

La machine de mesure tridimensionnelle

1. Place de la MMT dans le processus d'usinage

La machine de mesure tridimensionnelle assure la boucle de retour d'un processus d'usinage. Les entrées multiples dans le processus d'usinage (outils, réglages, montages, bruts) peuvent être corrigées en fonction des mesures afin d'optimiser le processus d'usinage.

Par exemple :

- suivre l'usure de l'arête de coupe par l'évolution de la dimension obtenue
- retoucher l'alignement de la contre-pointe de la valeur correspondante au défaut de conicité sur un arbre cylindrique
- percer les bruts dont le noyau a été déporté lors de la coulée, afin que l'alésage obtenu ne soit pas ovalisé

Avant tout lancement d'une nouvelle série, il convient de réaliser un prototype puis une pré-série.

Le prototype :

Généralement unitaire, il permet de faire le bilan technique d'une étude en testant la faisabilité. La MMT est utilisée pour le contrôler entièrement.

La pré-série :

Pendant la pré-série, on cherche à stabiliser le processus d'usinage. Par un contrôle de toutes les pièces, la MMT permet d'analyser l'événement et de décider sa modification en intervenant sur les entrées du processus.

Dans le cas où les spécifications ne sont pas atteintes, l'analyse des résultats obtenus permettra de corriger les technologies et les réglages, pour atteindre ces spécifications. Ce seront les retouches partielles sur :

- les montages modulaires
- les paramètres relatifs à l'outil de coupe
- les paramètres relatifs aux axes numérisés
- éventuellement les bruts

C'est le **régime transitoire** du processus.

Exemples :

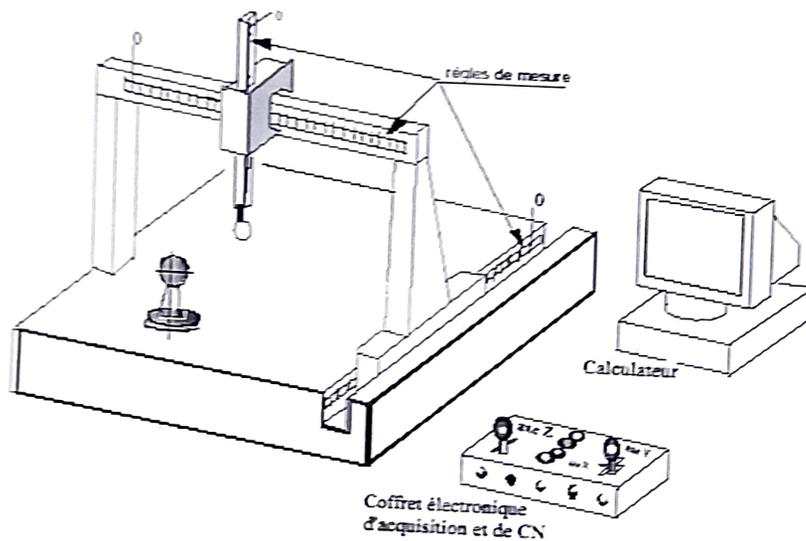
- si une perpendicularité n'est pas respectée, on réglera à nouveau les appuis isostatiques du montage, en fonction des valeurs chiffrées de la mesure
- si un entraxe de 2 cylindres sort de son intervalle de tolérances, on changera la valeur du déplacement programmé entre les deux cylindres
- si un alésage obtenu est trop grand, on corrigera la valeur du correcteur d'outil ou l'on changera la plaquette trop usée.

La série :

Pendant la série, le flux est optimal et on recherche à préserver la précision, la fiabilité et la qualité du processus d'usinage. Dans cette période, tout est stabilisé et le processus est en **régime permanent**. On va suivre la régularité et l'évolution par des méthodes statistiques. Les observations s'effectuent par prélèvement. L'analyse des lots permet de chiffrer la précision et de dresser les cartes de contrôles. On peut réagir à toutes perturbations éventuelles ou à un changement d'état des entrées du processus d'usinage.

2. Technologie des MMT

2.1 Structure générale d'une MMT

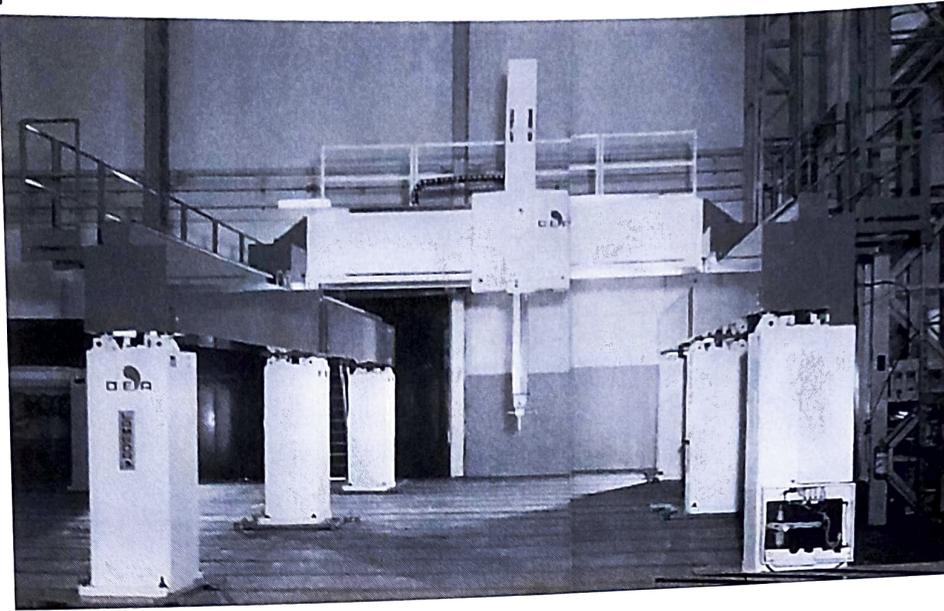


2.2. Besoins et technologies associées

2.2.1 Capacité de mesure

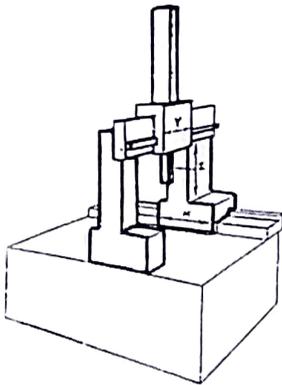
Le premier critère dans le choix d'une machine à mesurer tridimensionnelle est la capacité dimensionnelle de mesure de la machine. Il faut en effet que les courses de la machine soient suffisantes pour venir palper l'ensemble des points de la pièce à mesurer.

Par exemple, l'architecture en pont permet de disposer de machines de très grande capacité. DEA qui est le leader propose en machine *Lambda* avec une capacité de 16000 en X, 6350 en Y et 4070 en Z.

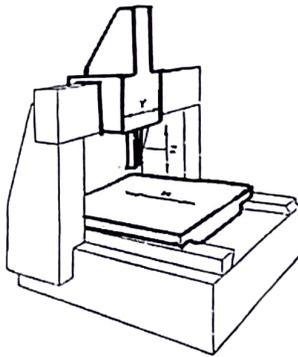


2.2.2 Accessibilité

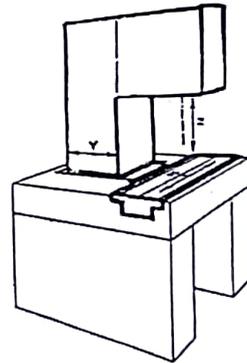
a) la structure de la machine



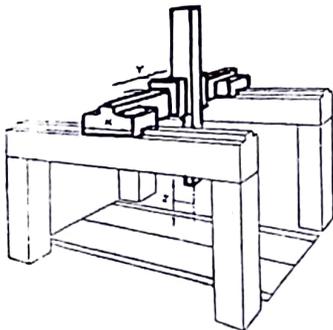
PORTIQUE



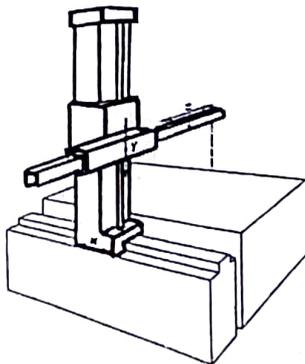
PORTIQUE FIXE



COL DE CYGNE

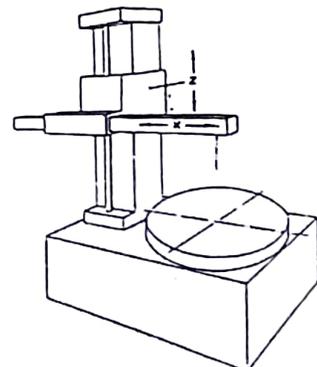


PONT



POTENCE

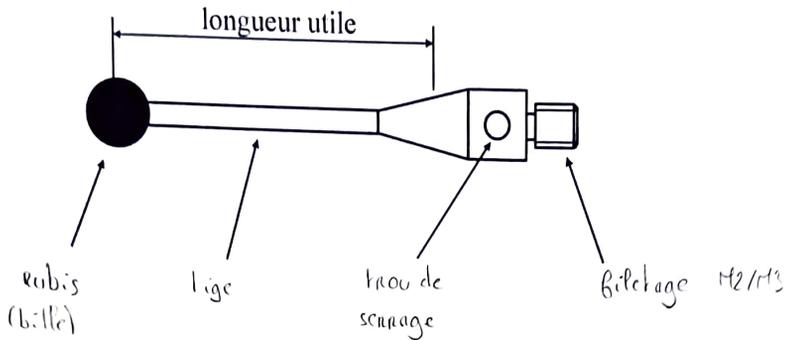
peux iml



CYL INDRO-POLAIRE

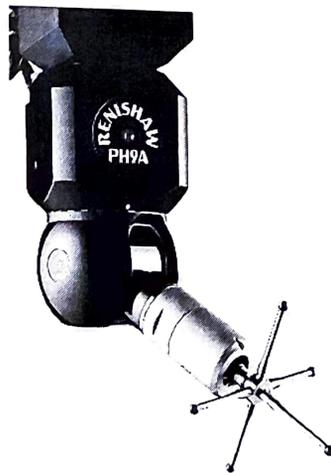
b) les stylets et la tête de palpation

Les stylets à bille rubis

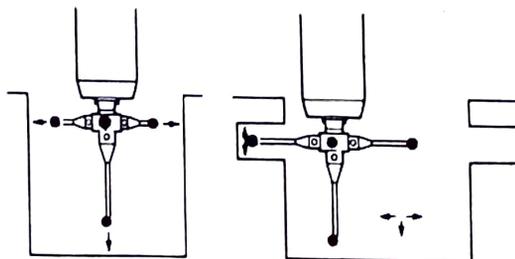


Ces stylets conviennent pour la majorité des tâches de contrôle.
 Le rubis industriel est une matière céramique extrêmement dure qui minimise l'usure des billes.
 Par ailleurs sa faible densité réduit au minimum la masse de la touche, ce qui évite les déclenchements intempestifs causés par les mouvements de la machine ou les vibrations.
 La tige est en acier inoxydable, en céramique ou en carbure afin d'assurer une bonne rigidité.

Le Stylet en étoile :



L'étoile permet, avec une tête de palpation non orientable, de palper tous les éléments sans démontage du stylet ou de la pièce.



Chaque tige d'un stylet en étoile doit être étalonné de la même manière qu'un stylet à bille simple.

2.2.3 Précision

a) le guidage

La plupart des machines à mesurer sont équipées de patins aérostatiques pour assurer la fonction guidage et la fonction sustentation. La technologie de ces patins est propre à chaque constructeur.

Cette solution présente un certain nombre d'avantages :

- faibles efforts de déplacements
- amortissement des vibrations
- pas d'usure de pièces mécaniques

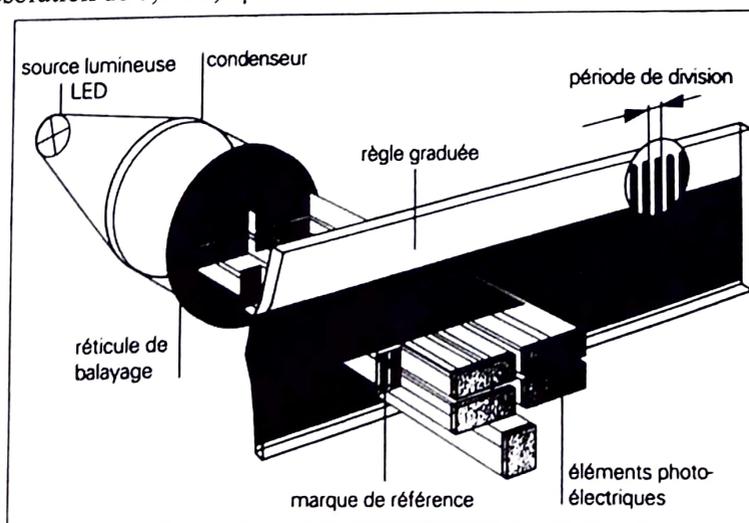
L'inconvénient majeur est que l'air utilisé doit être propre et sec.

Pour les machines de grandes capacités, le guidage mécanique est préféré. Il est constitué :

- de galets fixes et presseurs
- de galets à rouleaux
- de douilles à billes avec dispositifs de recyclage de billes

b) les capteurs de mesure des déplacements

Pour presque la majorité des machines, le système retenu est un système optoélectronique. Il s'agit d'une règle verre ou en acier sur laquelle est gravée un réseau de traits (pas de gravure 16 ou 40 μm). Le capteur proprement dit comporte 4 photodiodes fournissant des signaux sinusoïdaux. Ces derniers, transformés en signaux carrés, permettent par comptage des fronts montants et descendants de repérer le déplacement de l'élément mobile. La présence de plusieurs diodes déphasées les unes par rapport aux autres permet d'augmenter la résolution de la règle et de détecter le sens de déplacement. Ce capteur permet avec des traits distants de 40 μm d'avoir une résolution de 1 à 2 μm et avec des traits distants de 16 μm une résolution de 0,1 à 0,2 μm .



Sur cette règle est disposé, tous les 100 mm, un module sur lequel la machine se recale lors du comptage des pas incrémentaux.

Une marque de référence et une diode photoélectrique supplémentaire permettent de définir une origine absolue sur la règle. Il est donc nécessaire de faire à l'initialisation de la machine un recalage sur cette origine (prise d'origine machine POM).

La fixation de la règle peut être *semi-libre* pour laisser la règle se dilater sous l'action des gradients de température ou *forcée* pour compenser certaines erreurs de justesse de la gravure.

Quelque soit la solutions technologiques employées, la qualité du guidage dépend effectivement de la qualité des éléments mais surtout de la géométrie (rectitude et position angulaire) des supports de guidage (pistes, glissières).

Certains logiciels permettent aujourd'hui de compenser ces défauts en les quantifiant.

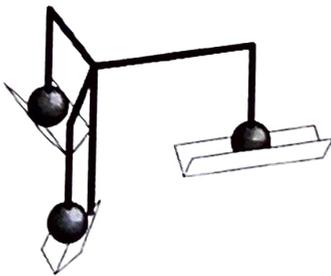
c) La tête de palpation

Cet élément établit la relation entre le contact physique du palpeur sur la pièce et la lecture des trois déplacements.

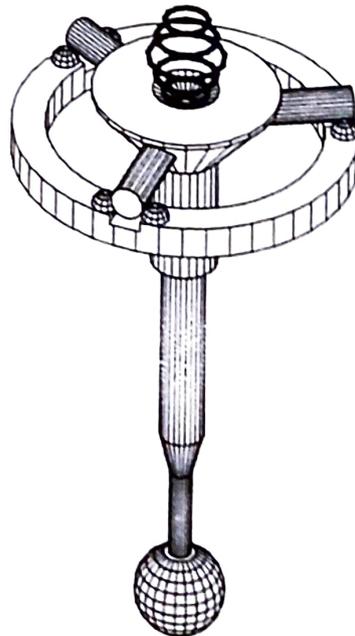
Il existe deux type de tête de palpation :

Tête de palpation dynamique

C'est la tête de palpation la plus répandue, elle permet une mesure suivant toutes les directions. Elle est constituée d'une liaison isostatique réalisée entre deux pièces par un triplet de trois liaisons annulaires (liaison de Boys). Un ressort réglable maintient les deux pièces de la liaison en contact. L'information qui déclenche l'acquisition de la mesure est obtenue par rupture du contact électrique établi entre les deux pièces de la liaison isostatique. Cette technologie ne permet que des mesures point par point.



Schématisme de la Liaison de Boys



Principe d'un palpeur dynamique à déclenchement

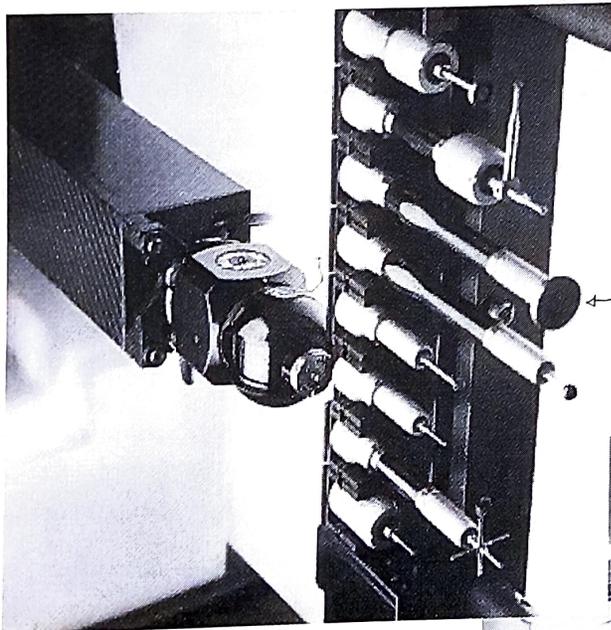
plus dynamique mais plus lente

Tête de palpation statique

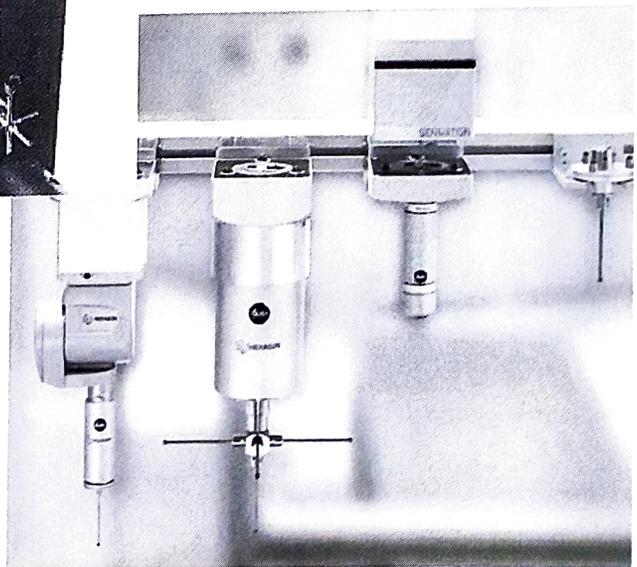
Cette tête est constituée d'une mécanique à lames élastiques permettant un faible déplacement 3D du palpeur. Les lames élastiques sont équipées de capteurs inductifs donnant une information sur la position 3D du palpeur. A l'aide de la machine à mesurer, on asservit en position la tête de palpation. Le déplacement des lames élastiques provoqué par un contact sur le palpeur est annulé par l'asservissement de la machine. Le retour à l'équilibre de la tête de palpation déclenche l'acquisition de la mesure. La répétabilité de position du palpeur est meilleure que $0,1 \mu\text{m}$. Cette tête de palpation effectue ses mesures machine à l'arrêt, point par point. Elle offre toutes les possibilités liées à l'asservissement en position tel que l'autocentrage du palpeur dans un alésage ou une rainure de faible dimension.



Changement automatique de palpeurs



rainure de sélection



2.3. Les autres moyens d'acquisition

La Caméra C.C.D.

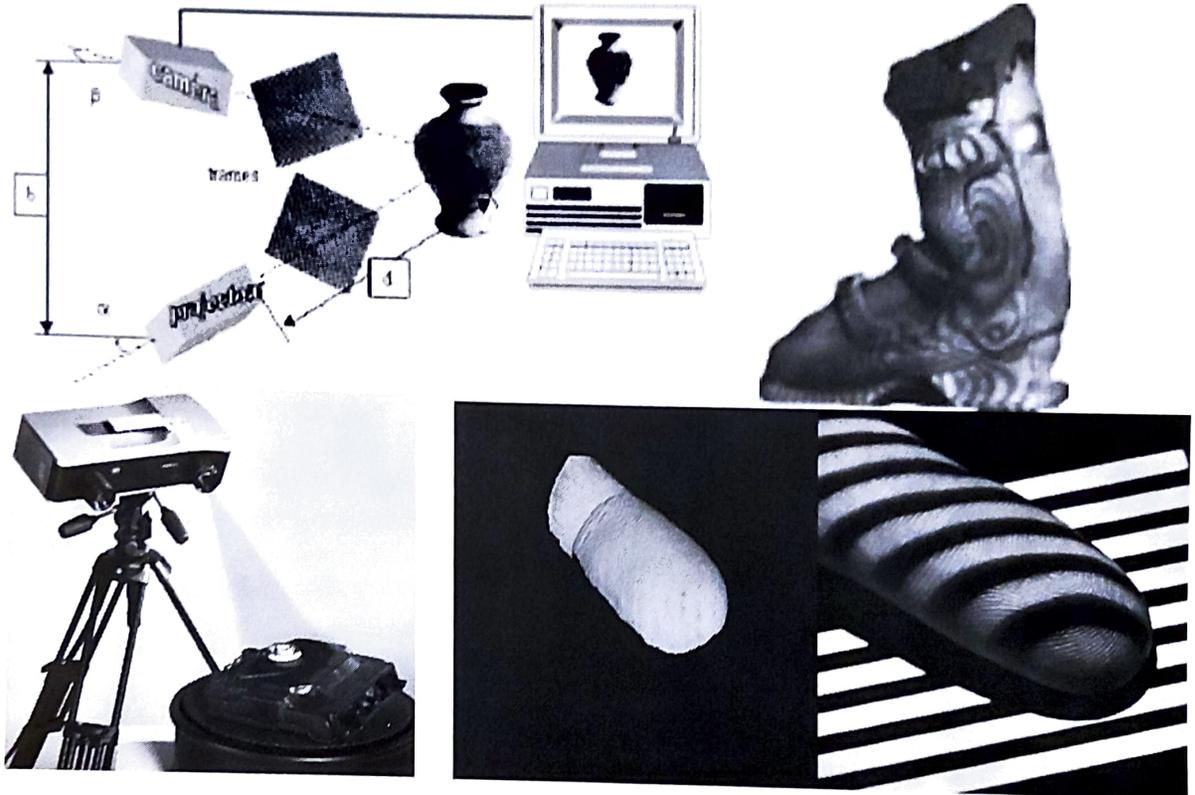
Les points sont pris par des techniques de recherche de contrastes.

Avantages :

- aucun effort sur la pièce
- prise de points rapide

Inconvénient :

- ne fonctionne bien que sur des pièces sans trop de petites cavités



Le Capteur LASER

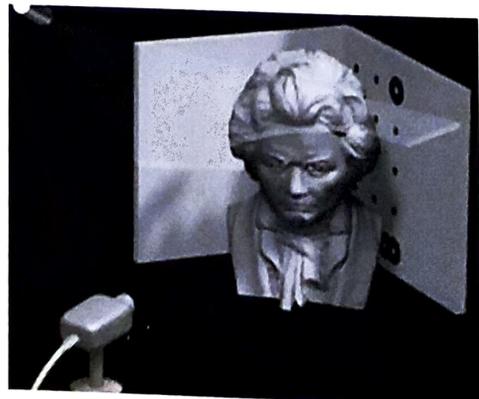
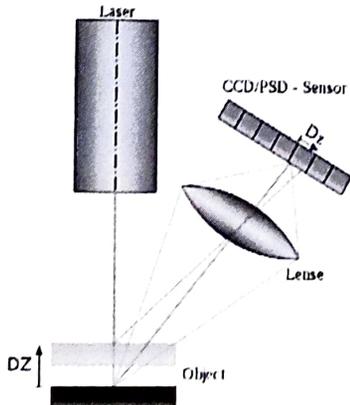
L'acquisition des points se fait par récupération d'un rayon LASER réfléchi sur la pièce.

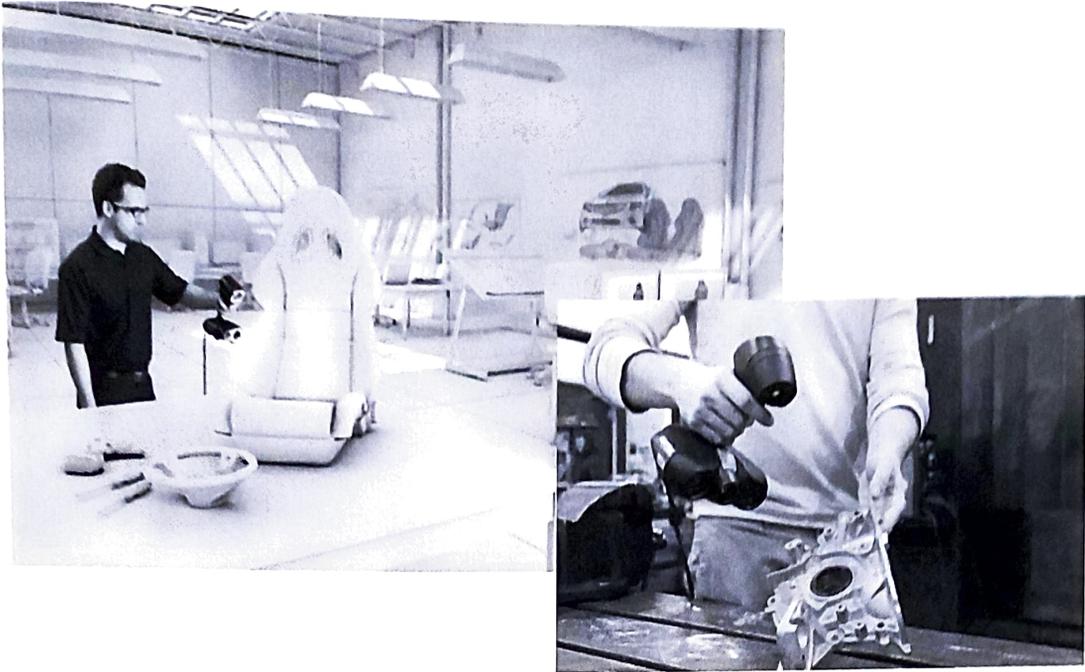
Avantages :

- aucun effort sur la pièce
- prise de points rapide

Inconvénient :

- la réponse varie en fonction de la qualité de la surface réfléchissante (matière et état de surface)





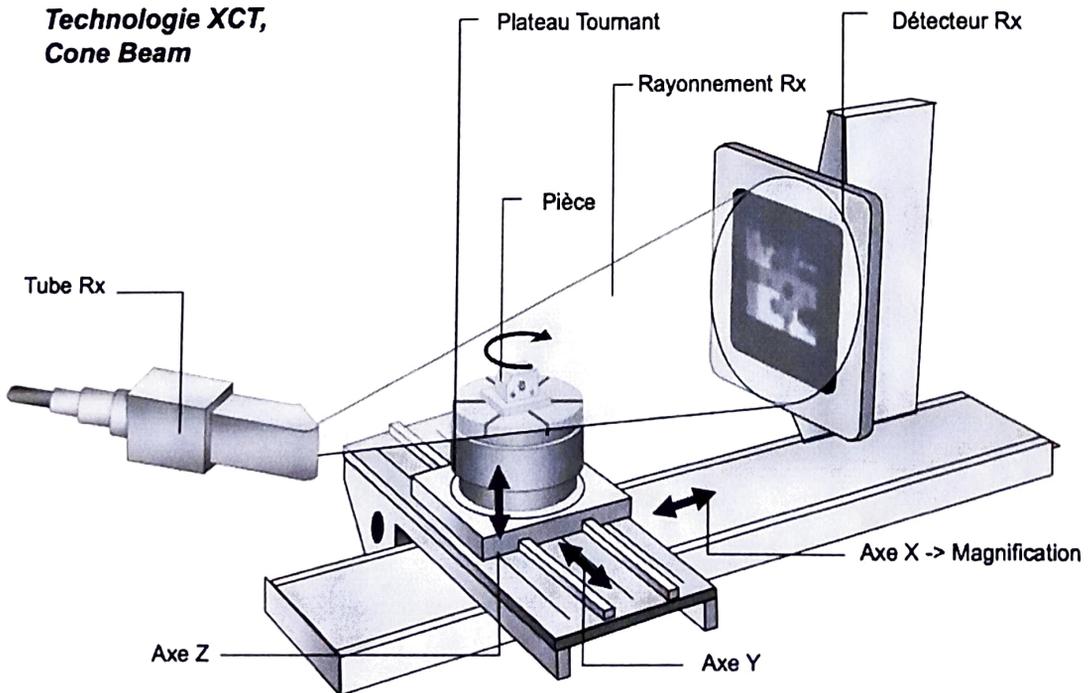
La tomographie

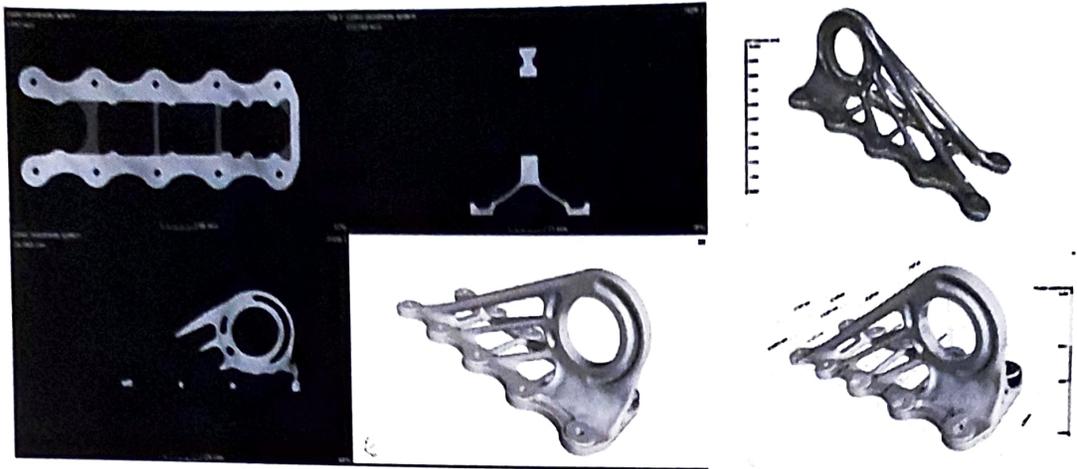
L'acquisition des points se fait par une succession de radiographie et détection des contrastes.

Avantages : - on peut voir des cavités et des formes intérieures

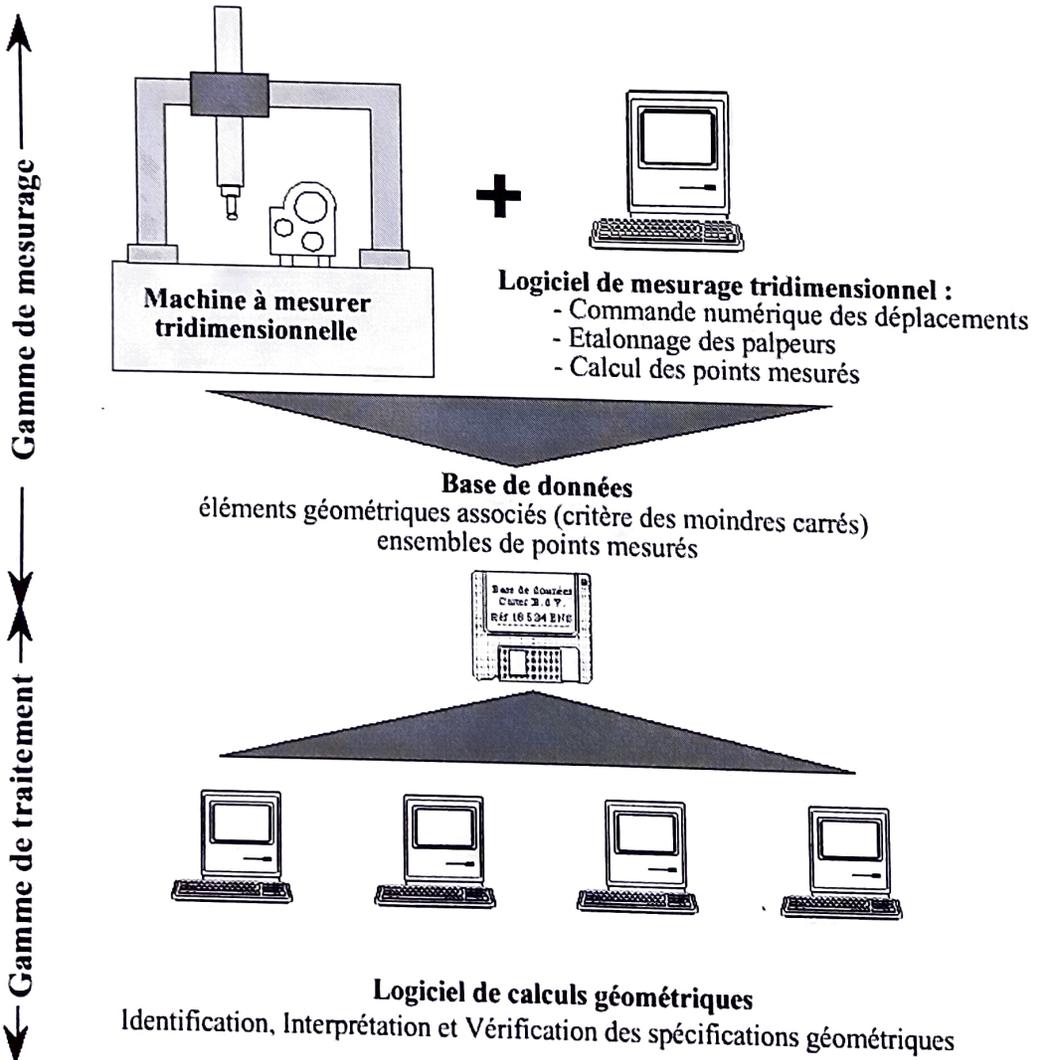
Inconvénient : - lent et cher

Technologie XCT, Cone Beam





3. Mise en œuvre d'un contrôle métrologique sur MMT



Les opérations de contrôle et de mesure tridimensionnelle peuvent-être regroupés en deux gammes distinctes: une gamme de mesurage permettant de faire l'acquisition des points mesurés, et une gamme de traitement permettant par calcul : d'identifier, d'interpréter et de vérifier les spécifications géométriques.

La gamme de mesurage est nécessairement exécutée sur une machine à mesurer tridimensionnelle, elle prend en compte toutes les précautions techniques habituelles qui sont liées à la qualité des mesures désirées. La gamme de métrologie s'appuie sur une base de données acquises lors du mesurage, elle peut donc être exécutée sur un calculateur indépendant de la machine à mesurer.

La méthodologie suivie pour concevoir ces deux gammes peut-être décrite en quatre étapes.

3.1 Première étape : inventaire des éléments géométriques réels.

L'analyse du dessin de définition doit permettre de faire l'inventaire des éléments géométriques concernés par les spécifications et d'en choisir les ensembles de points à mesurer les plus représentatifs.

Il existe peu de règles permettant d'effectuer ces choix, l'expérience tient ici un rôle essentiel, on peut cependant énoncer les quelques règles suivantes :

- la nature des éléments géométriques doit être choisie dans une liste disponible dans le logiciel de mesurage (point, droite, cercle, plan, sphère, cylindre, cône),
- la nature des éléments géométriques doit tenir compte de l'étendue de la surface (par exemple choix entre un cylindre et un cercle), et de l'éloignement de la caractéristique géométrique recherchée par rapport à la surface (par exemple intersection de l'axe d'un cylindre de faible hauteur avec un plan éloigné de la surface du cylindre),
- le nombre de points doit être supérieur ou égal au nombre de paramètres de l'élément géométrique,

<i>nature</i>	<i>Nombre de points</i>
droite	≥ 2
plan	≥ 3
cercle	≥ 3
sphère	≥ 4
cylindre	≥ 5
cône	≥ 6

= Cercle + droite
2 cercles

- la répartition des points doit se faire sur toute l'étendue de la surface et mettre en évidence les défauts de forme dus au mode de fabrication,
- l'algorithme des moindres carrés est sensible à une densité de points localement plus importante,
- le nombre de points doit permettre un compromis entre une bonne représentativité de l'élément, et un temps de mesure minimum.

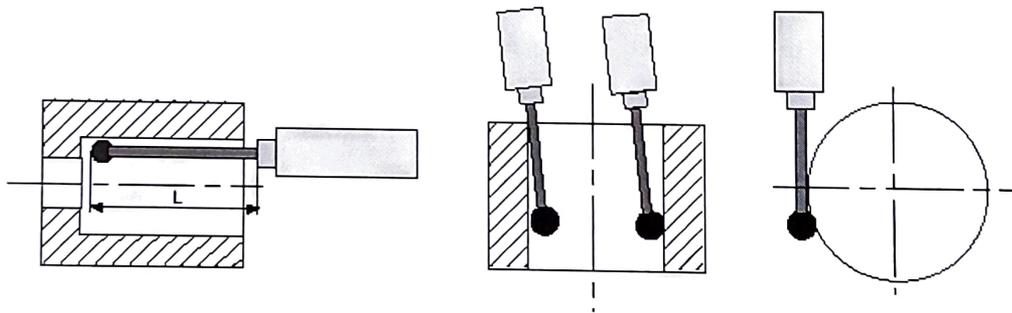
3.2 Deuxième étape : palpage des surfaces des lignes et des points

Définition du posage : il convient à cette étape de définir le type de gamme que l'on a à mettre en place : s'agit-il de la gamme destinée à un contrôle d'une pièce prototype ou d'une série de pièces ?

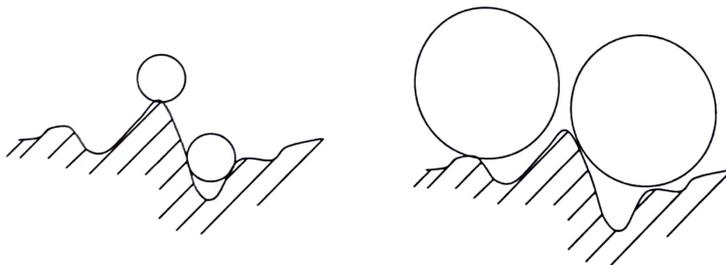
Dans le cas d'une série, il faudra définir un montage de mise en position sur le marbre où chaque pièce sera posée. La gamme sera alors exécutée de manière automatique.

Le posage de la pièce est fixé conjointement avec le choix du palpeur. La pièce doit être posée sur le marbre de telle façon que toutes les surfaces à palper soient accessibles par le palpeur.

Choix des palpeurs : Pour chaque orientation de palpage, le stylet est choisi de telle sorte que sa longueur reste suffisante pour atteindre toutes les surfaces, et que son diamètre de sphère de palpage reste inférieur à la plus petite des cavités de la pièce. Cependant le diamètre de la sphère du stylet doit être suffisamment grand pour éviter toute collision entre la tige du stylet et la surface palpée, en effet le stylet n'est jamais parfaitement aligné avec la direction générale de la surface.



Les Normes NFE10-106 à 108 recommandent aussi d'utiliser une touche de diamètre aussi grand que possible afin d'assurer un filtrage mécanique des écarts des 3^{ème} et 4^{ème} ordre (rugosité) et ceux du 2^{ème} ordre.



Étalonnage d'un palpeur : Les coordonnées de point récupérées par le calculateur, par l'intermédiaire des règles optiques, sont celles du centre de la bille de palpation et non celles du point palpé.

De ce fait, le calculateur doit corriger la position de l'élément géométrique calculé.

Dans le cas d'un plan par exemple, le plan réel se trouve décalé de la valeur du rayon de la bille de palpation par rapport au plan calculé avec les points indiqués par les règles.

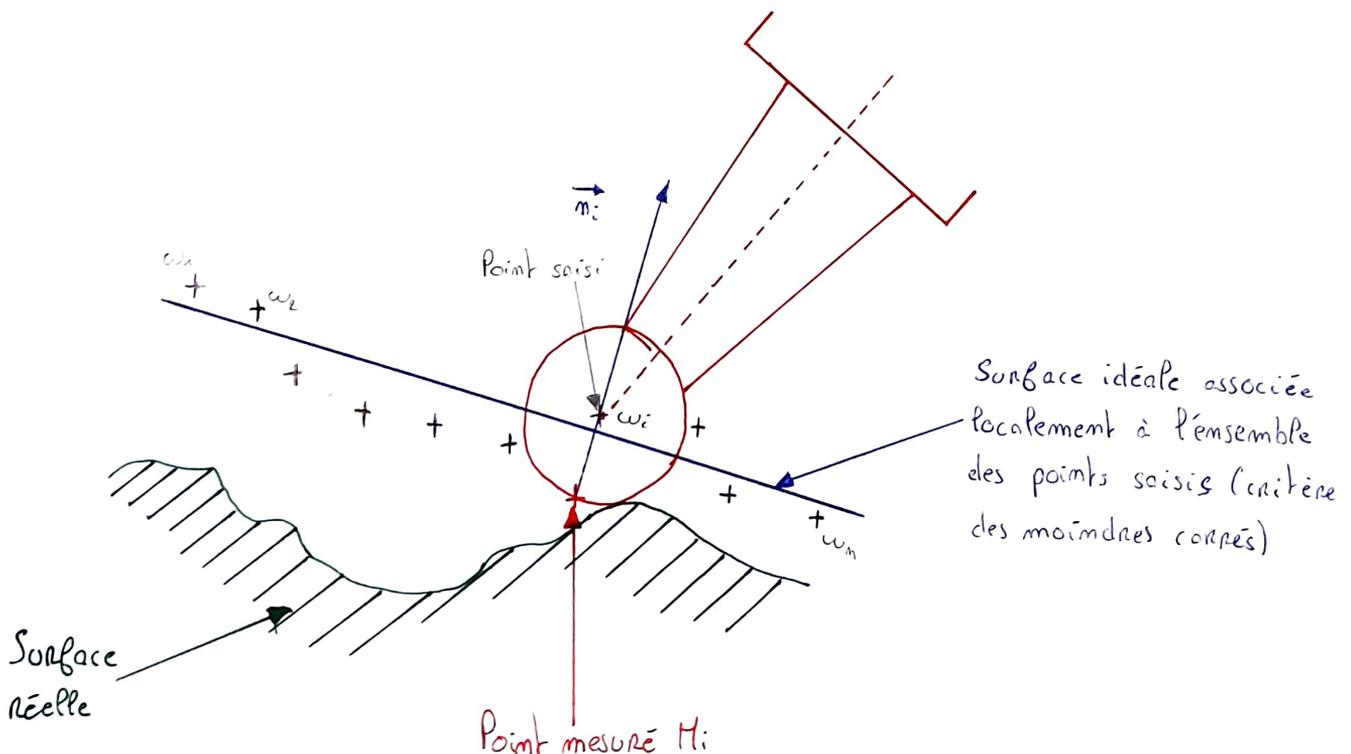
En fait, le rayon réel de la bille n'est pas suffisant pour définir ce décalage. En effet, la pression de tarage du ressort de la tête de palpation engendre une inclinaison du stylet au moment de l'acquisition du point. Pour simplifier, ce décalage est appelé **constante du palpeur**.

Pour déterminer cette constante de palpation, une mesure de la bille ne suffisant pas, il faut procéder à l'étalonnage du palpeur sur une bague étalon ou sur une sphère étalon de diamètre connu et certifié conforme à l'étalonnage.



Palper les surfaces :

- A chaque contact entre le palpeur et une surface, on relève les coordonnées du centre de la sphère du stylet exprimées dans un repère unique de mesure. Les points palpés doivent être répartis



3.3 Troisième étape : constitution de la base de données des éléments géométriques réels (associés et mesurés)

L'information géométrique contenue dans la base de données d'une MMT s'appuie sur trois éléments géométriques de base : le point, la droite et le plan. Ils sont définis par les coordonnées d'un point et dans le cas d'une droite ou un plan par les composantes d'un vecteur unitaire.

A partir des ensembles de points saisis on calcule les points de contacts avec les surfaces réelles ainsi que les paramètres des éléments géométriques associés aux points de contacts.

Dès qu'une surface est palpée, le logiciel sauvegarde l'élément avec les informations suivantes :

- nom de l'élément
- type d'élément
- position et orientation de l'axe ou de la normale dans le repère machine ou pièce
- dimensions intrinsèques : diamètre cylindre, défaut de forme ...
- ...

3.4 Quatrième étape : Définitions normalisées des spécifications, interprétation des spécifications, vérification des spécifications

Cette étape nécessite une bonne connaissance des normes sur les spécification ainsi qu'une bonne maîtrise des possibilités de calcul offertes par le logiciel de mesure tridimensionnelle. Par constructions géométriques les logiciels permettent de définir à partir des éléments contenus dans la base de données de nouveaux éléments de types point droite et plan, ainsi que de construire des repères.

Des constructions sont très souvent réalisées lors d'un contrôle sur MMT lorsque l'élément géométrique nécessaire à la vérification d'une spécification ne peut pas être palpé directement. C'est très souvent le cas pour des éléments linéaires tels que la droite ou le cercle.

Toutes les constructions ne se font qu'entre deux éléments et sont conditionnées au départ par le résultat à obtenir qui est lui-même un élément géométrique.

On peut recenser les constructions suivantes :

- intersection
- élément médian
- projection
- symétrie

Le schéma suivant regroupe les étapes et les moyens nécessaires à une gamme de contrôle géométrique.

