

HISTORIQUE La métrologie et le contrôle

Depuis toujours, l'homme a cherché à améliorer la qualité et la précision de ses étalons, donc de ses mesures.

Le maître mot est **incertitudes** : Incertitude sur la valeur, incertitude sur la définition, incertitude sur la conservation, incertitude sur l'utilisation d'un même étalon pour tout le monde en des lieux différents.

Tout au long de l'évolution de l'histoire, les hommes se sont attachés à une meilleure définition de ces étalons.

Les égyptiens, les hébreux dans l'antiquité conservaient précieusement leurs étalons dans les temples ou pour les romains dans le temple de Jupiter.

Pus tard, Charlemagne imposa une référence unique la **Toise**.

Mais il faut attendre le 26 mars 1791 pour une unité universelle le **Mètre**.

Dans notre ère industrielle, nous devons beaucoup au Professeur **Henri Tresca** des Arts et Métiers qui présenta le 28 septembre 1889 le premier mètre étalon qui fut déposé au pavillon de Breteuil où il est toujours conservé.

Rappel :

La référence actuelle définie par la 17^{ème} Conférence Générale des Poids et Mesures en 1983, est: ..." la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant $1/299\,792\,458$ ème de seconde ".

Cette nouvelle définition permet aux laboratoires primaires de donner la valeur du mètre avec une incertitude sur la valeur théorique inférieure au dixième de nanomètre.

Cette lente évolution montre le souci constant de minimiser les erreurs de mesure, on peut parler d'incertitudes par les métrologues .

Définitions fondamentales :

On définira la métrologie comme la science de la mesure [22]

On peut parler aussi de sciences des incertitudes

Et le résultat d'une mesure comme la somme d'une valeur réputée vraie et d'une incertitude. [12], [28].

1-2-BIBLIOGRAPHIE

Etat de l'Art

Combien d'opérateurs font-ils du contrôle sans faire de la métrologie ?

Le contrôle est nécessaire car il permet de vérifier si une cote, une dimension, sont dans l'intervalle de tolérances défini par un dessin de définition.

Mais pour contrôler, il faut mesurer et la mesure est quelquefois difficile car l'opérateur ne maîtrise pas forcément tous les paramètres qui influent sur un résultat de mesure. [31]

On admet assez facilement que l'on doit utiliser une machine de production adaptée aux besoins de précision et de performances d'un produit, mais admet-on aussi facilement qu'un appareil de mesure puisse ne pas être adapté aux besoins de précision que l'on recherche ?

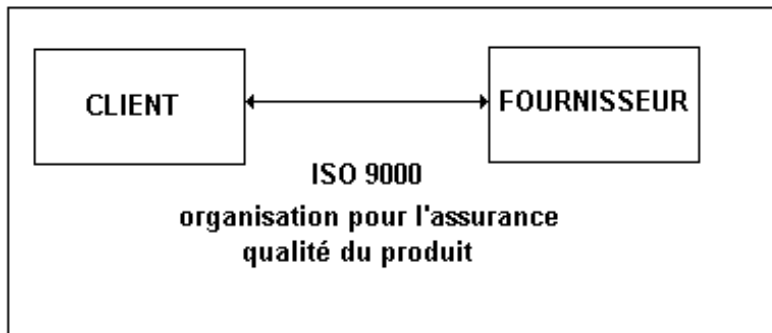
Les normes internationales actuelles, baptisées **ISO 9000**, vont dans le sens d'une remise en cause quasi - systématique des certitudes et des "suffisances" de certaines entreprises qui ne se posent pas de questions sur la validité de leurs produits.

L'utilisation généralisée de l'affichage numérique et des "listing" de résultats confère une sorte de légitimité sur la validité du produit qu'un simple calcul d'erreur permettrait de mettre en doute.

1-2-2 Les normes ISO 9000

1-2-2-1-Rappels sur les normes ISO 9000. [26],[29]

Les ISO 9000 sont la base actuelle des rapports qui doivent être mis en place entre des clients et les fournisseurs potentiels lors de la passation des marchés



La certification d'entreprise se base sur les normes de la famille ISO 9000. Cette certification ne vise ni les produits, ni les personnes.

Elle atteste que le système qualité de l'entreprise est conforme à l'un des référentiels ISO 9001, ISO 9002, ISO 9003.

ISO vient du grec "ISOS" qui signifie identique et la certification conformément au référentiel C'est aussi " l'International Système Organisation".

ISO 9000, est basée sur l'engagement de l'entreprise à appliquer ce référentiel en faisant contrôler cet engagement par des audits d'un organisme certificateur.

Les travaux de normalisation au sein de l'ISO se font dans le cadre de comités techniques ayant chacun un domaine de travaux défini. Celui chargé des normes ISO 9000 est le TC 176.

Les normes de la série ISO 9000 comprennent 5 normes principales :

ISO 9000-1 :

Normes pour le management de la qualité et l'assurance de la qualité – Partie 1 :

Lignes directrices pour leur sélection et l'utilisation. C'est la carte routière de la famille ISO. Elle explique les rôles de chacune des normes et examine les concepts fondamentaux de la série.

ISO 9001 :

Système qualité- Modèle pour l'assurance de la qualité en conception, production, installation et prestations associées.

ISO 9002 :

Système qualité- Modèle pour l'assurance de la qualité en production, installation et prestations associées.

ISO 9003 :

Système qualité- Modèle pour l'assurance de la qualité en contrôle et essais finaux.

Ces trois normes outre l'aspect global d'assurance qualité, contiennent un engagement de maîtrise des moyens de contrôle et d'essais.

Exigences en matière d'assurance qualité pour les équipements de mesurage :

Les points de passage pour la maîtrise des équipements de mesure pour les normes **ISO 9001 et ISO 9002** concernent le chapitre 4.11 et l'**ISO 10012-1** Partie 1 pour l'ISO 9003.

Un choix judicieux dans les besoins en Métrologie et la connaissance et la maintenance des moyens de mesure est donc une partie importante dans la mise en place des ISO 9000.

La suite de ces normes est plus axée sur l'aspect management.

ISO 9004-1 :

Management de la qualité et éléments de système qualité-

Partie 1 : lignes directrices. Cette norme décrit les éléments constitutifs d'un système de management de la qualité et donne les lignes directrices de la démarche à mettre en œuvre, éléments de coût à l'appui.

Système qualité- Modèle pour l'assurance de la qualité en production, installation et prestations associées .

1-2-1-1- Analyse des exigences d'assurance de la qualité des normes ISO 9000.

C Colas et P Reposeur [27] écrivent :

"Les normes ISO (ou normes européennes EN 29000) exigent que, pour toute «mesure critique », le fournisseur puisse être à même de maîtriser, étalonner et maintenir en condition les équipements de contrôle, de mesure et d'essais (y compris les logiciels) que ceux ci leur appartiennent ou qu'ils leur aient été prêtés ou fournis par l'acheteur (client).

Ces instruments de mesure et d'essais doivent être utilisés de façon à s'assurer que **l'incertitude de mesure est connue et compatible avec l'aptitude** (voir chapitre E) **requis en matière de mesurage.** [10]

Pour cela il lui faut :

- Maîtriser les équipements de mesure : (pas d'utilisation de matériels défectueux ou non raccordés, étiquetage et gestion de ces instruments)
- Etalonner et maintenir en condition : (raccordements aux étalons nationaux, comparaisons techniques, étalonnage ou vérification, qualification)
- Connaître l'incertitude de mesure : (évaluation du processus de mesure, bilan et chiffrage des causes d'erreurs, comparaison de la valeur numérique trouvée avec les spécifications requises pour le produit concerné)
- Analyser les besoins : (déterminer les mesurages, l'exactitude requise, et sélectionner l'équipement de contrôle) afin de bien identifier tous ces besoins par rapport à l'exigence de la qualité du produit.

Il est d'ailleurs important de noter que d'ici 3 à 5 ans l'évaluation des incertitudes devra pouvoir être justifiée conformément au guide élaboré par l'ISO/TAG 4 (GUM)." [12]

Conclusions:

Je pense comme C.COLAS ET P.REPOSEUR que chaque fournisseur doit avoir un réflexe "Capabilité" de ses moyens de mesure. Mais s'il est relativement simple d'estimer une incertitude de mesure pour des moyens simples comme le pied à coulisse ou le micromètre, cela devient très difficile pour les chaînes de mesure complexes. Et les opérateurs ne peuvent pas toujours estimer avec rigueur la capabilité des moyens utilisés par manque d'informations ou par manque de temps.

1-2-1-2- L'importance des normes ISO 9000 dans les productions industrielles :

Dans le paragraphe précédent, nous avons montré les exigences des normes de la série ISO 9000 quant à la maîtrise des équipements de mesure et d'essai.

Il faut donc mettre ces instruments sous assurance qualité [27], afin de pouvoir valider les produits fabriqués.

Mettre sous assurance qualité veut dire d'après la norme EN ISO 8402 :

« Mettre en place des actions préétablies et systématiques nécessaires pour donner la **confiance appropriée** en ce que la métrologie de l'entreprise satisfera aux exigences relatives à la qualité ».

Mais aussi «Mettre en œuvre des matériels donnés avec des méthodes spécifiques et **connaître les performances** de ces matériels dans des conditions de mesure particulières ».

En clair :

L'appareil de mesure utilisé est-il adapté à la tolérance que l'on veut vérifier ?

Les normes actuelles font référence à un terme nouveau comme la **Capabilité** qui permet de calculer l'adaptabilité du moyen utilisé, pour le contrôle ou les mesures, au besoin défini en termes d'intervalle de tolérance.

Mais la mesure engendre des connaissances scientifiques [22], [24] en Métrologie que n'ont pas forcément tous les opérateurs qui sont appelés à utiliser des outils plus ou moins performants (du simple pied à coulisse à la chaîne complexe comme les machines à mesurer tridimensionnelles).

Une des premières règles est d'assurer le raccordement interne ou externe [20-4] des moyens de mesures aux étalons nationaux.

Ensuite il faut s'assurer de la conformité de ces moyens par des suivis au moyen de procédures [20-5], de fiches de vie, d'identification et de vérification périodique.

Ce qui permet de déterminer la classe d'exactitude d'un appareil de mesure par rapport à une norme ou un règlement particulier.

Mais pour les chaînes complexes, ces valeurs ne sont pas forcément codifiées ou normalisées et on reste dans ces cas dans un flou qui est loin de la rigueur métrologique.

Connaît-on vraiment l'appareil utilisé ?

La grande difficulté pour les chaînes de mesure complexes est de connaître les incertitudes [31] de mesures pour les différentes conditions d'utilisation.

En effet un grand nombre de paramètres entrent en ligne de compte pour le calcul d'incertitude, et l'opérateur n'a pas forcément ni le temps ni les compétences pour se lancer dans des calculs qui peuvent s'avérer complexes.

Les fabricants de machines à mesurer donnent des incertitudes qui sont bien souvent estimées avec des conditions idéales de mesure (équipement, environnement, pièces de très bonne qualité géométrique etc.)

Mais il est difficile actuellement d'estimer correctement l'incertitude réelle de la machine utilisée suivant la configuration préconisée dans la procédure.

On doit donc dans ce cas se poser deux questions :

Comment aider l'opérateur à **choisir** ses conditions de mesures pour **contrôler** un produit ? (CCC)

Comment aider un industriel à **choisir** en connaissance de cause le moyen de contrôle **adapté** à ses fabrications ? (CCA)

Ces deux questions ont une implication très importante pour ne pas dire capitale dans les fabrications mécaniques.

Ces deux questions CCC et CCA, beaucoup de techniciens commencent à se les poser sérieusement.

Une première réponse est donnée par Jean Vincent [13],[20] du CETIM Senlis.

"Le choix d'un moyen de mesure dépend de nombreuses considérations techniques et économiques liées à la grandeur à mesurer, aux conditions d'utilisation, aux systèmes de mesure ou de commande en place.

Il conseille de suivre une démarche en trois étapes dont les points clés sont :

- 1) La définition précise du cahier des charges
- 2) La sélection d'une technologie
- 3) Le choix d'un produit.

Il précise :

La définition précise du cahier des charges permet de définir un type de matériel et ses caractéristiques essentielles. En effet, le cahier des charges doit définir avec précision la nature et le type de la grandeur physique à mesurer, le type de capteur recherché et le type de signal électrique de sortie.

Cette définition doit aussi préciser :

Les caractéristiques métrologiques :

- L'étendue de mesurage
- L'exactitude de mesure requise
- La rapidité de la mesure en fonction du domaine d'évolution de la grandeur à mesurer .
- Les conditions d'utilisation :
- La gamme de température ambiante admissible
- Les surcharges admissibles pour les valeurs accidentelles
- La durée de vie
- Les spécifications géométriques

On rajoutera les spécifications économiques et les autres caractéristiques comme les conditions d'alimentation, la consommation, la masse du capteur ou de l'appareil etc."

Actuellement la sélection de la technologie est facilitée par les différentes informations données précédemment et les connaissances actuelles de la technologie.

Les méthodes de mesures sont généralement connues par les futurs utilisateurs, et de nombreux ouvrages [1], [2], [3], [4], [5], [9], [11], [18], [19], [23],[25],[32], [37],[50],[55] traitent déjà des possibilités des machines actuellement sur le marché.

Mais Jean Vincent ne souligne pas assez à mon avis que le point 3 reste la grande difficulté.

En effet comment choisir parmi toutes les solutions proposées et surtout toutes les offres des différents constructeurs ?

Les conditions idéales de mesure n'existant jamais, comment faire le tri entre les affirmations des uns et des autres (constructeurs, opérateurs, centres techniques etc.) et les non dits des constructeurs ?

On voit donc toute la difficulté de choisir un moyen adapté aux problèmes posés.

Il n'est d'ailleurs pas inutile de rappeler que la validité d'un produit se fera dans la plupart des cas à partir d'un résultat de mesure donné par l'instrument.

Conséquences:

Si la mesure obtenue est dans la tolérance, l'acceptation est immédiate. Si la mesure est largement hors tolérance, le refus est prononcé.

Mais comment réagir pour les cas litigieux ?

Une partie de la réponse est donnée par la norme NFE 02-204 [24].

Cette norme permet de prendre la décision d'accepter un produit avec un risque calculé (ou de le refuser), en fonction des deux paramètres tolérance de fabrication et incertitude de mesure.

La tolérance fait partie des spécifications imposées, mais comment évaluer au mieux l'incertitude de mesure ?

1-2-1-3- Etre certifié ISO 9000

Dans la plupart des entreprises touchant de près ou de loin à la mécanique, le leitmotiv est :
Etre accrédité ISO 9000 pour pérenniser et étendre les marchés.

Mais mettre en place ces normes ne se fait pas sans mal ni sans risques.

Combien de fausses pistes, de tâtonnements et d'erreurs dues à une mauvaise interprétation ou une incompréhension de ces normes ont conduit ces entreprises vers un rejet, quelquefois compréhensible, de ces nouveaux règlements.

Le discours qualité parle de gestion et d'assurance qualité, de management participatif, de qualité totale et réclame de tous une volonté d'améliorer la qualité.

Mais comment faire passer ce discours auprès de ceux qui fabriquent depuis longtemps et qui pensent accomplir leur tâche correctement et refusent de se remettre en cause ?

Certaines entreprises commencent par mettre en place un manuel qualité, voire sont mêmes prêtes à l'acquiescer et le recopier chez leurs confrères ou concurrents.

C'est une erreur fondamentale car ces manuels ne reposeront sur la réalité.

Pour notre part, nous restons persuadés que la solution repose sur une bonne analyse du produit.

Tout fabricant doit se poser les 3 questions majeures pour garantir que ce produit sera toujours conforme au cahier des charges :

Comment ce produit est-il fabriqué ?

A partir de quelles spécifications ?

Comment est-il contrôlé ?

Une fois les réponses apportées à ces trois questions, on pourra aller plus loin dans la mise en place de l'assurance qualité voir même d'aller vers la qualité totale.

Actuellement, les entreprises ont résolu les problèmes liés aux deux premières questions.

Les outils de production sont de mieux en mieux maîtrisés, les spécifications, grâce à une meilleure normalisation, sont plus claires et mieux gérées. Mais pour la troisième, les réponses sont encore assez floues.

Le contrôle à posteriori coûte cher et il n'est pas toujours inclus dans les calculs de prix de revient.

Doit-il être systématique, par échantillonnage, arbitraire ?

Avec quels moyens, par quel personnel ?

Parler de qualité totale sans moyens d'évaluation de l'outil production et du produit fini reste dans le domaine de l'autosatisfaction .

La qualité dans les entreprises a été surtout vue sous l'angle de la gestion et du management.

C'est bien sûr nécessaire mais pas suffisant.

La qualité se mesure avec des indicateurs qui peuvent être subjectifs mais il ne faut pas oublier que le produit, lui, se mesure avec des instruments de mesure qui eux sont bien réels.

Ce qui n'est pas sans influence sur le coût final du produit.

L'investissement en moyens de contrôle va de quelques dizaines de francs à plusieurs millions pour des machines de haute précision. Choisir les moyens adaptés aux vérifications qui sont nécessaires pour pouvoir certifier la qualité du produit n'est pas toujours une tâche facile.

En dépassant le simple coût de l'investissement initial, on se rendra compte que la Métrologie est une source de gain de temps et forcément d'argent.

Il nous faut avant tout convaincre les dirigeants d'entreprises que la métrologie est un besoin et une nécessité et qu'il n'est pas de produit de qualité sans une métrologie adaptée.

1-2-1-4- Evolution du contrôle :

Le contrôle a beaucoup évolué.

Jusqu'au début des années 70, un marbre, des comparateurs, des vés et une bonne dose d'optimisme étaient suffisants. Et puis, dans les cas où on ne pouvait ou savait pas contrôler, on décrétait souvent "c'est bon".

1-2-1-5- Histoire de la machine à mesurer : [25]

L'idée de contrôler des éléments dans les trois directions X, Y, Z était dans la plupart des métrologues.

Car la mesure sur un marbre ne permet des vérifications que suivant la direction Z.

Les retournements suivant chaque axe créent des erreurs importantes et la création de référentiel de mesure difficilement réalisable, pour ne pas dire impossible.

La première machine à mesurer manuelle a été conçue en 1962 (photo n°1-1) par la société **DEA** à Turin.

On voit sur cette photo que la première machine dérivait directement d'un marbre en fonte sur lequel étaient fixés 4 supports surmontés de deux rails.

Sur ces rails, une traverse et une colonne qui permet d'explorer toute la surface du marbre. Cette idée a été reprise pour les machines de type portique.

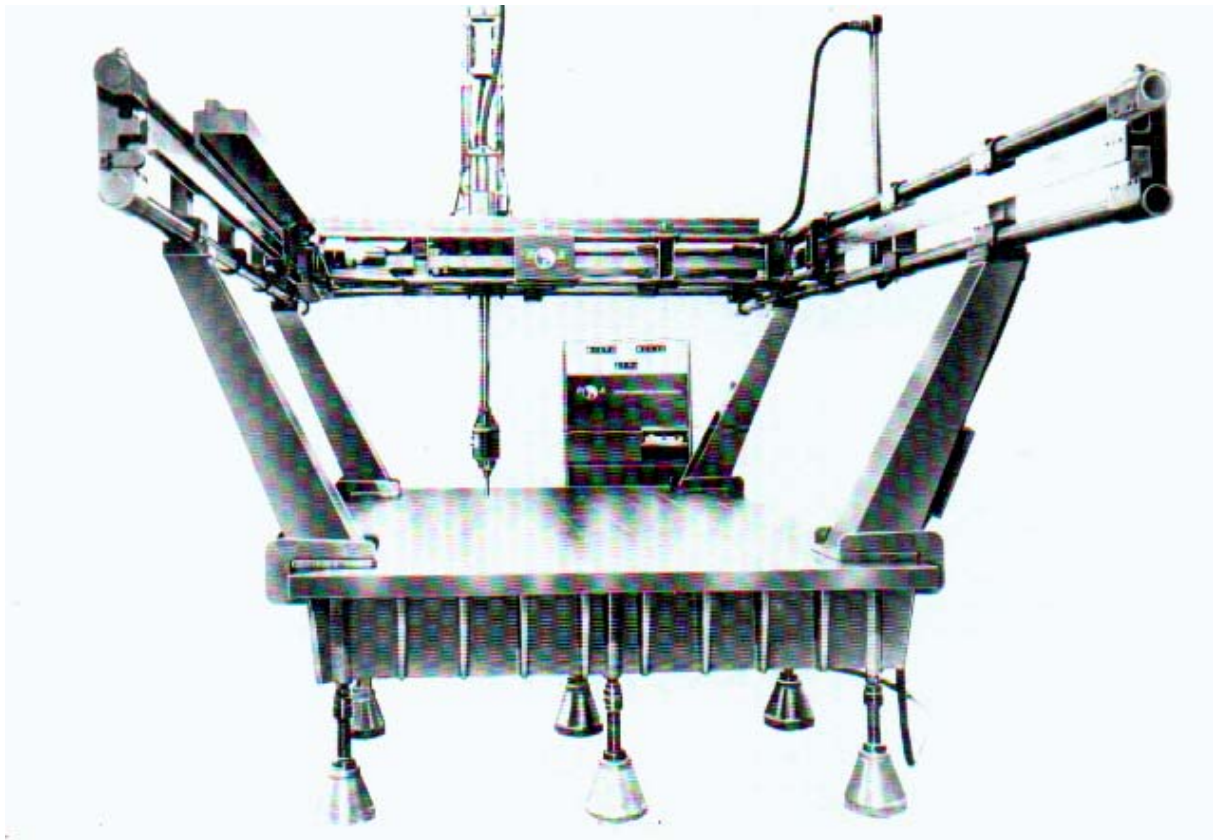


photo n°1 1 La première machine tridimensionnelle de DEA

1-2-1-6- Evolution :

En 1973, la première machine à commande numérique a été réalisée par **ZEISS**.

On trouve dans cette machine (UMM500) (figure n°1-1) les deux éléments fondamentaux que sont le calculateur et le palpeur universel.

La conception se rapproche plutôt des machines à pointer, la société **ZEISS** était à cette époque un des leaders mondiaux avec la société genevoise **SIP** pour la fabrication de ce type de machine de précision.

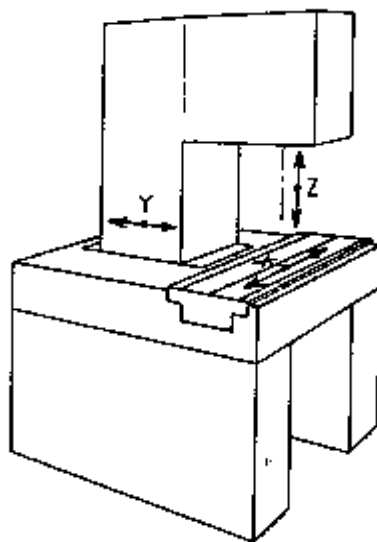


Figure 4

fig n°1 1 La machine UMM500 de ZEISS

Le développement des premiers algorithmes de calcul et leurs méthodes de traitement couplées à un calculateur ont permis de mesurer des surfaces usinées, sans que l'opérateur soit obligé d'effectuer lui-même les calculs.

Le premier palpeur à déclenchement a été réalisé en 1970 par **David Mac Murtry** (photo n°1-2) alors ingénieur chez Rolls Royce pour mesurer des tubulures extrêmement fines pour le moteur du Concorde.[25]



photo n°1 2 Le premier capteur dynamique à déclenchement [25]

En collaboration avec John Deer, il a fondé la société Renishaw qui est actuellement un des leaders mondiaux des capteurs de machines à mesurer.

L'introduction des machines à mesurer, dérivées des machines à pointer, a beaucoup facilité la mesure (gain de temps, informatisation des procédures, archivages des résultats).

Mais la course aux logiciels et aux capteurs de mesure de plus en plus sophistiqués a en partie occulté les problèmes majeurs de ces nouveaux moyens et certaines questions restent en suspens.

Quelles sont les erreurs propres de ces machines ?

La machine utilisée est-elle adaptée au contrôle que l'on veut faire ?

Le personnel est-il capable de bien utiliser et interpréter les résultats de ce type de machine ?

Monsieur A.HUET [52], de la société Brown et Sharpe, lors du congrès international de métrologie en octobre 1999, a présenté une conférence sur l'importance des machines à mesurer sur le processus industriel, et donne en conclusion les trois notions qui doivent être prises en compte lors de l'achat d'un tel type de matériel :

- ❖ Définition du besoin technique
- ❖ Position du contrôle dans le processus industriel
- ❖ Dimension humaine de l'entreprise

On retrouve dans cet article un certain nombre de réponses aux questions précédentes, sur le choix d'une machine, sur son entretien, sur son environnement, sur l'intégration dans le process. Mais il soulève aussi la dimension humaine qui est la clé de la réussite d'un investissement. L'utilisation de la machine en "**presse bouton**" nécessite **un père technique** capable de piloter le langage évolué et la machine elle même.

1-2-1-7- Conclusions

L'utilisation des machines à mesurer dans la production est devenue indispensable. Mais leur emploi demande beaucoup de discernement et de connaissances avant de traduire les résultats de mesure d'une pièce donnés par un listing en terme de validité ou de rebus .

1-2-3- Les travaux déjà effectués

De nombreux travaux ont été réalisés sur l'amélioration de la qualité des mesures sur ce type de machine.

En 1976, **P.BOURDET et A.CLEMENT [73]**, définissaient le torseur des petits déplacements pour optimiser l'association d'une surface à un nuage de points.

En 1984, **A.CLEMENT, P.BOURDET et R.WEILL [64]** comparaient différentes méthodes d'optimisation de surfaces. Ils soulevaient un des problèmes fondamentaux de la mesure tridimensionnelle.

En 1987, **P BOURDET[2]** définit un modèle d'identification géométrique des surfaces. Ce modèle mathématique a permis la mesure sur MMT par une optimisation des moindres carrés.

R.CASTELJAU [65] a émis des idées de base comme

"de la tradition de se référer à l'extremum d'une fonction pour exprimer la qualité d'un résultat, résultent autant de solutions qualifiées de meilleures solutions qu'on a de façons de pratiquer cette estimation", .et

"La matrice des coefficients qui permet de résoudre le système linéaire de Cramer (dans le cas d'un lissage des moindres carrés) est désespérément proche de zéro...En pratique, une infime variation des entrées bouscule tout, même l'ordre de grandeur et le signe des variables de sortie...la question mériterait d'être confirmée par un calcul d'erreur..."

.
Les travaux de **M FALL et A CLEMENT** se sont étendus en 1987 à l'étude de l'évaluation numérique de tout logiciel de calcul.[66]

Ils ont aboutis à à **SCRIPT (Software Control Relyng on inverse problem theory [67]**

En 1988, **S SARTORI, PC CRESPO, DI CIOMMO et T K KANCHEVA [70]**on donné une meilleure approche de la précision des machines à mesurer.

L. MATIEU, C.LARTIGUE, P.BOURDET, [68] au congrès international de métrologie de Lille en octobre 1993, ont montré que dans le contrôle des spécifications par zone de tolérance (ISO 1101), les solutions proposées par les logiciels de machine à mesurer étaient source de non qualité.

Après une présentation de l'élément tolérancé [6], de la référence spécifiée et de la zone de tolérance qui définit le ou les espaces dans lesquels doivent se trouver le ou les éléments tolérancés, les auteurs définissent la zone de tolérance comme une zone simple ou une zone composée.

La figure n°1-2 montre les zones de tolérances simples.

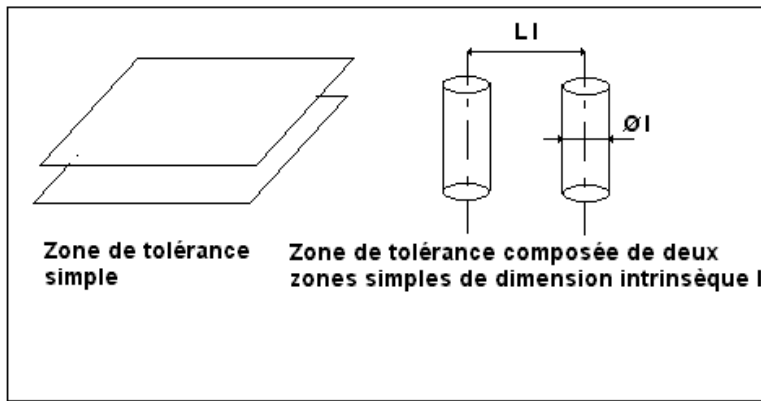


fig n°1 2 Zones de tolérances simples

Dans le cas d'une zone composée de zones simples, l'orientation et la position relative de zones simples sont contraintes par des dimensions de référence linéaires ou/et angulaires.

Ces dimensions s'expriment entre des éléments de situation des zones simples.

La dimension d'une zone simple est caractérisée par un paramètre de type longueur.

Pour une zone composée, les valeurs du paramètre de chaque zone simple peuvent être toutes identiques ou différentes.

La valeur du paramètre d'une zone simple peut être une fonction de la dimension intrinsèque de l'élément tolérancé.

Selon la nature de défaut de l'élément réel (forme, orientation, position) dont on cherche à limiter l'amplitude, la zone de tolérance est ou n'est pas contrainte en orientation ou en position par rapport à une référence tolérancée.

Dans le cas d'une spécification portant sur la forme de l'élément, la zone de tolérance n'est pas contrainte par une référence spécifiée.

Ces dimensions s'expriment entre les éléments idéaux de la référence spécifiée et les éléments de situation de la zone.

S'il s'agit d'une zone simple, la dimension s'applique à l'élément de situation de la zone simple.

S'il s'agit d'une zone composée, les dimensions s'appliquent aux éléments de situation de la zone composée d'éléments simples.

La figure n°1-3 montre les zones composées d'éléments simples.

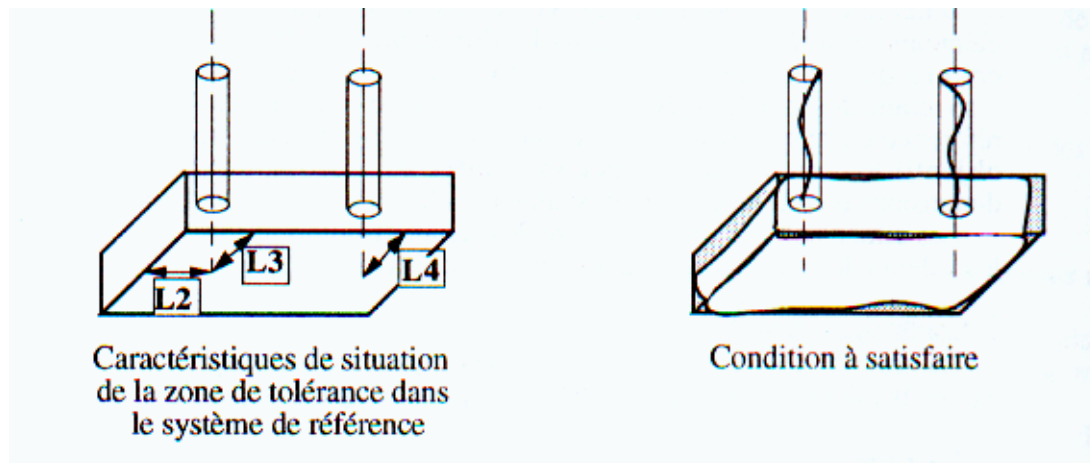


fig n°1 3 zone composée d'éléments simples

Les ambiguïtés constatées dans les spécifications normalisées sources de non-qualité reposent :

- Sur les critères d'association des éléments géométriques idéaux aux surfaces ou aux lignes réelles qui sont mal définies
- Sur la définition des axes réels et des surfaces médianes réelles qui n'est pas donnée.

Les fonctionnalités communes des logiciels de MMT sont donc définies par :

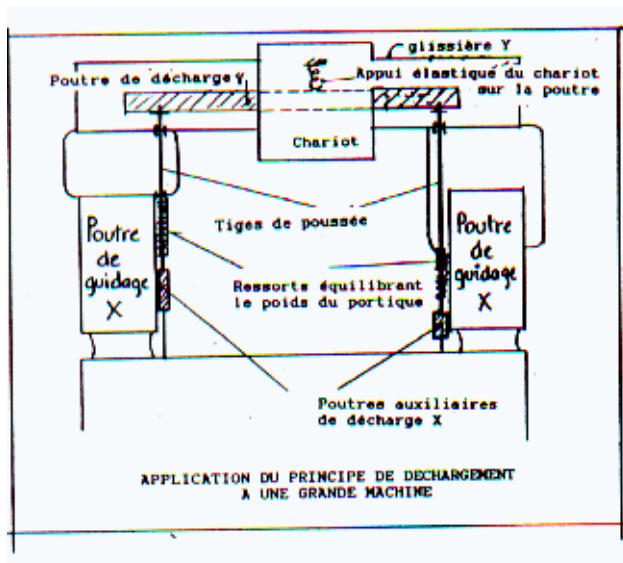
- Une assistance à l'acquisition des points mesurés sur une pièce
- Le traitement mathématique des mesures
- Les traitements statistiques des résultats de mesure sur un ensemble de pièces.

En conclusion, les auteurs soulignent l'importance pour les contrôleurs de se poser des questions et les poussent à entreprendre des actions pour amener l'ensemble des acteurs à une uniformisation de la cotation dans l'entreprise.

Dans l'étude qui va suivre, nous nous sommes attachés à mesurer des éléments considérés comme "parfaits" de manière à enlever les ambiguïtés précédentes.

Toujours lors du même congrès, J.M DAVID et T. COOREVITS [69] ont défini une architecture nouvelle pour minimiser les incertitudes de la correction par logiciels des corrections des erreurs de géométrie des MMT.

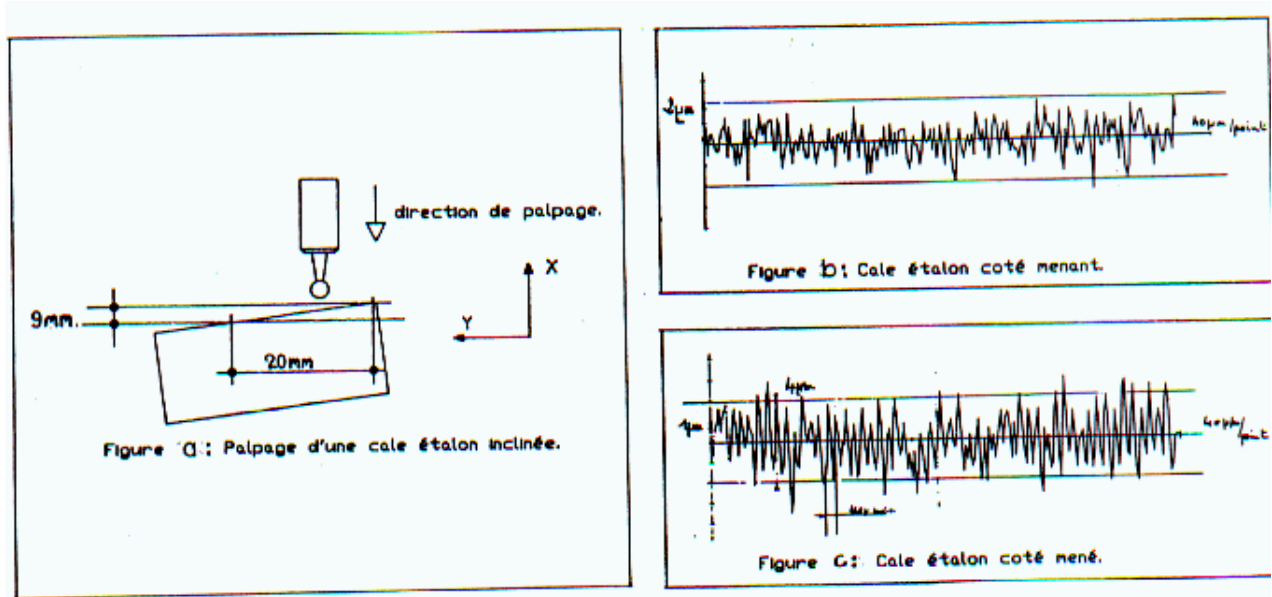
fig n°1 4 architecture d'une nouvelle MMT



Globalement, le système envisagé dans le cas de grande machine et afin de ne pas charger les glissières X par le poids d'un portique, est constitué de deux glissières solidaires d'un bloc en béton. (figure n°1-4). Dans le cas d'une machine de type portique classique, la répétabilité coté menant et coté mené n'est pas la même. Les auteurs montrent notamment que ces valeurs peuvent être doublées.

Le test effectuée sur une cale étalon montre que la dispersion locale passe de 2 à 4 μm suivant que l'on se situe de part et d'autre du portique. La figure n°1-5 montre l'influence sur la répétabilité de la position du portique par rapport à l'axe moteur.

fig n°1 5 l'influence sur la répétabilité de la position du portique par rapport à l'axe moteur.



En conclusion, les auteurs pensent que les déplacements de charge et les effets thermiques seraient minimisés et que le surcoût pour les constructeurs seraient amortissable car celui-ci compense, dans le cas de machine de grande dimension, l'amortissement de la réalisation d'enceinte climatique. Ils font apparaître un terme nouveau baptisé microjustesse qui est le phénomène répétable parmi le brouillard environnant les résultats de mesure de la cale.

Il est à noter que la société Game Ingénierie avait présenté lors des premières journées d'Aquitaine en 1983, à l'origine des congrès de métrologie actuels, une machine de grande dimension basée sur un système analogue. Les déplacements étaient pilotés par des interféromètres à comptage de franges. (voir figure n°1-6 ci-dessous)

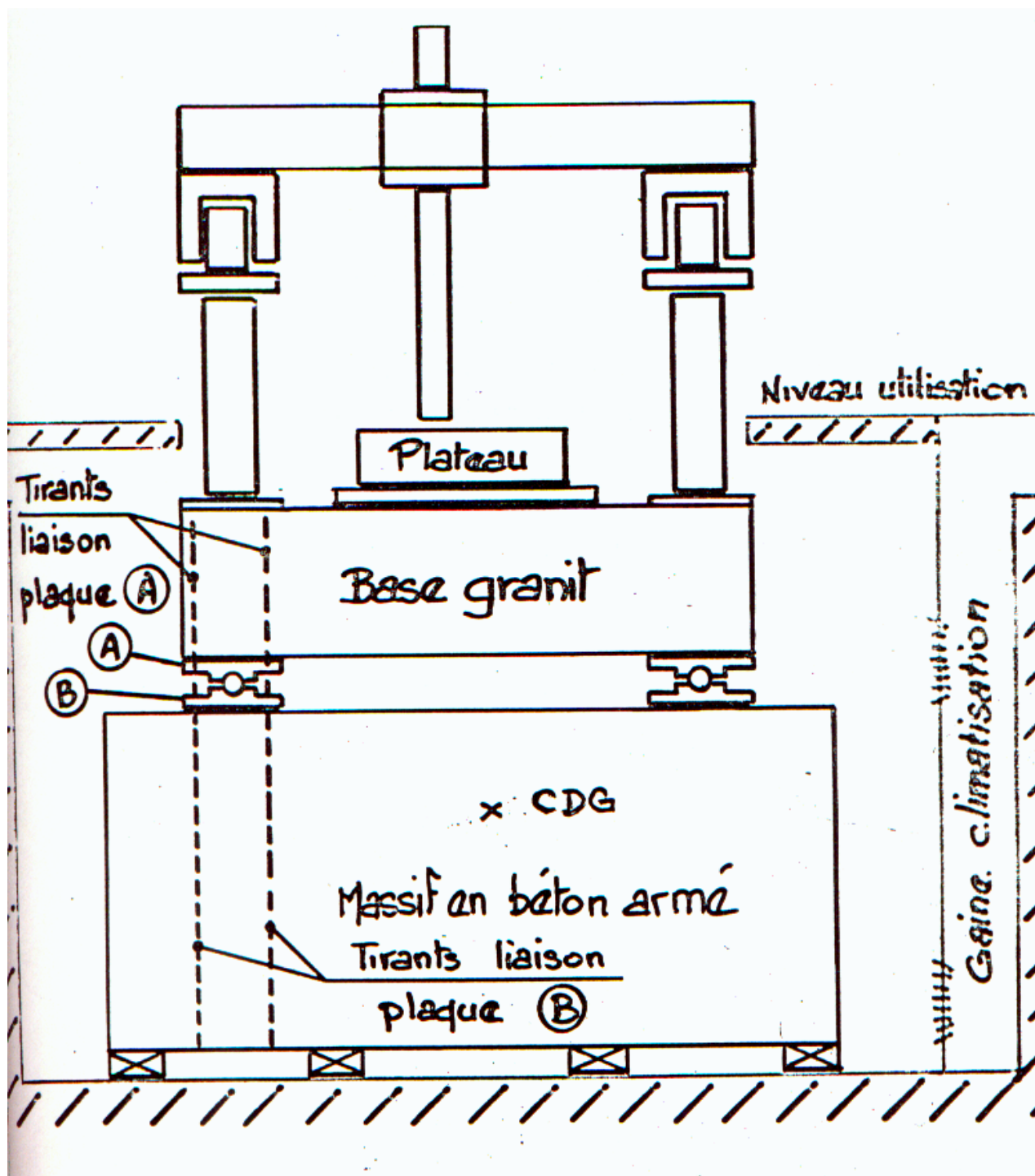


fig n°1 6 MMT de la société Game Ingénierie

Patrice CHOLLET [21] dans sa conclusion, définit la réduction des erreurs d'une machine à mesurer comme un passage obligé vers une démarche qualité (ISO 9000).

Les points principaux qu'il souligne sont :

- Une formation adéquate des opérateurs,
- Une norme de référence pour les algorithmes d'identification de surfaces et pour les méthodes .
- Une modélisation fine de la machine qui tient compte de son environnement en vue d'une compensation informatique des erreurs **[8]**.

Pour atteindre l'objectif de quantification des erreurs il propose la démarche suivante :

- Modélisation des erreurs,
- Analyse des méthodes de réduction des erreurs
- Relations entre ces méthodes,
- Limite de ces méthodes,
- Calcul des limites .

Tout cela permet de connaître globalement les erreurs d'une machine tridimensionnelle et de compenser par logiciel le champ de déplacement au "point fonctionnel " intégrant le changement de palpeur"

Principe appliqués aux solides indéformables :

L'hypothèse admise est que le plus souvent une MMT est composée de trois glissières orthogonales montées en série, de 3 capteurs de position placés parallèlement aux glissières et d'un capteur.

Vecteur d'erreur pour une glissière :

On définit à chaque glissière deux solides, une base et un coulisseau.(fig n°1-7)

Les six erreurs définies sont :

- 1 une erreur de positionnement
- 2 erreurs de rectitude
- 3 erreurs de rotation ,

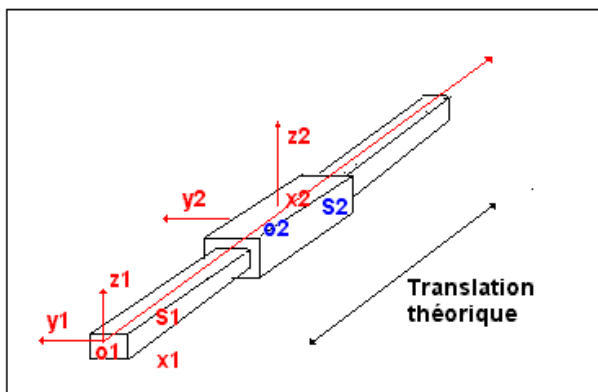


fig n°1 7 barre et coulisseau

Ce qui donne bien pour les 3 glissières 18 erreurs.[21], [60]

Il faut rajouter les 3 erreurs de perpendicularité dans les trois plans XY, XZ, YZ

Nous avons donc, comme le souligne P.CHOLLET définit 21 erreurs qui permettent de modéliser les erreurs géométriques d'une machine tridimensionnelle.

Définition du vecteur de l'erreur non corrigée:

Les erreurs aléatoires et d'hystérésis forment un parallélépipède d'arêtes parallèles aux axes de déplacement :

La figure n°1-8 ci dessous montre la représentation de ce vecteur .

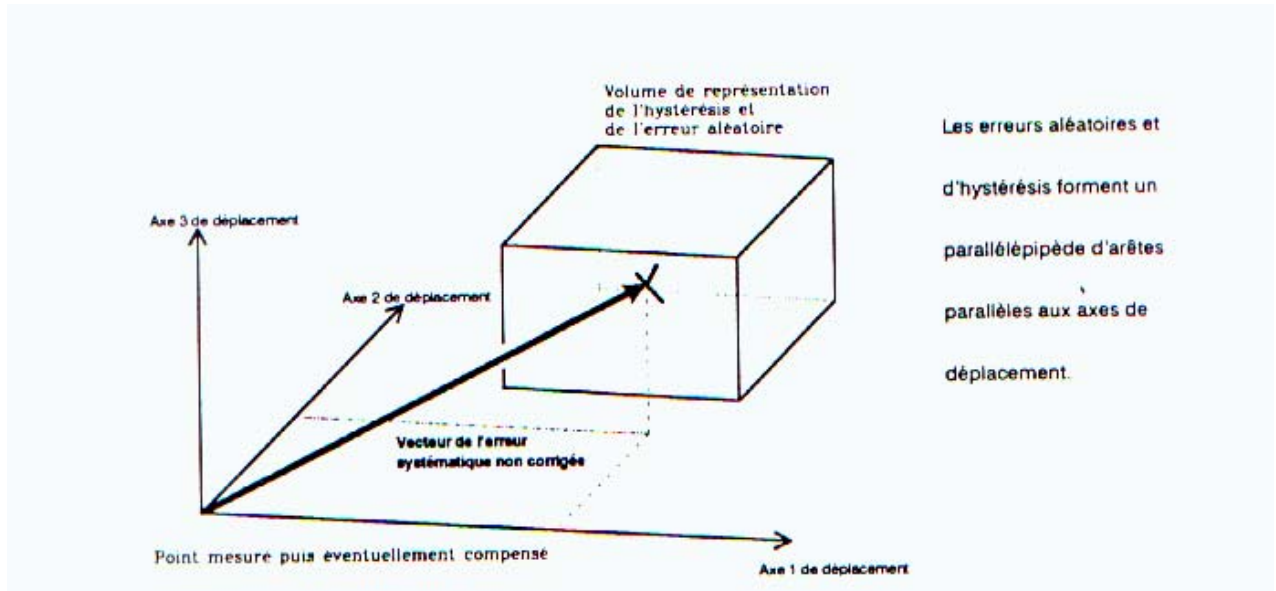


fig n°1 8 Vecteur de l'erreur non corrigée

D'autres erreurs interviennent d'une manière beaucoup plus difficile à cerner comme les déformations dues aux transfert de charge (portique en appui sur le marbre) ou l'hétérogénéité des matériaux composant la machine.

Tous ces défauts sont intégrés expérimentalement dans le modèle de la composition des 21 erreurs.

On trouvera enfin les erreurs liées à l'équipage palpeur que nous allons voir plus loin..

Dans l'étude qu'il présente[21], **P.CHOLLET** fait apparaître l'influence de certains paramètres comme celle d'un palpeur désaxé de 14 mm et de longueur 50 mm.

Les valeurs qu'il donne montre qu'elles peuvent atteindre 8.2 μm sur 500 mm suivant l'axe principal X et 3.5 μm avec un accostage suivant l'axe Y.

Nous verrons par la suite qu'une partie de ces incertitudes se retrouvent dans la qualification des palpeurs.

Pour une distance nulle, l'incertitude minimale peut atteindre 2.25 μm . Après compensation en temps réel, les incertitudes tombent à 1 μm dans le centre de la machine et 1.5 μm à la limite du volume de la machine.

Conclusions:

On voit bien dans ce cas l'amélioration certaine apportée par la compensation des MMT par logiciels.

Il souligne aussi la difficulté d'atteindre une incertitude globale égale au micromètre dans une machine de 1000 x 1000 x 1000 mm .

Et, de plus, il ne parle que de l'incertitude du point fonctionnel.

Ces travaux ont été repris en 1993 par **M PRIEL [71]**, du Laboratoire National d'Essais, en une réflexion sur l'estimation des incertitudes de mesures de longueur sur les machines par coordonnées. En effet, les normes de réception des MMC préconisent la mesure d'étalons disposées dans le volume de la machine.

Le tableau suivant n°1-1 donné par la norme Française NFE 11-150 précise les éléments à mesurer et le nombre d'étalons dans les différentes positions.

Tableau n°1 1 NFE 11-150

		nombre	d'axes de	mesures	
		1	2	3 (linéaires)	3 (linéaires) + 1 (rotation)
Nombre Recommandé (1)	de cales	10	8	8	8
	de positions de contrôle	1 (2)	3	12	12 +2 (3)
Nombre Recommandé	de bagues	1	1	1	1
	de tampons	1	1	1	1
	de cônes	-	1	1	1
	de sphères	-	-	1	1
	de positions de contrôle	1	2	3	3

- (1) les nombres de cales et de positions peuvent varier à condition que le produit de deux reste voisin de celui du tableau. En outre, si la plus grande cale ne couvre pas 75 % de l'étendue de mesure du plus grand axe, le nombre de positions doit être augmenté.
- (2) Des mesures complémentaires doivent être faites pour estimer la répétabilité (par exemple 5 mesures dans la même position).
- (3) Dans le cas ou l'axe de rotation est un axe mesurant, les contrôles doivent être effectués dans les deux positions complémentaires, en faisant varier la position angulaire du plateau au cours des mesurages d'une même cale; exemple face1 à θ_1 et face 2 à θ_2 .

Mais cela ne permet que donner une estimation globale sur la validité de la machine concernée.

Dans ces travaux M PRIEL traite un exemple complet suivant une direction X.

Il complète ses analyses par un réflexion sur l'estimation des incertitudes des mesures de longueur à l'aide d'une MMT [71]

Suivant l'axe X cela permet d'estimer la variance (ou l'incertitude type) intégrant les corrections de rectitude de l'axe considéré (rotation et orthogonalité) de position (justesse) tout en excluant les effets thermiques.

Il attire l'attention des utilisateurs sur les risques à négliger les termes de corrélation dans une mesure globale.

La formule de composition des erreurs en X donne:

$$u_c^2(X) = u^2(x_i) + u^2(xTx_i) + u^2(yTx_i) + u^2(zTx_i) + (z_i + z_t).u^2(xRy_i) + y_t..u^2(xRz_i) + (z_i + z_t).u^2(yRy_i) \\ + y_t..u^2(xRz_i) + z_t..u^2(zRy_i) + y_t..u^2(zRz_z) + y_t..u^2(sSy + z_t..u^2(ySz) + u^2(Vx) + \text{termes.cov ariances})$$

En posant: variances justesses

$$xTx_i = u^2(J)$$

.Variances rectitudes

$$u^2(T)$$

Variances sur les rotations

$$u^2(R)$$

Variances sur les orthogonalités

$$u^2(S)$$

Et après diverses simplifications, M PRIEL arrive une formule donnant l'incertitude type exprimée au niveau d'un écart type :

$$u_c(x) = \sqrt{u^2(x_i) + u^2(J) + 2u^2(T) + 2z_i \cdot u^2(R) + y_i \cdot u^2(S) + z_i \cdot u^2(S) + u^2(Vx)}$$

Tout en soulignant la sous évaluation de l'incertitude réelle car le modèle ne corrige pas toutes les erreurs systématiques présumées, il montre clairement comment se propagent les incertitudes sur les facteurs correctifs.

Le terme en $u^2(x_i)$ représente la fidélité de la machine, les termes Vx , Vy , Vz désignent les erreurs de palpage dans les 3 directions x,y,z..

Il préconise de travailler indépendamment sur chaque axe afin de rendre ces covariances négligeables..

Récapitulatif :

Erreur de justesse xTx_i

Erreur de rectitude yTx_i (dans le plan XY)

Erreur de rectitude yTx_i (dans le plan ZX)

Erreur de rotation $xRxi$ (autour de X)

Erreur de rotation $xRyi$ (autour de Y)

Erreur de rectitude $xRzi$ (autour de Z)

Idem pour les autres axes Y et Z

Le tableau n° 1-2 montre les erreurs décomposées

Tableau n°1 2 erreurs décomposées

	Axe X (µm)	Axe Y (µm)	Axe Z (µm)
Erreur de justesse	0.17	0.11	0.03
Erreur de rectitude x	-	0.22	-0.01
Erreur de rectitude y	-0.02	-	-0.05
Erreur de rectitude z	0.31	-0.07	-
Erreur de rotation x	2.8×10^{-7}	-2.4×10^{-7}	1.6×10^{-7}
Erreur de rotation y	4.0×10^{-7}	2.2×10^{-7}	5.9×10^{-7}
Erreur de rotation z	-7.8×10^{-7}	-3.4×10^{-7}	3.9×10^{-7}
Erreur de palpé	0.1	0.1	0.1

De plus le tableau de résultats donnés en annexe permettent de définir sur une machine les erreurs au point de coordonnées X=500 mm, Y=400 mm, Z =300 mm .

Le tableau n° 1-3. donne des valeurs sur les coordonnées 500 x 400 x 300

Coordonnées du point	Erreurs en µm
P xi	0.22 µm
P yi	0.13 µm
P zi	0.54 µm

Tableau n°1 3 Résultats pour X=500 mm, Y=400 mm, Z =300 mm .

Ou en calculant le module du vecteur d'erreur résultant :

$$P (x_i, y_i, z_i) = 0.6 \mu m$$

La suite de ses travaux donne un ensemble de résultats sur des cales de longueur différentes de 20 mm à 600 mm, ce qui permet de mieux cerner les incertitudes sur la mesure d'artefacts de type cales étalons.

Conclusions :

Les valeurs obtenues par le LNE et M PRIEL donnent une connaissance de l'incertitude intéressante sur la mesure d'un point.

Mais une machine 3D ne mesure que rarement des points seuls. Ces points font partie d'éléments de base comme la droite, le plan , le cercle etc.

Bien que la recommandation WECC CMM EXPERT GROUP-version 2.14 donne des conditions générales sur les limites d'utilisation de ces machines, les résultats ne précisent pas assez les conditions de mesure réelles.

Il me semble aussi que l'évaluation des valeurs de $V(x)$, $V(y)$, $V(z)$ demande une analyse plus complète car ces valeurs dépendent d'autres paramètres qui peuvent varier de manière non négligeable.

M PRIEL [28], dans un autre article, reprend et précise les méthodes de calcul des incertitudes définies par le GUM93 [12].

Méthode de calcul des incertitudes [28] ,[75] .

1-Introduction

Globalement, le résultat d'une mesure est :

$$\textbf{Résultat d'une mesure} = \textbf{valeur vraie} + \textbf{erreur}$$

Le vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie (**VIM**) définit deux types d'erreurs :

Erreur aléatoire : Elle est liée aux conditions de répétabilité de la mesure.

Erreur systématique : C'est l'écart entre la moyenne infinie de résultats de mesure par rapport à la valeur supposée du mesurande.

$$\textbf{Résultat d'une mesure} = \textbf{valeur vraie} + \textbf{erreur aléatoire} + \textbf{erreur systématique}$$

Diminution des erreurs :

On diminue les erreurs aléatoires en **répétant** les mesures et les erreurs systématiques en appliquant des **corrections**.

Les erreurs statistiques(dites aléatoires) :

On admet qu'une série de mesures constitue un échantillon extrait d'une population mère.

A condition que cet échantillon soit représentatif (effectuer des tests de normalité), on pourra calculer les estimateurs de la moyenne et de la variance de cette population.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i \text{ et } U^2(x) = \frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2$$

L'incertitude type est donnée par $u(x) = \sqrt{U^2(x)}$

l'incertitude composée est $uc(y)$. Avec un facteur d'élargissement k on détermine l'incertitude élargie qui devient

$$U = k u_c(y)$$

On prendra généralement $k=2$ pour assimiler les résultats à un niveau de confiance de 95 %.

Type des erreurs :

Les erreurs dites systématiques :

Certaines de ces erreurs pourront être définies d'une manière quasi certaine, et dans ce cas feront l'objet de corrections.

Elles peuvent être de deux types :

Corrections d'étalonnage(**Ce**) : liées directement au certificat d'étalonnage

Corrections d'environnement(**Ca**) : liées à la température, à la pression atmosphérique ou à l'hygrométrie.

Ce qui nous donne si Y est le résultat du processus de mesure

$$Y = \bar{x} + Ce + Ca$$

Incertitudes de mesures :

Les corrections systématiques seront appliquées à la mesure, mais il reste un doute quant à ces valeurs.

En effet, une correction de température de 19 à 20° peut être faite, car on considère qu'une température environnante moyenne est bien de 19°, mais qu'elle est la variation autour de 19° de ce laboratoire ?

Estimation des différentes composantes :

Les 3 composantes seront classées soit en erreurs de type A pour la première et en type B pour les deux autres.

Loi de propagation des incertitudes :

$$u_c^2(y) = \sum_{j=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_j} \right]^2 u^2(x_j) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)$$

x_i et y_i ont pour estimateurs x_i et y_i et $u(x_i, x_j)$ est la covariance estimée de x_i , x_j et $u_c^2(y)$ est la variance de l'incertitude combinée de y

La formule précédente peut s'écrire :

$$U_c^2(y) = \sum_{j=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_j} \right]^2 u^2(x_j) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \right] u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j)$$

Et dans le cas où toutes les covariances sont nulles, c'est à dire que les phénomènes sont indépendants entre eux, la loi de composition des incertitudes devient beaucoup plus simple à écrire car le deuxième terme devient nul.

(r = estimateur du coefficient de corrélation entre les deux paramètres influant sur la mesure)

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i) u(x_j)} = 0$$

Et dans l'équation

$$Y = \bar{x} + C_e + C_a$$

la loi de propagation des incertitudes devient :

$$u_c^2(y) = u^2(\bar{x}) + u^2(C_e) + u^2(C_a)$$

et en le mettant sous forme d'écart type :

$$u_c(y) = \sqrt{u^2(\bar{x}) + u^2(C_e) + u^2(C_a)}$$

La norme issue d'une recommandation du BIPM (bureau international des poids et mesures), définit en fait deux types d'incertitudes :

Les incertitudes de types A et les incertitudes de type B

Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure

1)Extrait de la norme NFX07-020 (juin 96)

Le terme «incertitude» signifie doute.

Ainsi incertitude de mesure signifie doute pour la validité d'un résultat de mesure.

Incertitude de mesure :

Paramètre associé au résultat de mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient être raisonnablement attribuées au mesurande.

(voir aussi le vocabulaire du VIM, première édition 1984,3.09)

Incertitude type :

Incertitude du résultat d'un mesurage exprimée sous la forme d'un écart type.

Evaluation de type A :

Méthode d'évaluation de l'incertitude par l'analyse statistique de séries d'observations.

Evaluation de type B :

Méthode d'évaluation de l'incertitude par des moyens autres que l'analyse statistique de Séries d'observations.

Incertitude type composé (Is) :

Incertitude type du résultat d'un mesurage, lorsque ce résultat est obtenu à partir des valeurs d'autres grandeurs, égale à la racine carrée d'une somme de termes, ces termes étant des variances ou des covariances de ces grandeurs, pondérées selon la variation du résultat de mesure en fonction de celle de ces grandeurs.

Incertitude élargie (Ig):

Grandeur définissant un intervalle, autour du résultat d'un mesurage, dont on puisse s'attendre à ce qu'il comprenne une fraction élevée de la distribution des valeurs qui pourraient être attribuées raisonnablement au mesurande.

Dans le vocabulaire INC-1(1980) cette incertitude élargie est aussi appelée **incertitude globale**.

Facteur d'élargissement :

Facteur numérique utilisé comme multiplicateur de l'incertitude type. (Entre 2 et 3).

2)Méthode de calcul :

Estimation du mesurande :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$$

$$y = \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n f(x_1, x_2, \dots, x_N, k)$$

ou dans la plupart des cas

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k$$

Evaluation de type A de l'incertitude type :

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2.$$

Evaluation de type B de l'incertitude type :

Pour une estimation x_i d'une grandeur d'entrée X_i qui n'a pas été obtenue à partir d'observations répétées, la variance estimée associée $u^2(x_i)$ ou l'incertitude type $u(x_i)$ est évaluée par un jugement scientifique fondé sur toutes les informations disponibles au sujet de la variabilité possible de X_i .

Elles peuvent comprendre :

- des résultats de mesures antérieurs
- l'expérience ou la connaissance de comportement
- les spécifications constructeur
- les données fournies par des certificats d'étalonnage
- l'incertitude assignée par des ouvrages de référence.

Résumé: (hors norme NFX 07-020)

La recommandation INC-1 permet de combiner les différentes composantes de l'incertitude.

2.1) L'incertitude d'un résultat de mesure comprend généralement plusieurs composantes qui peuvent être groupées en deux catégories d'après la méthode utilisée pour estimer leur valeur numérique :

A. celles qui sont évaluées en appliquant des méthodes statistiques à une série de déterminations répétées,

B. celles qui sont évaluées par d'autres moyens.

Il n'y a pas toujours une correspondance simple entre le classement dans les catégories A ou B et le caractère "aléatoire" ou "systématique" utilisé antérieurement pour classer les incertitudes. L'expression "incertitude systématique" est susceptible de conduire à des erreurs d'interprétation ; elle doit être évitée.

Toute description détaillée de l'incertitude devrait comprendre une liste complète de ses composantes et indiquer pour chacune la méthode utilisée pour lui attribuer une valeur numérique.

2.2) Les composantes de la **catégorie A** sont caractérisées par les variances estimées s_j^2 (ou les écarts types estimés s_j et les nombres v_j de degrés de liberté.

Le cas échéant, les covariances doivent être données.

2.3) Les composantes de la **catégorie B** devraient être caractérisées par des termes u_j^2 qui peuvent être considérés comme des approximations des variances correspondances dont on admet l'existence. Les termes u_j^2 peuvent être traités comme des variances et les termes u_j comme des écarts type.

2.4) L'incertitude composée devrait être caractérisée par la valeur obtenue en appliquant la méthode usuelle de combinaison des variances. L'incertitude composée ainsi que ses composantes devraient être exprimées sous la forme "d'écarts type".

2.5) Si pour des utilisations particulières, on est amené à multiplier par un facteur l'incertitude composée afin d'obtenir une incertitude globale la valeur numérique de ce Facteur doit toujours être donnée.

3) Procédure proposée pour l'établissement des formules d'incertitudes dans les opérations d'étalonnage

- Etablir un bilan aussi complet que possible des causes d'incertitudes affectant la méthode d'étalonnage
- Appliquer les corrections des incertitudes à caractère systématique
- Ne pas prendre en compte les causes d'incertitudes liées aux caractéristiques de l'instrument à étalonner. En effet, il s'agit de caractériser une procédure indépendante de cet instrument.

Le laboratoire d'étalonnage devra indiquer ces incertitudes lorsqu'il réalisera l'étalonnage de l'instrument et délivrera un document d'étalonnage

- Evaluer la contribution de chaque composante de l'incertitude :
 - .les composantes de **type A** seront estimées en appliquant des méthodes statistiques,
 - . les composantes de **type B** seront appréciées en se fondant sur l'expérience. Il est de pratique courante d'apprécier l'incertitude maximale des composantes, dans ce cas **uj** peut être donné par la règle pratique suivante :

$$U_j = \frac{\text{incertitude} * \text{Maxi} * \text{de} * \text{la} * \text{composante}}{3}$$

- Calculer l'estimation de l'écart type composé :

dans le cas où les composantes pourraient être considérées comme indépendantes, l'écart type composé s'obtient en réalisant une somme quadratique :

$$s = \sqrt{\sum s_i^2 + \sum u_j^2}$$

NOTA : Dans le cas où un terme fonction du carré de la grandeur mesurée apparaîtrait sous le radical, cela conduit à des expressions compliquées, et afin de simplifier les formules, on pourra employer la règle empirique et approximative suivante :

$$\sqrt{A^2 + B^2 L^2} \implies \mathbf{a + bL}, \mathbf{L} \text{ étant la grandeur mesurée}$$

4) Calcul de l'incertitude globale

Le résultat final d'un mesurage s'exprime, d'une part, par l'estimateur **μ** de la valeur vraie et, d'autre part, par l'estimation de l'incertitude globale. Dans la pratique, il est habituel d'indiquer l'incertitude sous forme d'un intervalle à l'intérieur duquel se situe, avec une forte probabilité, la valeur vraie de la grandeur mesurée.

Si l'on connaît la loi de distribution de la population, on peut, à partir d'une variance connue, déterminer un intervalle de confiance correspondant à un niveau de confiance donné.

S'il s'agit, par exemple, d'une loi de distribution normale, les limites de confiances correspondant respectivement aux niveaux de confiance de 95 % et de 99 % sont voisines de 2s et de 3s. Il paraît assez évident que, sauf cas particulier, on ne connaît pas la loi de distribution de **μ** et que

l'hypothèse d'une distribution normale, par exemple, est assez arbitraire. On peut alors déterminer conventionnellement et indépendamment de la forme de la loi de distribution, un "intervalle d'incertitude", analogue à un intervalle de confiance, mais pris dans un sens élargi. On calcule ainsi une incertitude globale $\Delta\mu$, qui est obtenue en multipliant l'écart type déterminé pour μ par un facteur conventionnel k , égal à 2 ou 3, par exemple.

Dans le cadre des chaînes d'étalonnage, nous choisissons les limites de confiance $\pm 3s$ correspondant à un niveau de confiance de 99,7 %.

L'incertitude globale s'exprimera donc sous la forme :

$$\Delta\mu = \pm k s$$

avec $k \geq 3$

Plus récemment, (1997) [58] des travaux sous forme d'intercomparaison ont été entrepris dans le cadre des travaux du CIRP- Euromet par l'intercomparaison sur la mesure des plaques à billes.

A BALZAMO de l'institut Colonnetti de Turin,

M FRANKE, E TRAPET, F WALDELE du PTB en Allemagne,

L DE JONGE, P VANHERCK, de l'université catholique de Louvain en Belgique.

Le travail effectué par ces trois laboratoires est basé sur la mesure de plaques à billes à l'aide de deux machines CMM1 et CMM2..

La première à Braunschweig en Allemagne (PTB Physikalisch-Technische Bundesanstalt) avec une machine dont la résolution du capteur est $0.1 \mu\text{m}$ sur une plaque de $532 \times 532 \text{ mm}^2$ et la seconde sur une machine à Turin (Instituto di Metrologia G.Colonnetti) dont la résolution est $0.5 \mu\text{m}$ sur une plaque à billes de $332 \times 332 \text{ mm}$.

La méthode de mesure applique le calcul par les polynômes de Tchébitcheff pour le laboratoire de Turin et une méthode dite de B-splines du PTB pour le laboratoire de Braunschweig et par le laboratoire de Louvain. (KUL Katholieke Universiteit Leuven)

L'objectif est de donner un résultat de compensation globale sur les machines considérées CMM1 et CMM2.

Les deux plaques à billes ont été étalonnées au préalable par le PTB.

Les incertitudes sur les plaques varient de $1.1 \mu\text{m}$ pour la plaque de 532×532 et $0.9 \mu\text{m}$ pour celle de 332×332 avec $k=2$

Un premier résultat prend en compte les valeurs non compensées dans 16 positions des plaques à billes pour chacune des 2 machines.

Après un maillage sur l'étendue de mesurage de chacune des machines, chaque maille représente une parallépipède orthogonal de $10 \times 5 \times 5 \text{ mm}$ et 500 points de mesure.

Une comparaison avec un objet virtuel obtenu sur ordinateur chaque point est compensé suivant les 18 erreurs soulignées par P CHOLLET (6 erreurs par axe) .

Les résultats du tableau n° 1-4 montre les valeurs non corrigées dans la colonne de gauche et les valeurs obtenues par chaque laboratoire après modélisation des résultats.

Tableau n°1 4 Intercomparaison EUROMET

	Valeurs originales μm	Valeurs IMGC μm	Valeurs KUL μm	PTB μm
CMM1				
Std deviation	12.88	0.32	0.37	0.73
Maximum	34.75	0.90	1.11	2.48
N de positions	9	9	9	2
CMM2				
Std deviation	3.23	0.68	0.68	0.94
Maximum	11.94	2.50	2.31	3.41
N de positions	14	14	14	6

Le tableau n°1-5 donne le résultat final des intercomparaisons triangulaires après comparaison avec l'objet virtuel.

Tableau n°1 5 Après intercomparaison avec objet virtuel

	IMGC-KUL μm	IMGC-PTB μm	KUL-PTB μm
CMM1			
Std deviation	1.5	0.6	1.5
Maximum	8.2	2.3	9.0
CMM2			
Std deviation	0.004	1.0	1.0
Maximum	0.015	4.2	4.2

Les auteurs concluent qu'une première approche montre l'efficacité de la correction des machines à partir des plaques à billes.

De plus la stabilité des résultats et le maillage très fin de ces mêmes machines permet, à partir d'objets virtuels, de globaliser et de mieux appréhender les incertitudes dues aux défauts géométriques des MMC.

1-2-4-Conclusions :

La compensation par logiciel, si elle a permis de faire évoluer les MMT d'une manière très significative, ne peut pas prendre en compte toutes les incertitudes occasionnées par les différentes configurations utilisées par l'opérateur lors de la mesure .

Elle corrige les erreurs de type systématique, donc à priori "connues" et elles peuvent donc être incluses dans le logiciel spécifique de la machine.

Mais dans un calcul d'incertitude de mesure, ce sont les valeurs des différentes erreurs estimées globalement ou calculées statistiquement qui donnent une incertitude globale. (Voir annexe D). Les différents constructeurs donnent des incertitudes de mesure sous la forme :

$$A+bL$$

Où A est une incertitude simplifiée et assez empirique que l'on peut assimiler à de la fidélité et b une erreur globale fonction de L (longueur de mesure).

Mais ils ne précisent pas dans quelles conditions et avec quels paramètres ces valeurs sont données.

Les normes actuelles (ISO 10360-2/VDI/VDE 2617) [52] sont des normes de réception globale des machines à mesurer qui permettent l'acceptation ou non d'une machine mais elles ne permettent pas de définir la réelle incertitude de mesure, car elles ne précisent pas complètement les conditions de mesure des étalons vérifiés.

Et l'intercomparaison entre différentes machines à mesurer organisée par le Bureau National de Métrologie [7] a permis de mettre à jour des distorsions importantes entre les incertitudes supposées par chaque opérateur et les incertitudes réelles obtenues.

1-2-5-Objectifs des travaux qui vont suivre :

Afin de faciliter l'estimation de l'incertitude d'une machine à mesurer et donc d'en tirer des conclusions sur la capacité de mesure pour une vérification spécifique, nous proposons une série de résultats statistiques permettant d'estimer une incertitude type et par logiciel une erreur globale permettant de calculer l'indice de capacité des moyens de mesure (CMM). (annexe E)