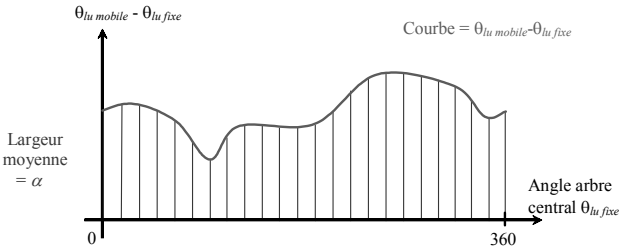

Figure 3 : Angle du plateau mesuré par le Double Codeur

Echantillonnage et acquisition des mesures Le Double Codeur sera basé sur l'utilisation de deux RON 905 avec une carte d'acquisition deux voies IK121. Le temps d'accès aux deux valeurs de mesure de la carte d'acquisition des codeurs est de 70 microsecondes. Le temps de transfert, de calcul de la différence des deux valeurs et le stockage en mémoire est de l'ordre de 20 microsecondes. Le pas temporel d'acquisition minimum est donc de 90 microsecondes soit un pas d'acquisition de 0,016 degré sur les codeurs (Figure 4).

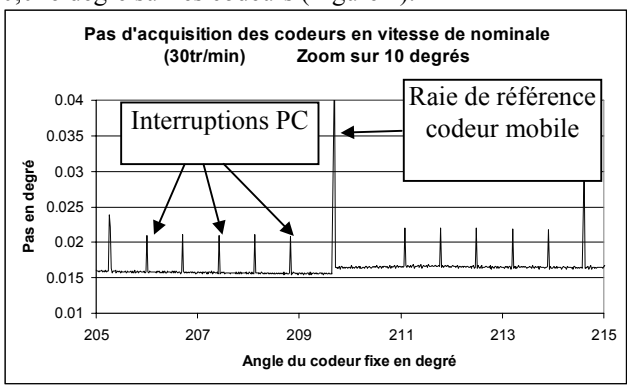

Figure 4 : Pas d'acquisition du système de mesure

En pratique, le pas d'acquisition des valeurs codeur n'est pas constant. Il est perturbé par les interruptions système du PC qui ont lieu toutes les 40 millisecondes. Pour la saisie de la Figure 4 le pas moyen augmente à partir de 209,6911 degrés du codeur fixe car c'est pour cet angle du codeur fixe que le codeur mobile passe devant sa raie de référence. Il devient donc nécessaire à partir de ce point d'ajouter 360 degrés à la lecture du codeur mobile ce qui se traduit par un temps supplémentaire de traitement informatique de l'ordre de 4 microsecondes soit une augmentation du pas moyen de 0,0008 degré.

L'exactitude de la détermination de la position angulaire du plateau est directement liée à la précision du calcul de l'aire comprise entre la courbe différence des lectures codeurs avec l'axe des abscisses. Il apparaît donc important de caractériser finement cette courbe différence qui est, rappelons le, la signature des défauts des deux codeurs. Ce signal est donc composé de plusieurs signatures de défauts de périodes différentes. En particulier, les défauts des deux interpolateurs dont la période de base est de 0,01 degré pour un codeur à 36000 traits. Ce qui exige, pour une acquisition satisfaisante de ce signal, une période d'échantillonnage très fine (de l'ordre de 0,001 degré).

Etude expérimentale de la chaîne d'acquisition

Or la période moyenne minimale de notre système d'acquisition est de 0,016 degré. Nous sommes donc en présence d'une chaîne d'acquisition fortement sous échantillonnée (Figure 5).

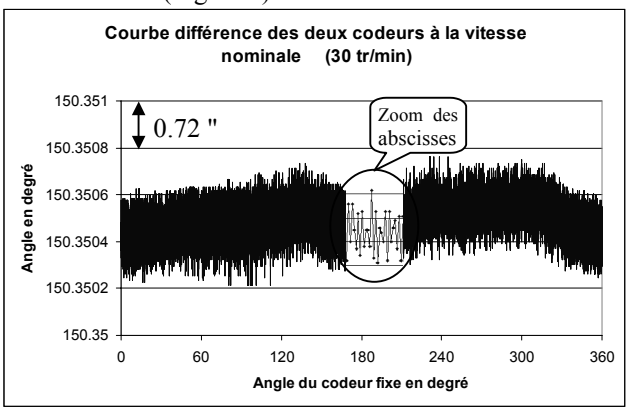

Figure 5 : Sous échantillonnage des lectures codeurs

La courbe expérimentale de la différence des deux codeurs met en évidence un défaut de basse fréquence signature des erreurs de justesse des deux codeurs et un défaut de haute fréquence d'amplitude une seconde, signature des erreurs des deux interpolateurs.

Il est très difficile expérimentalement de déterminer les effets du sous échantillonnage du signal différence des deux codeurs sur la justesse de la mesure angulaire du plateau. Nous avons réalisée une analyse basée sur des simulations de mesures informatiques mettant en œuvre deux codeurs virtuels à 36000 traits n'ayant que des erreurs dues à leur interpolateur. Ces simulations permettent de caractériser et de valider différentes techniques d'échantillonnage.

Simulation informatique de la chaîne d'acquisition Pour un pas d'échantillonnage constant de 0,002 degré sur les codeurs, c'est à dire dans de bonnes conditions d'échantillonnage (la fréquence d'échantillonnage est plus de deux fois supérieure à la fréquence la plus élevée du signal à numériser) l'erreur maximum simulée sur la position angulaire du plateau est de 0,002". Cette erreur est due à l'intégration par la méthode des trapèzes donc le pas de calcul est encore trop important.

Pour un pas d'échantillonnage de 0,01 degré, c'est à dire le pas de la gravure, l'erreur sur la détermination de la position angulaire du plateau peut varier de 0 à 0,4" en fonction du phasage des erreurs des interpolateurs. Cet résultat montre tous les dangers du sous échantillonnage du signal dans notre chaîne d'acquisition. En effet un phasage du pas d'acquisition avec le défaut des interpolateurs peut générer par repliement une erreur finale sur l'angle mesuré d'amplitude égale au défaut initial intrinsèque de chaque codeur.

Des simulations informatiques utilisant les pas d'acquisition des codeurs expérimentalement observés ont montré que l'erreur finale n'excède pas 0,003" avec la saisie libre actuelle. Cependant, ces effets étant difficiles à montrer autrement que par simulation informatique, nous avons préféré mettre en place une méthode de ré–échantillonnage par reconstitution du défaut des interpolateurs ce qui correspond à une approche plus fiable.

Ré–échantillonnage du signal L'erreur des interpolateurs varie peu en fonction de la position angulaire du codeur. Cette variation de forme et d'amplitude est relativement lente. Il est donc possible de reconstruire l'erreur de micro–justesse en utilisant des points mesurés sur plusieurs périodes connexes. Nous avons mis en oeuvre cette technique de ré–échantillonnage sur le signal différence des deux codeurs. Pour chaque période de l'erreur des interpolateurs (0,01 degré pour les codeurs à 36000 traits), le signal est reconstitué à partir des périodes connexes précédant la période étudiée avec un filtrage de type exponentiel. Le signal est reconstruit en 20 points par période qui seront utilisés ensuite pour le calcul de l'aire par intégration par la méthode des trapèzes. Afin de ré–échantillonner correctement le signal, il est indispensable que les points saisis soient répartis de façon homogène sur les périodes. Avec cette technique, le signal obtenu est comparable au signal échantillonné avec un pas de 0,0005°. La simulation informatique de cette technique montre son efficacité quelque soit la configuration des erreurs des interpolateurs.

Incertitudes de mesure du Double Codeur

Le principe du double codeur permettant d'éliminer les erreurs répétables des deux codeurs utilisés, l'incertitude sur le résultat de mesure ne fait intervenir que les sources d'erreurs non répétables ou à variations très rapides comme celles des interpolateurs. On retiendra comme incertitude élargie (k=2) de ces défauts +/- 0,4". En respectant les règles d'échantillonnage établies, l'hypothèse d'indépendance des erreurs de mesure de chaque codeur est validée, la relation classique du cumul statistique permet d'écrire :

$$\sigma_{DC} = \frac{\sqrt{2} \times \sigma_C}{\sqrt{N}}$$

avec σ_{DC} l'incertitude élargie sur le résultat de mesure d'un tour du Double Codeur, σ_C l'incertitude élargie de mesure d'un codeur (± 0,4") et N le nombre d'acquisitions par tour. Avec l'acquisition avec reconstruction du signal, le nombre de mesures sur un tour est de 12500. En ne prenant en compte que ces sources de défaut, l'incertitude sur le résultat sera donc de ± 0,005".

Matérialisation du plateau de Référence

La vue en trois dimensions coupée (Figure 6) montre la mise en place des fonctions principales du plateau de référence telles que décrites précédemment.

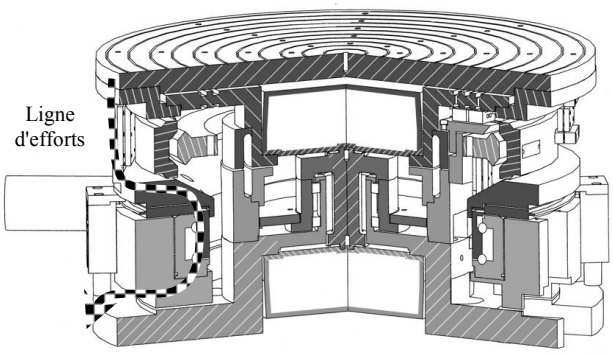

Figure 6 : Eclaté du plateau de référence

Les pièces qui sont liées à la partie tournante sont en gris foncé, les pièces fixes sont en gris clair et les pièces du mécanisme d'animation permanente du double Codeur sont en gris. Les pièces de la structure métrologiquement sensible sont hachurées et dissociées de la structure porteuse des efforts traversée par la flèche de descente des efforts. Les liaisons entre la structure métrologique et la structure porteuse sont assurées par des liaisons de découplage isostatique par lames flexibles.

Bilan des incertitudes de mesure

Comme pour tout étalon de référence, il est important que tous les constituants de la chaîne métrologique, ainsi que son environnement, soient optimisés. Bien que par conception, le plateau est peu sensible aux variations de température, il est implanté dans un local régulé à 20°C±0,5°C. Pour la qualification de polygones angulaires, il est associé à une lunette autocollimatrice ELCOMAT HR, de résolution 0,005" et dont l'erreur de justesse n'excède pas 0,01" sur une plage de ±10".

Les évaluations du plateau sont réalisées par multi–retournement avec un polygone en ZERODUR à 24 faces, de planéité λ/20. Pour une position du polygone sur le plateau, les 24 faces sont mesurées successivement sur un aller et retour. Il apparaît que le système d'acquisition du plateau, le Double Codeur, possède une erreur de justesse de ± 0,06" (Figure 7). Cette erreur est toutefois à variation lente, avec un caractère répétable entre l'aller et le retour à ± 0,015" et parfaitement stable dans le temps.

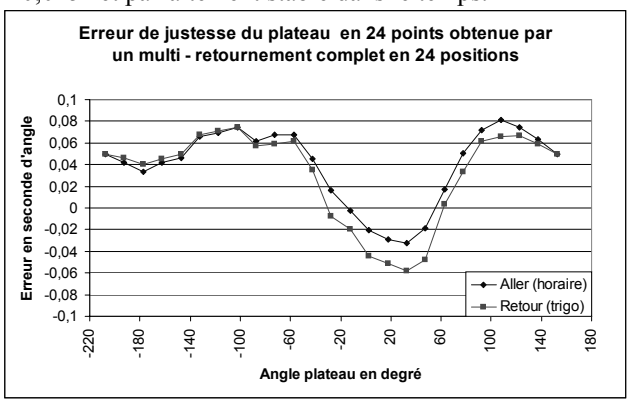

Figure 7 : Erreur de justesse du plateau sur un tour

Nous avons fait le choix d'écrire une table de correction de l'erreur de justesse du plateau qui sera mise en œuvre dans l'utilisation ultérieure du plateau. Cette table sera unique et obtenue en moyennant les mesures aller et retour, et ne tiendra pas compte en particulier du sens de parcours du plateau. En effet ce type de procédures amènerait des corrections locales abusives sur des déplacements de faibles amplitudes de sens opposés. Des travaux complémentaires sont menés pour identifier les causes de ce défaut.

A ce niveau d'incertitude, il est très délicat de quantifier leurs amplitudes et leur source. Le Tableau 1 donne le budget d'incertitude pour la mesure d'un polygone en comparaison directe avec le plateau de référence angulaire du BNM-LNE. Les autres facteurs sont de peu d'effets sur l'incertitude finale qui est évaluée à U=0,08" (k=2). A ce stade, il est nécessaire et indispensable de valider ces résultats et les incertitudes associées par des comparaisons avec d'autres laboratoires ayant des performances équivalentes. C'est une des raisons des comparaisons

internationales régulièrement réalisées au niveau européen (EUROMET) ou mondial (Comparaisons clés du BIPM). Notre laboratoire a participé à ces deux types de comparaisons, la première ayant eu lieu en 1996-1999, la seconde est en cours de dépouillement.

Libellé de x_i	$u(x_i)$ en "
Répétabilité de mesure (angle entre deux faces)	0,014
Correction de justesse du Double Codeur	0,020
Répétabilité du Double Codeur	0,005
Erreur de Justesse de la lunette	0,010
Position lunette / plateau	0,004
Position polygone / plateau	0,004
Influence planéité des faces / optique lunette	0,020
Stabilité thermique	0,020

Tableau 1 : Incertitudes type d'une mesure de polygone

La campagne d'intercomparaison EUROMET 371 consistait dans la mesure de deux polygones en position normale et en position retournée [1]. Nous ne présenterons dans la suite que les mesures du polygone à 24 faces qui permet de qualifier plus finement les résultats.

Mesure du polygone en position normale

Dans les résultats qui vont suivre, nous avons choisi de ne garder que les participants dont l'incertitude de mesure est cohérente avec la notre à savoir une incertitude type inférieure à ± 0,04". Nous avons ainsi conservé cinq participants, les écarts maximums constatés sur la mesure du polygone en position normale par rapport à la valeur de référence définie par la moyenne de ces quatre participants ne dépassent pas 0,06". Les résultats montrent la cohérence entre les valeurs mesurées et les incertitudes estimées par ces cinq participants (Figure 8).

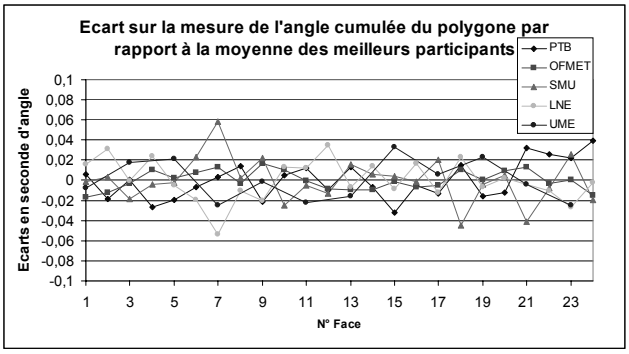

Figure 8 : Ecarts par rapport à la valeur de référence

Ces cinq laboratoires se détachent des autres participants, qui voient leur écart-type par rapport à la valeur de référence précédemment définie, réparti de 0,05" à 0,4".

Mesure de la position retournée du polygone

Pour la mesure du polygone en position retournée, la même analyse peut être conduite (Figure 9). La cohérence entre les résultats de la mesure en position normale et retournée varie sensiblement entre les laboratoires. Au préalable, il est à noter que l'incertitude sur ces valeurs différence doit être augmentée d'un facteur multiplicatif de $\sqrt{2}$ puisqu'elles sont obtenues à partie de deux mesures indépendantes du même polygone. Le SMU a une très bonne cohérence, ce laboratoire a utilisé un goniomètre laser comme étalon angulaire. Les quatre autres laboratoires utilisent une lunette autocollimatrice ELCOMAT HR. Le BNM-LNE a des écarts très proches du SMU excepté sur la face N°12. Les écarts importants, vis-à-vis des incertitudes de mesures estimées pour la mesure du polygone, ne semblent pas avoir pour origine les plateaux utilisés mais plutôt l'acquisition des normales au plan optique des faces du polygone. Il semble que le goniomètre laser soit moins sensible aux défauts de planéité des faces que les lunettes autocollimatrices. La signature de ces dernières sur les mesures, étant liée aux défauts de leur optique, varie sensiblement d'un appareil à un autre pour le même type et le même fabricant.

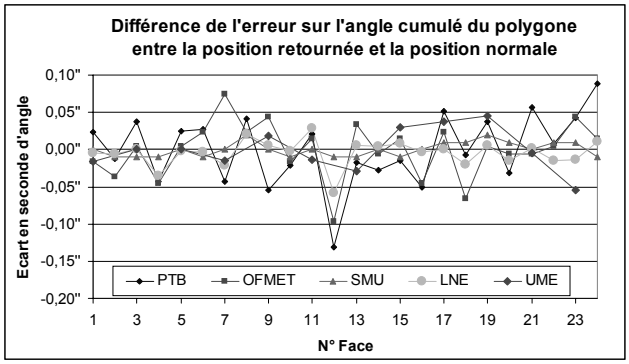

Figure 9 : Cohérence en position normale et retournée

Ces constatations expérimentales montrent les limites de l'utilisation de polygones optiques pour la qualification des systèmes de mesures angulaires. L'incertitude constatée, liée à l'utilisation des polygones optiques et des systèmes de visée actuels, peut être estimée à ± 0,03" alors que la qualité intrinsèque des systèmes de mesures angulaires semble être inférieure à ± 0,01".

Conclusion

Le plateau de référence du BNM-LNE offre des performances comparables aux meilleurs laboratoires nationaux européens pour la mesure des polygones angulaires. Il recèle encore un fort potentiel d'amélioration. En particulier, l'évaluation fine du comportement des codeurs et leur modification sous réserve de collaboration avec le fournisseur doivent permettre de réduire le niveau des erreurs résiduelles.

Les résultats de l'intercomparaison montrent que l'utilisation de polygones angulaires ne permet pas d'atteindre un niveau d'incertitudes inférieur à 0,02 seconde d'angle. Pour s'affranchir de l'utilisation d'un étalon de transfert, il est envisageable de réaliser un étalonnage réciproque de deux plateaux par multi–retournement et ainsi évaluer la référence avec un niveau d'incertitudes cohérent à elle-même. Le plateau de référence du BNM-LNE a été conçu avec cette intention, cela relève toutefois d'un programme de recherche complémentaire.

Références

[1] R. Probst et R. Wittekopf, "Report on EUROMET Project 371 – Angle Calibration on Precision Polygons" Juillet 1999.

[2] E.W. Palmer, "Goniometer with continuously rotating gratings for use as an angle standard", Precision Engineering, Vol.10, N°3, pp. 147-152, Juillet 1988.

[3] J.M. David et T. Coorevits, "Les limites de la correction par logiciel des erreurs de géométrie des M.M.T. – Définition d'une architecture nouvelle de machines", dans Actes du 6ème congrès International de Métrologie, 1993.