

Application d'une nouvelle conception d'architecture à une machine de mesure de résolution nanométrique

Application of a new architecture design to a measuring machine with a nanometric resolution

Ludovic LAHOUSSE¹, Jean DAVID¹, Stéphane LELEU¹, Georges-Pierre VAILLEAU² et Sébastien DUCOURTIEUX²

¹ Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers, 8 Boulevard Louis XIV, 59046 Lille cedex, France, jean.david@lille.ensam.fr.

² Laboratoire national de métrologie et d'essais, 1 rue Gaston Boissier, 75724 Paris Cedex 15, France, georges.vailleau@lne.fr.

Résumé

L'objectif de cet article est de présenter des **concepts originaux** apportant un progrès dans la maîtrise des incertitudes des machines à mesurer. Ces concepts ont été élaborés à partir de l'analyse des phénomènes limitant la précision des machines construites autour de principes d'architecture classiques. Une machine en cours de développement présente une matérialisation concrète de ces concepts.

La machine développée, dans le cadre d'un projet commun au Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) en collaboration avec le Laboratoire de Métrologie et de Mathématiques Appliquées, (L2MA) de l'ENSAM de Lille constitue le pivot du développement d'une activité de « Nanométrie ». Elle est définie comme une machine de mesure tridimensionnelle dont l'étendue de mesure suivant les axes X et Y est de 300 mm pour 50 μm suivant l'axe Z. L'incertitude visée est de 10 nm dans la direction X ou Y et de 2 nm dans la direction Z. Ces incertitudes seront garanties pour un déplacement de 10 mm sur l'objet. Elles sont portées à respectivement 50 nm et 10 nm pour une distance correspondant à l'espace de mesure de la machine.

Les possibilités offertes par les technologies disponibles mises en œuvre dans les architectures classiques de machines ne permettent pas la réalisation d'une machine répondant à un tel niveau d'exigence. C'est pourquoi nous développons un nouveau principe d'architecture que nous désignons par l'expression « structure métrologique dissociée » dans laquelle la position relative des éléments de la machine est repérée par le moyen de capteurs, coopérant à la connaissance de la position réelle du solide outil par rapport à l'espace lié à la pièce. Cette connaissance s'appuie sur l'exploitation de mesures et de données d'un ensemble d'éléments localisant l'outil par rapport à la pièce. Ces éléments participant à la précision et qui constituent la « chaîne métrologique »

sont alors déchargés de toute fonction de support et peuvent donc être optimisés avec comme unique contrainte leur stabilité de forme. La fonction support est assurée par une structure auxiliaire qui ne nécessite pas une qualité aussi fine que le niveau de performance de la machine. Le système de traitement d'information permet de suivre un grand nombre de capteurs. La gestion de la redondance des informations permet d'affiner la précision et d'apporter en temps réel une estimation de l'état de la machine.

MOTS CLÉS : NANOMÉTROLOGIE, CHAÎNE MÉTROLOGIQUE, CONCEPTION DES MACHINES À MESURER, STRUCTURE MÉTROLOGIQUE DISSOCIÉE.

Abstract

*The purpose of this paper is to present **original concepts** offering an uncertainty control advancement for measuring machines. Those concepts were developed from the analysis of phenomena that reduce the machine accuracy constructed around principles of standard architecture. A machine being developed is a concrete materialization of those concepts.*

The machine developed is at the heart of the development of a « Nanometrology » activity, in the context of a joint project of LNE in collaboration with the Applied Mathematics and Metrology Laboratory, (L2MA) of the Ecole nationale supérieure d'arts et métiers in Lille.

It is defined as a three-dimensional measurement machine with a range of measurements via X and Y axes which is 300 mm and 50 μm via Z axis. The targeted uncertainty is 10 nm in X or Y direction and 2 nm in Z direction. Those uncertainties are guaranteed for a 10 mm

displacement on the item. They respectively reach 50 nm and 10 nm for a distance corresponding to a measurement space of the machine.

The opportunities offered by the available technologies implemented in the standard architectures of machines make not possible the creation of a machine that meets such a requirement level. This is why we are developing a new principle of architecture that we name "dissociated metrological structure". In this structure, the relative location of the machine components is located by using sensors that help know the real location of the viable measuring sensor with respect to the space linked to the measured product. Those components which participate in the accuracy and constitute the « metrological chain » are then free out of any support and may be optimised, and the only requirement is the stability of shape. Support function is ensured by an ancillary structure that does not require a quality which is as accurate as the performance level of the machine. The information processing system enables to monitor many sensors. Managing the redundancy of information components enables to refine the accuracy and precision and to make real-time estimates of the condition of the machine.

KEY WORDS: NANOMETROLOGY, METROLOGICAL LOOP, DESIGN OF PRECISION MEASURING MACHINE, DISSOCIATED METROLOGICAL STRUCTURE.

1. Introduction

1.1. Le projet nanométrie du LNE

Ce projet vise à développer une machine innovante capable de mesurer des objets tridimensionnels relativement grands (jusqu'à trente centimètres) avec de très faibles incertitudes (nanométriques). Les objectifs de ce projet sont :

- d'offrir la possibilité de qualifier des étalons avec un rattachement à l'étalon national de longueur ; le but de ces étalons est de permettre à une industrie comme la fabrication de semi-conducteurs de maîtriser et de développer ses processus industriels d'un point de vue dimensionnel en relation avec une référence fiable ;
- de participer au développement des procédures normatives et des futurs étalons de référence adaptés aux besoins industriels ;
- de collaborer avec les autres laboratoires nationaux de métrologie de façon à échanger, enrichir et diffuser les connaissances relatives à ce domaine ;
- d'apporter un soutien au développement des activités de nanotechnologie, telles que les micro-machines ou MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*).

Parallèlement à ces objectifs le projet doit concrétiser la recherche de progrès dans la maîtrise de la très haute précision à travers la réalisation de guidages d'extrême qualité. Une déclinaison de ces principes est envisageable pour aboutir à des machines de très haute précision susceptibles de mesurer des étalons dimensionnels classiques.

1.2. Procédé développé

Le projet « nanométrie » s'articule autour de la réalisation d'un nouvel instrument de mesure. Cette machine assure les fonctions d'une machine de mesure tridimensionnelle spécialisée dans la mesure d'objets plats comme les masques qui sont les outillages fondamentaux

de l'industrie des semi-conducteurs. Cette machine a une étendue de mesure de 300 mm suivant les axes X et Y et de 50 μm suivant l'axe Z. Les incertitudes horizontales visées suivant X ou Y sont de 10 nm pour un déplacement de 10 mm et 50 nm pour un déplacement de 300 mm. L'incertitude verticale visée suivant l'axe Z sera de 2 nm tant pour un déplacement de 10 mm en X, Y (rectitude X, Y) que pour un déplacement de 50 μm en Z. L'instrument de palpement actuellement choisi pour équiper notre machine est un microscope à force atomique (AFM), mais nous nous laissons la possibilité d'adapter tout autre système de palpement.

Un développement futur prévoit l'adjonction d'un axe vertical de 50 mm de course associé à un palpeur spécifique ce qui permettra de vérifier les étalons classiques, de type « bague étalon » d'une façon complète, visant à obtenir sur ces étalons tridimensionnels une qualité de mesure correspondant à celle apportée par le contrôle interférométrique direct des cales étalon.

2. Une conception nouvelle en vue de la réalisation de machines précises

Dans cet article, nous analyserons rapidement les origines des erreurs de géométrie et la limite de leur correction dans les architectures de machines classiques. Nous proposerons une disposition nouvelle qui permet d'éviter une grande part des erreurs citées et d'améliorer l'exploitation du potentiel apporté par la correction informatique. Cette technique a déjà été éprouvée par le LNE sur un guidage en rotation, système de base du plateau angulaire, référence nationale [1]. Dans ces travaux, nous étendrons l'emploi de ce concept au balayage d'un espace tridimensionnel. Nous présenterons également quelques précautions pratiques employées pour éviter les perturbations, principalement d'origine thermique, qui sont beaucoup plus sensibles dans le cas d'une structure cartésienne que dans le cas de la structure presque axisymétrique du plateau de référence.

2.1. Analyse des machines de précision classiques

Dans la famille des machines industrielles, on peut distinguer les machines de production destinées aux opérations de fabrication et les machines de mesure, destinées au contrôle. Le rôle de ces deux types de machines est légèrement différent. En effet dans une opération de fabrication, on vise souvent en présence d'efforts à réaliser le plus parfaitement possible la mise en place de l'outil par rapport à la pièce, alors que, dans une action de vérification ou de contrôle, on peut être conduit à se contenter de « constater » simplement cette position relative, avec en général un niveau d'incertitude plus fin. En fait ces deux types de machines ont le même but à savoir la maîtrise de la position d'un objet « outil » par rapport à un référentiel lié à l'objet « pièce ». Leurs architectures de conception sont souvent similaires avec une exigence de résultat souvent plus fine pour les machines de mesure.

2.2. Générateur de position

On peut analyser une machine comme un générateur de positions et de déplacements dans laquelle la position relative de l'outil par rapport à la pièce doit être maîtrisée. La réalisation de cette position relative, dans les machines classiques, fait toujours appel à une « chaîne d'éléments » qui assure également le repérage relatif de position. Cette chaîne est habituellement constituée de solides et de liaisons. Dans cette analyse nous l'appellerons « chaîne métrologique ». Cette chaîne est fondamentale, car c'est elle qui supporte et transmet l'information de position relative entre l'outil et la pièce.

2.3. Notion de chaîne métrologique

2.3.1. Chaîne série

On recense deux types d'architectures. Le premier type est l'architecture à chaîne série (fig. 1) dans lequel on trouve la majorité des machines existantes. Leur structure est réalisée par l'empilement en série de systèmes permettant chacun d'obtenir, en principe un degré de liberté, translation ou rotation.

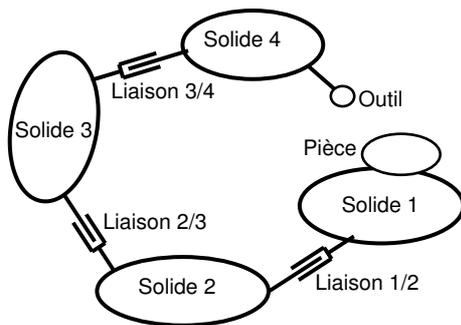


Fig. 1. – Architecture à chaîne série.

L'empilement de modules rend la structure complète peu rigide. Le pilotage des déplacements est aisé pour une machine cartésienne 3D et reste relativement simple si la machine comporte des mouvements de rotation.

2.3.2. Chaîne parallèle

Le deuxième type est l'architecture à chaîne parallèle (fig. 2) assez voisine des structures de robots du même nom et qui présente un certain nombre d'intérêts, en particulier sur le plan de l'économie de réalisation, légèreté et rigidité. En effet leur structure est généralement composée d'un seul étage avec la mise en œuvre de plusieurs liaisons identiques, ceci permet de faire varier six degrés de liberté. Leur pilotage est plus complexe du point de vue du calcul d'un déplacement et ne peut se passer des fonctions offertes par un calculateur. C'est une structure idéale pour réaliser matériellement des corrections de position suivant les 6 degrés de liberté, par exemple. Elle permet en principe d'éviter la sommation brute des erreurs de chaque liaison et d'éviter de superposer des flexibilités.

L'analyse des limites de précision d'une machine, qu'elle soit à chaîne série ou parallèle passe par l'analyse

de la chaîne métrologique. En effet chaque défaut élémentaire présent dans les éléments constituant les chaînes métrologiques limitera la précision finale de la machine.

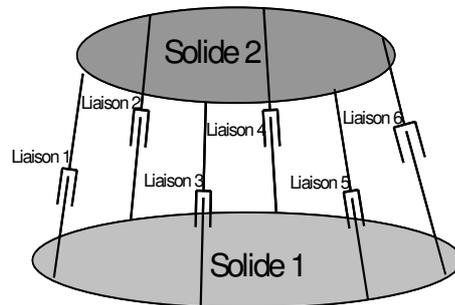


Fig. 2. – Architecture à chaîne parallèle.

La notion de chaîne métrologique étant définie, il est nécessaire de dresser l'inventaire et de classer les sources pouvant la perturber.

2.4. Sources d'erreurs diminuant la précision

Les chaînes métrologiques comportent des éléments de référence, systèmes de mesure et surfaces de guidage, ces éléments sont susceptibles de comporter des erreurs, en général assez stables, leur comportement étant proche de celui d'un solide.

Les erreurs de guidage peuvent correspondre à des imprécisions sur la réalisation initiale des pièces constituant la chaîne mais peuvent aussi provenir de déformations liées aux efforts supportés par ces éléments. Une source importante et méconnue d'erreur de forme réside dans la non-homogénéité de la température des éléments provoquant alors des effets de type « flexion de bilame ».

2.5. Liaisons entre éléments

Pour constituer une chaîne comme décrit précédemment, les solides doivent être réunis par des systèmes de liaison permettant de maîtriser la position relative de deux éléments adjacents. Ces systèmes constituent les « guidages » de la machine et sont les éléments les plus délicats dans la constitution de la chaîne métrologique.

Un guidage élémentaire correspond à la mise en contact de deux surfaces, une surface de glissière et une surface de chariot. Cette mise en contact constitue un problème technologique majeur qui conditionne la précision finale à laquelle on peut espérer aboutir. La correspondance parfaite des surfaces d'appui est difficile à réaliser et surtout à garantir. La recherche d'une cohérence par la voie d'une liaison isostatique conduit à de fortes pressions de contact favorisant l'usure et à une faible rigidité. Le renforcement des zones de contact rend la liaison hyperstatique. Une telle situation rend complexes les conditions de conjugaison des surfaces et peut être

source d'apparition de forces internes importantes. Malgré ces inconvénients le caractère hyperstatique d'une liaison est susceptible d'apporter des avantages importants. Il faut cependant savoir prendre des précautions nécessaires pour maîtriser les efforts internes susceptibles de se développer au niveau des contacts. On peut alors profiter d'une meilleure rigidité de la liaison, plus homogène dans toutes les directions. Le deuxième avantage de l'hyperstaticité tient dans un effet de « moyennage » des données. En effet un système mécanique contraint prend spontanément une position d'équilibre correspondant à un minimum d'énergie de déformation élastique proche d'une solution obtenue par des méthodes de résolution aux moindres carrés.

Un point important, dans la qualité des guidages réside dans la modération des efforts de frottement, surtout dans le cas de guidages hyperstatiques. On obtient cette propriété en interposant entre les surfaces un élément intermédiaire soit par le moyen d'éléments roulants, soit par celui d'un fluide maintenu en place par un gradient de pression résultant d'une source extérieure ou bien même du simple mouvement relatif des surfaces.

La présence de ces éléments intermédiaires dont la rigidité locale est relativement faible assure la fonction « moyennage » citée plus haut.

2.6. Problème particulier lié aux éléments roulants

Les éléments roulants présentent pour la très haute précision, c'est-à-dire dont le niveau d'exigence réelle est de l'ordre du défaut de forme des éléments roulants, un inconvénient très grave : leur position n'est pratiquement pas reproductible, ce qui rend les erreurs de géométrie non répétables. Le mouvement d'une bille comporte souvent une composante de vissage qui s'ajoute au mouvement de roulement, l'aller et retour du mouvement ne donnent pas forcément des mouvements inverses aux éléments roulants. Dans le cas des guidages en rotation, la configuration réelle du système pour deux tours consécutifs est très différente.

Pour citer un exemple concret, la vérification d'un codeur de rotation dont l'exactitude dépend de la qualité du pivot à roulement qui sert à guider le disque gradué par rapport au support de la tête de lecture, à dû être effectuée sur 7 tours consécutifs. L'erreur sinusoïdale de période 1 tour, caractéristique de ce type d'élément peut présenter une amplitude variant du simple au double lorsque le codeur a effectué trois tours de rotation.

Un défaut caractéristique des guidages comportant des éléments roulants correspond à une ondulation dont la longueur d'onde est de l'ordre de grandeur du périmètre des éléments roulants. Le remplacement des éléments roulants par l'interposition d'un film fluide permet de filtrer les défauts en établissant une moyenne de forme sur l'ensemble des surfaces en regard dans d'excellentes conditions de répétabilité et de continuité. Par contre ces systèmes posent le problème de l'alimentation et de la récupération du fluide utilisé.

2.7. Améliorer une qualité de guidage ou bien compenser les défauts ?

Dans la mesure où les erreurs des systèmes de mesure et des références métrologiques présentent un caractère permanent, on peut envisager de les corriger. Des déformations de glissières ou même des dispositifs mécaniques relativement complexes peuvent contenir l'information nécessaire. Cependant il est difficile de stocker de cette façon une information correspondant à un espace à plus d'une dimension. La présence d'une fonction informatique qui existe maintenant dans toutes les machines facilite la réalisation de ces corrections en lui donnant beaucoup de souplesse. On peut même maintenant, tenir compte en temps réel d'informations issues de capteurs.

Nous jugerons les erreurs affectant les machines en fonction de la capacité des moyens disponibles pour les corriger.

Le premier critère permettant d'envisager l'application d'une méthode de correction est la permanence des valeurs à corriger. Ainsi, il est assez facile de corriger par une modélisation simple, faisant appel au torseur de petits déplacements dans le cas de solides indéformables l'effet de l'erreur de position d'un chariot. Une telle modélisation permet de corriger la position d'un point quelconque de l'espace lié au chariot étudié. Ceci permet de prévoir la correction d'une machine avec une configuration de travail et d'outillage pas encore définie au moment de l'acquisition des informations. Ce type de correction, devenue classique a été réalisé sur une machine de mesure tridimensionnelle en juillet 1980 dans notre laboratoire.

2.8. Limite de la correction

La non-permanence des défauts à corriger peut provenir de sources diverses, nous pouvons citer principalement :

- l'usure lente des surfaces de glissière ;
- l'usure ou la variation rapide de configuration non maîtrisée des dispositifs technologiques de guidage, principalement sur les types de guidages comportant des éléments roulants ;
- les déformations des surfaces de référence sous l'action d'effets liés aux forces transmises, on distinguera dans ces forces :
 - a. le poids des éléments de la machine, qui présente une certaine stabilité,
 - b. les effets des accélérations correspondant aux vibrations de l'environnement de la machine impossibles à prévoir ;
- les déformations sous l'effet de variations de température des éléments de la machine. Nous distinguerons, dans ces effets, ceux de la dilatation « homothétique » relativement bien connue, qui s'applique en particulier aux étalons de longueur et ceux qui, beaucoup plus complexes à étudier correspondent à des non-homogénéités de la

température régnant au sein des éléments de structure de la machine et entraînant des flexions des éléments élancés. Nous désignons ces déformations par le terme de « flexion de bilame ».

2.9. Correction des erreurs

Pour obtenir une machine de haute précision on doit être capable de corriger toutes les erreurs citées auparavant. En fait la limitation de précision d'une machine vient de la capacité à modéliser et acquérir la description des défauts. On comprend facilement que certains défauts soient extrêmement difficiles à corriger. En effet il est très difficile voire impossible de prévoir la correction d'un défaut qui n'est pas évaluable à l'avance comme par exemple une erreur due à des vibrations extérieures. On peut par contre envisager l'implantation de capteurs susceptibles d'acquérir, en temps réel des informations qui permettront de corriger, au moins partiellement une partie des perturbations.

En conclusion pour obtenir une machine de haute précision on doit nécessairement la concevoir en la rendant le moins sensible possible aux erreurs non répétables et non descriptibles. Nous allons donc maintenant poser des principes de conception afin de corriger, d'éviter ou de minimiser les erreurs présentées précédemment.

3. Nouveau principe de conception

3.1. Principe de « structure métrologique dissociée »

Le principe de la « structure métrologique dissociée » [2] que nous présentons ici consiste à séparer la chaîne métrologique qui assure la fonction repérage métrologique de la chaîne de solides, qui assure le déplacement, le positionnement et le support de l'échantillon. La mise en œuvre de ce principe conduit alors à spécialiser dans un rôle de « transfert des informations de position », les éléments assumant un rôle dans la précision de la machine en leur évitant de transmettre des efforts. Ces éléments ne subissent alors que les efforts liés à leur propre masse à l'exclusion d'efforts provoqués par les autres éléments.

La chaîne métrologique est constituée d'éléments solides, dont la position relative est repérée par le moyen de capteurs. Ces éléments solides doivent assurer deux fonctions, l'une consiste à « transmettre des positions », l'autre à supporter les surfaces qui constituent les « références de déplacement » assumant le rôle que tiennent les surfaces de glissières dans les guidages des machines classiques. Les capteurs dont le corps est lié à un solide localisent ce solide par rapport aux surfaces de référence portées par le solide voisin dans la chaîne.

Il n'est pas indispensable que les surfaces de référence soient géométriquement parfaites. Du point de vue de la stratégie de correction de géométrie, on traitera en parallèle d'une part des informations enregistrées, caractérisant les formes réelles des surfaces de référence assumant le rôle des glissières ainsi que les erreurs des

étalons de mesure et d'autre part, des informations acquises en temps réel provenant des capteurs judicieusement disposés. Au moment de l'exploitation de la machine, on superpose linéairement les effets de ces deux sources d'information.

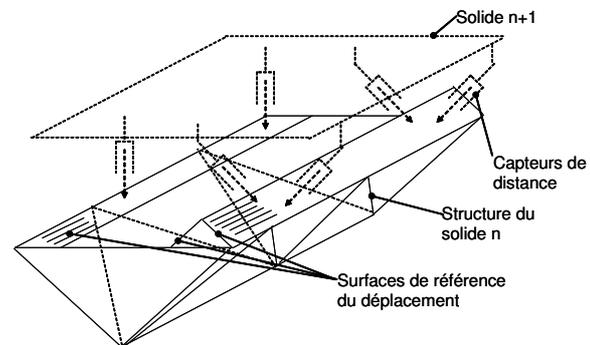


Fig. 3. – Exemple de « glissière métrologique » assurant la fonction de repérage métrologique assurée par une glissière linéaire.

Dans une machine classique, l'état géométrique réel des éléments physiques constituant la liaison de contact entre un solide et la surface matérialisant une glissière est souvent difficile à maîtriser et à prévoir [3]. Il est alors possible de dire que les capteurs que nous prévoyons à la jonction entre les éléments constituant la chaîne assurent la fonction « repérage » des guidages par le moyen d'une simple information de position relative [4], [5].

La chaîne métrologique est, de ce fait, par construction incapable de se supporter. Il est donc nécessaire de l'associer à une structure « porteuse » très proche d'une machine de conception classique qui est réalisée avec des exigences nettement moindres par rapport aux objectifs visés. Chaque élément de cette structure a pour fonction de supporter l'élément correspondant de la chaîne métrologique.

La liaison entre ces deux éléments doit être suffisamment découplée pour ne pas imposer à l'élément métrologique des déformations provenant de la mise en charge de l'élément porteur. Il peut s'agir d'une liaison isostatique exerçant des efforts correspondant au simple maintien en position des éléments de la structure métrologique. Les points de liaison sur l'élément métrologique seront disposés d'une façon optimisée pour minimiser les déformations induites en particulier sous les effets de forces d'inertie résultant d'une ambiance vibratoire. On pourrait même envisager une liaison incomplètement rigide, de type suspension élastique amortie, ce qui permettrait de diminuer les effets des vibrations en les filtrant. La souplesse introduite dans ce type de solution ne doit cependant pas permettre des libertés de mouvement susceptibles de conduire à des étendues de mesure de capteurs de liaison trop grandes, ce qui aurait pour inconvénient de limiter leur précision.

Pour bien illustrer ce principe, nous présentons ci-dessous sa matérialisation sous forme de schémas simplifiés qui montrent l'évolution de la conception d'une

machine liée à la mise en œuvre progressive du concept présenté.

3.2. De la glissière classique à la structure métrologique dissociée

3.2.1. Glissière classique

La glissière classique subit des efforts, ce qui entraîne des déformations élastiques ou même permanentes des éléments constitutifs de la machine.

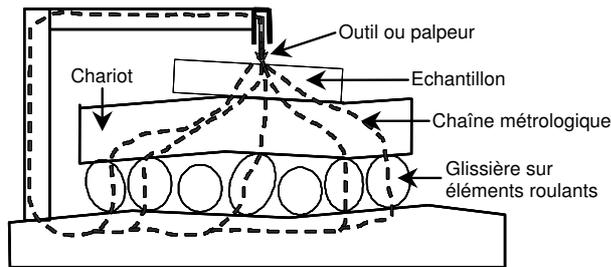


Fig. 4. – Structure classique.

La « non-répétabilité » liée en particulier à la présence d'éléments roulants compromet la possibilité de corriger convenablement l'effet des défauts de géométrie des éléments de guidage dont la reproductibilité de position entre les faces de glissières ne peut absolument pas être garantie. Dans le cas d'un guidage circulaire à roulements, l'ensemble des éléments roulants tourne en gros deux fois moins vite que l'élément tournant. Nous avons cité dans le chapitre précédent le cas des roulements contenus dans les codeurs de rotation. Le chariot, posé sur des éléments roulants, subit lui-même des variations importantes de répartition des forces qui le soutiennent, ce qui conduit à le déformer d'une façon mal maîtrisée et variable.

3.2.2. Glissière porteuse associée à une structure de repérage

On prévoit d'assurer le repérage du chariot porte-pièce par un ensemble de capteurs mis en face de surfaces de référence, les capteurs étant attachés au solide porte-pièce (la situation inverse est possible).

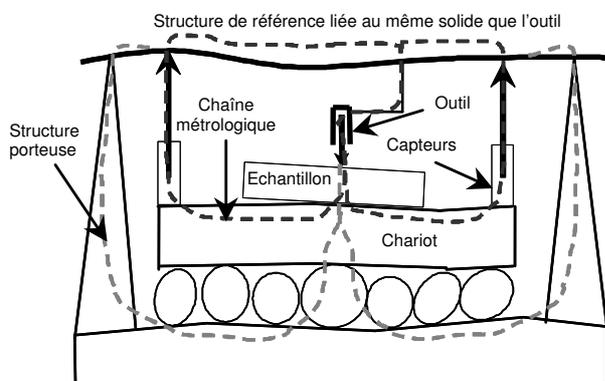


Fig. 5. – Structure classique avec repérage.

L'erreur de mise en position due aux défauts des éléments de guidage est toujours présente mais elle est parfaitement connue par le moyen des capteurs. Il faut cependant prévoir une table de correction décrivant les défauts de forme de la référence matérialisant le déplacement. Cette correction correspond parfaitement, du point de vue conceptuel à la correction d'erreurs décrite au chapitre précédent.

La position du solide porte pièce par rapport à l'outil est connue à partir des indications des capteurs. La non répétabilité des capteurs et la déformabilité de la structure mobile du chariot limitent encore l'exactitude de la connaissance du positionnement de l'échantillon. La chaîne métrologique se trouve réduite.

3.2.3. Éviter de déformer le solide porte pièce

Le solide porte-pièce subit des déformations du fait du déplacement des éléments roulants qui modifient la répartition des efforts appliqués sur cet élément. De ce fait, la liaison métrologique entre l'objet mesuré et les capteurs se trouve perturbée. On peut alors envisager l'installation d'une « fausse-table » liée à la partie supérieure du chariot. Cette fausse table, liée au chariot par une liaison convenable supporte la pièce et les capteurs. De cette façon, les capteurs et la pièce sont liés au même solide qui reste indéformable.

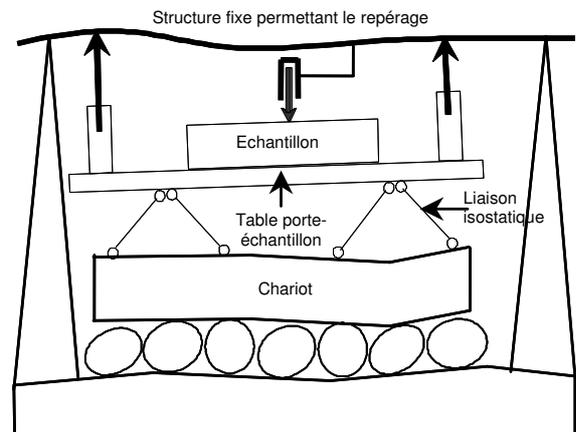


Fig. 6. – Structure métrologique dissociée sans correction de position.

Cette liaison devra être au plus isostatique. Ses points d'attache devront être judicieusement disposés pour minimiser les effets des déformations dues aux forces variables, par exemple les forces d'inertie exercées sur la fausse-table porte-pièce. De cette façon, la pièce n'est pas exactement à la position demandée, mais on peut connaître parfaitement la position réellement obtenue. L'indéformabilité totale de cette « fausse table » n'est pas impérative. Elle peut, en particulier subir des déformations du fait du poids de l'échantillon posé dessus. On exige seulement, de cette table, de conserver la même forme pendant son utilisation. Cette condition est facilement remplie pour une table qui conserve la même attitude par rapport à la direction de la pesanteur.

Le cas de glissières circulaires d'axe de rotation horizontal présente des difficultés particulières décrites dans la thèse de Stéphane Leleu [1].

3.2.4. Correction de la position par actionneurs sous contrôle du système de repérage

L'erreur de position est corrigée par asservissement si le support isostatique est rendu actif. Les actionneurs qui sont incorporés dans le dispositif de support sont commandés à travers un asservissement qui agit en fonction des indications des capteurs de repérage.

La précision du positionnement est alors limitée par :

- la précision des capteurs ;
- la capacité des actionneurs à réaliser des déplacements de faible amplitude ;
- le niveau de connaissance des formes des pistes visées.

On obtient alors exactement la position voulue.

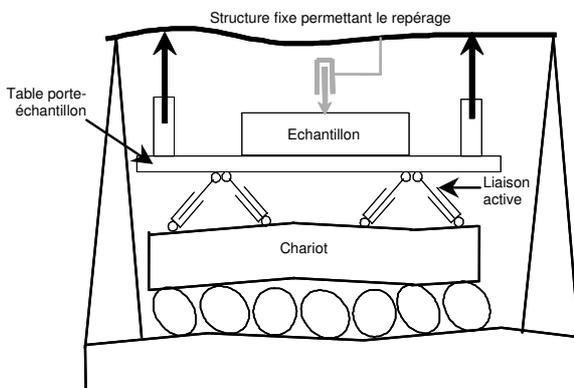


Fig. 7. – Structure métrologique dissociée avec correction active de position.

3.3. Avantages du principe dit de structure métrologique dissociée

3.3.1. Avantages liés à la redondance des informations

Un point essentiel apporté par ce concept est qu'il permet de prévoir un système de capteurs surabondants, ce qui apporte les avantages déterminants qui sont :

- la redondance « spatiale » de l'information de position. On peut obtenir la position relative des solides par un traitement aux moindres carrés des mesures données par les capteurs, ce qui affine les incertitudes. On bénéficie ainsi des avantages d'un système d'appui hyperstatique sans avoir à en supporter les inconvénients ;
- l'analyse des incohérences entre les indications données par les différents capteurs peut conduire à une évaluation permanente de l'état de la machine, tant sur la qualité des étalonnages des références que sur le fonctionnement des chaînes de mesure. Ce fait apporte un signal d'alarme instantané en cas d'apparition d'un défaut qui peut être soudain, on pense par exemple à une collision accidentelle. Dans le cas d'une simple

dégradation des conditions d'environnement, la machine reste utilisable, et on dispose d'un ordre de grandeur des incertitudes entraînées par la dégradation en cause. Il est du plus grand intérêt de disposer d'un signal d'alarme sans à avoir à attendre l'étalonnage ou la vérification périodique à venir ;

Un avantage important, lié à la surabondance de capteurs intervient totalement si l'on étend la redondance en doublant l'indicateur de déplacement le long du mouvement considéré. En effet, cette duplication qui ne présente plus un surcoût considérable grâce aux progrès des technologies permet de se mettre dans une situation de respect parfait du principe d'Abbe par reconstitution. Cette situation réduit sensiblement l'incertitude propre du système de mesure et évite une grande partie de l'incertitude due à la machine elle-même. Elle permet, en particulier de reconstituer un principe d'Abbe parfait.

La surveillance de la cohérence entre les deux indicateurs permet de détecter en temps réel une défaillance ;

- l'élimination des effets d'hystérésis : dans une machine classique, les changements de sens des déplacements conduisent à modifier les conditions d'équilibre des contacts dans les liaisons glissières, ce qui aboutit à deux positions d'équilibre différentes suivant le sens d'arrivée. Un effet d'hystérésis souvent important intervient donc dans les imprécisions de la machine. Les capteurs de mesure présentent un effet d'inversion nul ou très faible, cet effet d'hystérésis se trouve donc pratiquement éliminé.

3.3.2. Avantages sur le comportement dynamique

Cette structure permet de rendre les éléments métrologiques légers, peu sensibles aux vibrations et aux déformations thermiques. L'information de position n'est plus donnée par la structure mécanique mais par une chaîne de capteurs, de structures et de références qui constituent la structure métrologique dissociée.

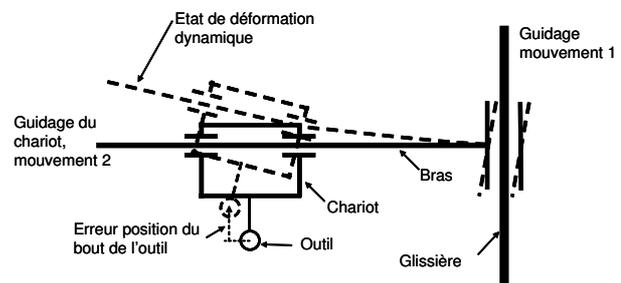


Fig. 8. – Schéma d'une machine comportant un chariot sur un bras en porte-à-faux.

Les structures et les références ne supportent pas d'autres efforts que leur propre poids et les forces d'inertie. Leur système de mise en position peut être organisé de façon à optimiser leur comportement dynamique. Cet avantage est très sensible dans le cas des

machines comportant des porte-à-faux importants, comme le montre l'exemple suivant.

On considère une machine comportant un chariot guidé sur un bras en porte-à-faux (mouvement 2), le bras se déplaçant lui-même dans un mouvement 1 (fig. 8). Ce cas, assez fréquent est très sensible aux problèmes dynamiques. Le tracé en pointillés montre les effets d'une déformation dynamique, résultat de la flexion du bras et de la déformation du système de guidage.

La figure 9 montre une adaptation du principe de structure métrologique dissociée à cette partie de la machine.

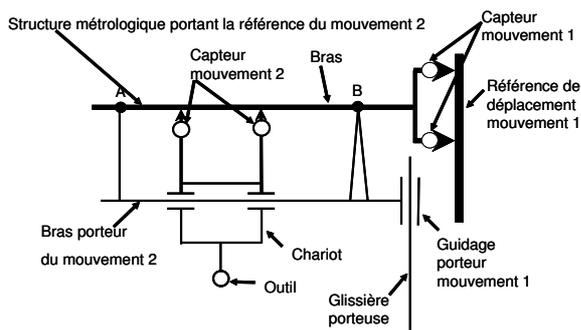


Fig. 9. – Application du principe de structure métrologique dissociée à la machine précédente.

On remarque que la structure métrologique représentative du bras, dans l'application de ce principe, n'est plus tenue par un simple encastrement d'extrémité mais est maintenant tenue en deux points A et B (fig. 9). Cette liaison en deux points permet de rendre cette structure métrologique beaucoup moins sensible, d'une part aux effets des accélérations accompagnant les mouvements de la machine et d'autre part aux effets dus aux vibrations de l'environnement. L'erreur de position de ce bras, due à la flexibilité de la structure porteuse sera, elle entièrement prise en compte par le moyen des capteurs en regard de la référence de déplacement du mouvement et qui assurent la fonction repérage du mouvement 1.

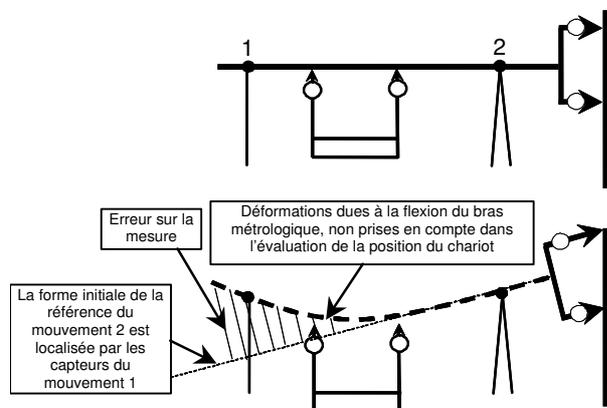


Fig. 10. – Effet d'une déformation dynamique sur le système.

Les déformations de cette structure qui provoqueront des erreurs effectives dans le fonctionnement de la machine correspondent à la déformation de la référence du mouvement 2, dans un espace lié au support des capteurs du mouvement 1.

La figure 10 montre les erreurs provoquées par les déformations de la structure métrologique.

La position des liaisons reliant le bras métrologique à l'élément porteur correspondant peut être soigneusement optimisée pour minimiser ces déformations. Dans la recherche de la meilleure position des liaisons de maintien, les indications apportées par le calcul en éléments finis constituent un apport important, comme le montre l'exemple de la figure 11. On voit que la liaison définie en B donne le meilleur résultat.

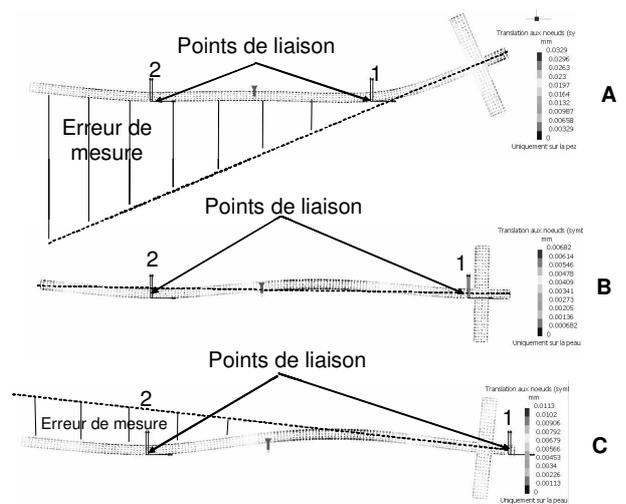


Fig. 11. – Modélisation par éléments finis des déformations en fonction de la position des points de liaison pour un champ d'accélération transversal à la référence.

On peut considérer que cette solution remplace les éléments de guidage, dont le comportement est toujours difficile à prévoir, par des capteurs qui conduisent à évaluer en temps réel la position relative des éléments de la chaîne métrologique. L'utilisation de capteurs sans contact élimine les phénomènes de frottement et d'usure. Elle ouvre considérablement le choix des matériaux utilisables qui n'ont plus besoin de résister à l'usure.

3.3.3. Prise en compte des problèmes thermiques

La chaîne métrologique étant composée de solides, elle reste sensible aux perturbations d'origine thermique, tant sur le plan de la dilatation homothétique liée à une variation de température homogène des éléments que sur celui des effets de type « flexion de bilame » entraînés par des non-homogénéités de température.

Les structures à réaliser, n'ayant aucun effort à transmettre, pourront plus facilement être optimisées vis-à-vis des perturbations thermiques. Les structures pouvant comporter relativement peu de matière, il est plus aisé, dans une certaine limite, d'utiliser des matériaux relativement coûteux.

L'utilisation de capteurs sans contact laisse une plus grande liberté dans le choix des matériaux utilisés pour la réalisation des éléments de référence.

Il est possible de prévenir les effets liés à la non-homogénéité de température en réalisant les éléments avec des matériaux bons conducteurs de la chaleur. On peut même envisager de prévoir une isolation thermique des éléments ; de cette façon, la répartition de température dans l'élément peut rester homogène du fait de la bonne diffusivité thermique du matériau. Il est possible de protéger la structure des perturbations locales grâce à une isolation thermique convenable lui évitant de subir des variations localisées de l'environnement. On peut aussi conditionner la température de ces éléments par la circulation d'un fluide dont la température soit régulée.

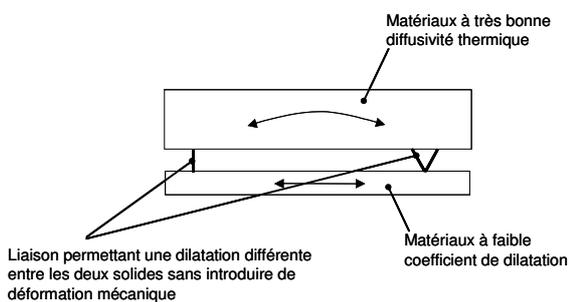


Fig. 12. – Exemple de liaison rigide en flexion et laissant libre la dilatation longitudinale.

Les matériaux présentant rarement de façon simultanée les qualités de diffusivité thermique et de faible coefficient de dilatation, il est envisageable de réaliser des éléments joignant la bonne stabilité en flexion d'une pièce massive en aluminium à la stabilité dimensionnelle longitudinale de pièces réalisées en matériaux à faible dilatation. La liaison entre ces éléments doit être réalisée avec des dispositions permettant le découplage des dilatations de ces deux parties. Cette disposition peut conduire à des économies sensibles sur le prix des matériaux.

Cette disposition sera systématiquement mise en œuvre dans la machine, objet du programme du LNE.

4. Conclusion

Nous avons, dans cet article, présenté les concepts que nous mettons en œuvre pour obtenir des machines de très haute précision. Nous avons présenté les nombreux avantages que ces concepts procurent comme la redondance d'informations, les avantages sur le comportement dynamique ou sur les phénomènes thermiques. Ces concepts ont déjà été éprouvés dans le cadre du LNE sur un guidage en rotation, qui constitue le support du plateau angulaire, référence nationale [1].

Références

- [1] LELEU S., DAVID J.-M., « Conception et réalisation d'un plateau de très haute précision », *Journées de l'ADER*, Lille, juin 1997.
- [2] DAVID J.-M., « Introduction à la structure DMT* », *Rapport interne ENSAM*, mars 1986.
- [3] DONALDSON R. R. et MADDUS A. S., "Design of a High-Performance Slide and Drive System for a Small Precision Machining Research Lathe" *Annals of the CIRP*, Madison, WN, août 1984, (UCRL-90475 Preprint).
- [4] SMITH S. T. et CHETWYND D. G., "Foundations of Ultra-Precision Mechanism Design", *Gordon and Breach*, 1992.
- [5] SUH Nam P., "The Principles of Design", *Oxford University Press*, New York, 1990.
- [6] DAVID J.-M., « Le contrôle de géométrie des machines-outils, un passage obligé pour la qualité », *Séminaire ENSAM*, Cluny, 1993.
- [7] DAVID J.-M. et COOREVITS T., « Les limites de la correction par logiciel des erreurs de géométrie des MMT. Définition d'une architecture nouvelle de machine », *Actes du 6^e Congrès international de métrologie*, Lille, 1993.
- [8] RENAULT AUTOMATION/J.-M. DAVID, « Machine à mesurer par coordonnées », Brevet, *publication n° FR 2627582-19890825*, 1989.

* N.D.L.R. : Le principe de la structure métrologique dissociée a été autrefois appelé principe de structure « DMT ». Cette dénomination était liée à une nomenclature en usage chez l'industriel qui a conçu cette structure, et n'est plus utilisée aujourd'hui.