

# METROLOGIE TRIDIMENSIONNELLE

## 1ère Partie - Sommaire

<b>1. GENERALITES</b>	<b>2</b>
<b>1.1. Définitions</b>	<b>2</b>
1.1.1. Métrologie ou Mesure	2
1.1.2. Contrôle	2
1.1.3. Etalon	2
1.1.4. Capteur	2
<b>1.2. Propriétés générales des instruments de mesure</b>	<b>2</b>
1.2.1. La Fidélité	2
1.2.2. La Justesse	3
1.2.3. La Sensibilité	3
1.2.4. La Précision	3
1.2.5. Erreurs de mesure	3
1.2.6. Courbe d'étalonnage d'un instrument	4
1.2.7. Conditions de référence	4
1.2.8. La Règle des 10 et le rattachement à la chaîne métrologique nationale	4
<b>2. LES MACHINES A MESURER TRIDIMENSIONNELLES</b>	<b>5</b>
<b>2.1. Généralités</b>	<b>5</b>
<b>2.2. Constitution d'une MMT</b>	<b>5</b>
2.2.1. La structure de déplacement	6
2.2.2. Le système de palpation	6
2.2.3. Le système électronique	6
2.2.4. Le système informatique et le pupitre de commande	6
<b>2.3. Les types de machines</b>	<b>7</b>
2.3.1. Morphologie	7
2.3.2. Différents types de commandes	8
<b>2.4. Mode de fonctionnement de la MMT TRI-MESURES</b>	<b>9</b>
2.4.1. Introduction	9
2.4.2. Méthode de mesure	9
<b>3. LE SYSTEME DE PALPAGE</b>	<b>12</b>
<b>3.1. Généralités</b>	<b>12</b>
<b>3.2. Principe de fonctionnement</b>	<b>13</b>
<b>3.3. Etalonnage des palpeurs</b>	<b>13</b>
3.3.1. Procédure d'étalonnage d'un palpeur simple	13
3.3.2. Etalonnage d'un système en étoile	13
<b>3.4. Codification d'un système de palpation</b>	<b>14</b>

# 1. Généralités

## 1.1. Définitions

### 1.1.1. Métrologie ou Mesure

Opération permettant de définir la valeur d'une grandeur avec une précision plus ou moins grande, compte tenu des moyens de mesure utilisés et des conditions de mesure.

Ex: On utilise un micromètre ou une machine à mesurer qui crée une information du type "la dimension vaut 50.021"

### 1.1.2. Contrôle

Opération permettant de définir si la grandeur réelle de l'élément à vérifier est conforme à la valeur exigée.

Ex: On utilise un calibre "Rentre ou ne rentre pas" qui crée une des informations ci-dessous:

- a) la valeur est plus petite que le mini
- b) la valeur est dans l'intervalle de tolérance
- c) la valeur est plus grande que le maxi

### 1.1.3. Etalon

Instrument permettant de définir, matérialiser, conserver ou reproduire l'unité de mesure d'une grandeur pour la transmettre par comparaison à d'autres instruments de mesure.

### 1.1.4. Capteur

Elément de l'appareil de mesure assurant la prise d'information relative à la grandeur à mesurer.

## 1.2. Propriétés générales des instruments de mesure

D'une façon générale la métrologie a pour but de définir la VALEUR de GRANDEURS PHYSIQUES avec un degré d'incertitude aussi faible que nécessaire .

Un instrument de mesure permet d'établir une relation entre la valeur du mesurande M ( grandeur faisant l'objet de la mesure ) et la valeur lue L du résultat de la mesure .

La qualité des appareils de mesure peut être caractérisée par:

- la fidélité
- la justesse
- la sensibilité
- la précision

On peut en donner les définitions suivantes :

### 1.2.1. La Fidélité

Elle caractérise la dispersion des mesures  $L_i$  d'une même grandeur

On en définit l'écart type  $\sigma$  :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2}{n-1}}$$

L'étendue de la dispersion dans laquelle se trouve 99,8% des observations est :  $D = 6,18 \sigma$

*Nota* : La définition de  $\sigma$  implique un grand nombre de mesures au cours desquelles il convient de s'assurer que le mesurande n'a pas évolué et que l'ambiance est la même .

### 1.2.2. La Justesse

Un appareil est réputé juste quand la moyenne  $\bar{L}$  d'un grand nombre de mesures  $L_i$  est confondue avec la valeur  $M$  du mesurande , quelle que soit la dispersion .

L'erreur de justesse  $J$  est définie par :

$$J = |\bar{L} - M| \quad \text{avec} \quad \bar{L} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} L_i}{n} = \text{moyenne des } L_i$$

### 1.2.3. La Sensibilité

C'est le rapport  $S$  entre le déplacement  $\Delta d$  de l'indicateur de l'instrument de mesure correspondant à une variation  $\Delta M$  de la grandeur mesurée .

$$S = \frac{\Delta d}{\Delta M}$$

Dans le cas des instruments de mesure des longueurs,  $\Delta d$  ( grandeur de sortie ) et  $\Delta M$  (grandeur d'entrée) s'expriment dans la même unité ; on utilise parfois le terme de POUVOIR D'AMPLIFICATION au lieu de sensibilité .

Remarque : La sensibilité n'est constante , sur l'étendue de mesure , que pour un appareil à réponse linéaire. Il convient d'introduire une distinction entre les appareils ayant une réponse analogique et ceux , maintenant fréquents, ayant une réponse numérique .

Dans le premier cas , la réponse est lue sur un CADRAN ou sur un ENREGISTREMENT présentant un certain nombre de graduations ;  $\Delta d$  est bien une longueur observable par un opérateur qui en déduit une valeur chiffrée . Dans le cas des instruments à sortie numérique , on obtient directement une valeur chiffrée ; la notion de sensibilité est remplacée par la notion de définition ou résolution de l'instrument ( Ex : définition de 0,01 mm ou définition de 0,001 mm ).

### 1.2.4. La Précision

C'est l'erreur absolue que l'on peut avoir en effectuant une mesure. La précision est la qualité globale de l'instrument du point de vue des erreurs. Plus la précision est grande , plus les indications sont proches de la valeur vraie. La précision englobe donc les différentes erreurs définies ci-dessus.

### 1.2.5. Erreurs de mesure

#### 1.2.5.1. Erreur systématique

C'est une erreur qui reste constante pour des mesures effectuées dans des conditions identiques.

#### 1.2.5.2. Erreur de zéro

C'est l'erreur qui caractérise l'écart de l'indication de l'instrument de mesure, pour la valeur zéro de la grandeur mesurée.

#### 1.2.5.3. Erreur de lecture

C'est l'erreur résultant d'une lecture inexacte de l'indication de l'instrument de mesure faite par l'opérateur.

#### 1.2.5.4. Erreur due à une évolution de la température

Ce type d'erreur est fréquent et il faut y penser constamment.

On retiendra la relation qui lie la variation dimensionnelle à l'élévation de la température.

Longueur initiale à température  $t_0 = L_0$

Longueur à la température  $t_1 = L_1$

Coefficient de dilatation linéaire du matériau =  $\alpha$  en mm/mm.°C

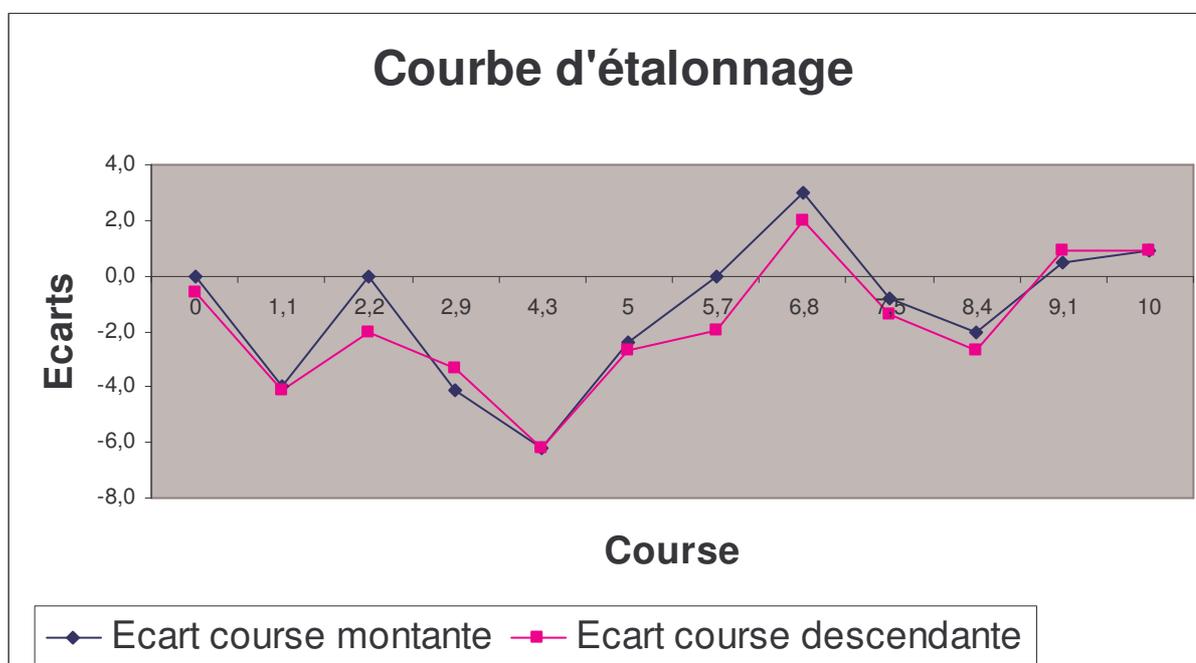
Un solide de 1 mm de long s'allonge de  $\alpha$  mm lors d'une élévation de température de 1°C

Pour l'acier :  $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$  mm/mm.°C

$$L_1 = L_0 ( 1 + \alpha ( t_1 - t_0 ) )$$

#### 1.2.6. Courbe d'étalonnage d'un instrument

L'étalonnage est l'opération qui consiste à effectuer des mesures de grandeurs connues  $G_i$  avec l'instrument de mesure donnant les valeurs  $M_i$ . On établit alors une courbe donnant les écarts entre les valeurs données par l'appareil et les valeurs des grandeurs connues.



#### 1.2.7. Conditions de référence

Les mesures dimensionnelles se font à une température de référence de 20°C. Elles sont pourtant faites généralement à des températures autres que 20°C et il est nécessaire d'en tenir compte comme vu précédemment.

A ce titre il est à noter que la température d'un laboratoire de métrologie habilité par le BNM doit être de 20°C  $\pm 0,5$  °C et son hygrométrie HR% de 55  $\pm 5$  %.

#### 1.2.8. La Règle des 10 et le rattachement à la chaîne métrologique nationale

La précision de la cote à mesurer et celle de l'appareil de métrologie utilisé doivent être liées par un rapport suffisamment grand pour que le résultat de la mesure soit significatif. Ce rapport était fixé à 10; il était qualifié de "règle des 10".

L'évolution de la précision est telle que cette règle s'est révélée inapplicable. Soit la cote 50 H7 d'IT de 25 microns mesurée sur MMT.

Le tableau ci-dessous image le cheminement des incertitudes pour rattacher la cote de 50 H7 à l'étalon de longueur national.

Incertitudes sur :	Règle des 10
Cote à vérifier	25 $\mu\text{m}$
Machine à mesurer ( MMT )	2,5 $\mu\text{m}$
Vérification de la MMT ( Laser )	0,25 $\mu\text{m}$
Rattachement officiel des appareils ( Laser ...)	0,025 $\mu\text{m}$

Ce tableau montre que la règle des 10 conduit rapidement à des précisions extrêmes ( 0,025 microns pour la mesure d'un 50 H7 ) .

Ceci montre que la précision de l'instrument devant vérifier la MMT doit être de 0,25 microns. Depuis Décembre 1998 la norme ISO 14253-1 définit les règles de décision pour prouver la conformité à une spécification où intervient notamment l'incertitude de mesure du moyen de contrôle utilisé.

## 2. Les Machines à mesurer tridimensionnelles

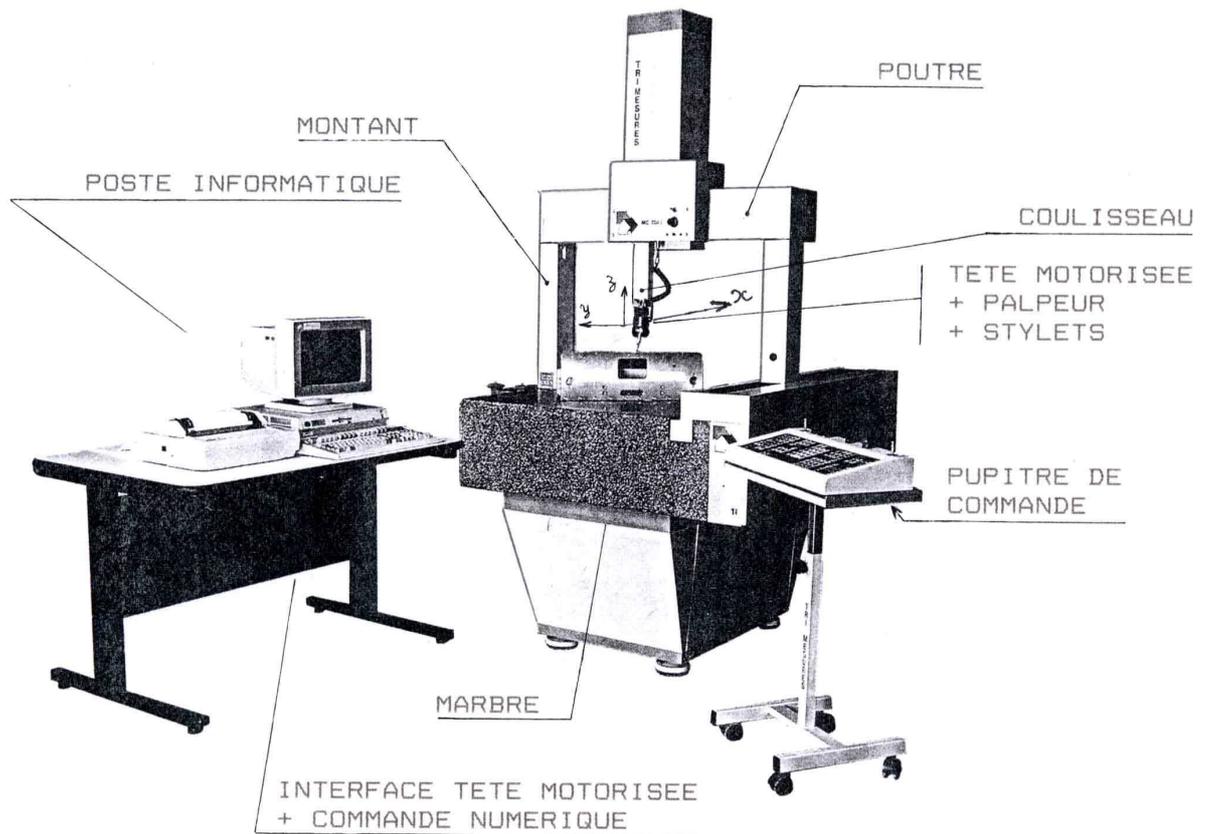
### 2.1. Généralités

Les moyens de mesure classiques sont aujourd'hui complétés par les techniques de mesure tridimensionnelles qui permettent d'accéder à la géométrie des pièces complexes avec une grande précision et une grande rapidité.

### 2.2. Constitution d'une MMT

Une MMT est constituée de 4 sous-ensembles distincts :

- La structure de déplacement
- Le système de palpation
- Le système électronique
- Le système informatique et le pupitre de commande



### 2.2.1. La structure de déplacement

Elle comprend 3 guidages en translation orthogonaux deux à deux notés X , Y et Z. Ces guidages, sans jeu ni frottements, permettent d'atteindre tous les points d'un volume parallépipédique.

### 2.2.2. Le système de palpation

Son rôle est de détecter le contact entre le stylet et la pièce et, à cet instant, d'envoyer une impulsion au système électronique pour qu'il lise les coordonnées du point de contact sur les systèmes de mesure.

### 2.2.3. Le système électronique

Il a plusieurs fonctions essentielles :

- Recevoir les impulsions de contact en provenance de la tête de palpation
- Envoyer les ordres de lecture sur les 3 systèmes de mesure au moment du contact
- Recevoir du système informatique les ordres de mouvement pour la commande des moteurs d'axes (Machines à CN)
- Gérer les sécurités telles que pression d'air mini sur les patins aérostatiques, fins de courses des mouvements etc.

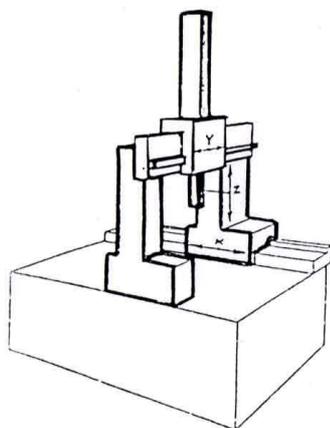
### 2.2.4. Le système informatique et le pupitre de commande

- Acquisition et mise en mémoire des gammes de contrôle des pièces
- Exécution des gammes de contrôle
- Traitement des informations et édition des résultats
- Logiciel conversationnel permettant l'utilisation de la machine

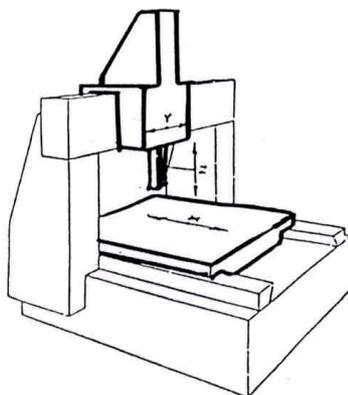
## 2.3. Les types de machines

### 2.3.1. Morphologie

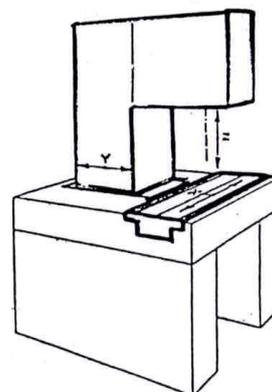
Il en existe de différents types qui sont fonction de la morphologie des pièces à mesurer, des précisions à atteindre, de la facilité d'utilisation etc .



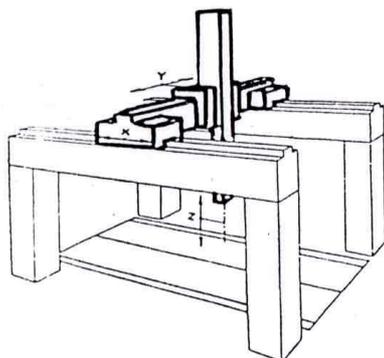
PORTIQUE



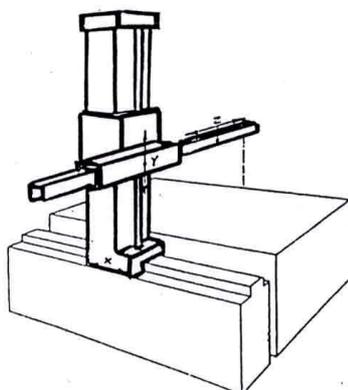
PORTIQUE FIXE



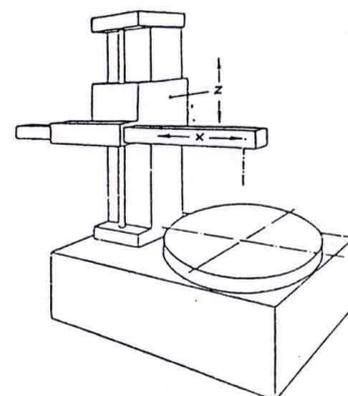
COL DE CYGNE



PONT



POTENCE



CYLINDRO-POLAIRE

## **2.3.2. Différents types de commandes**

### *2.3.2.1. Machines Manuelles*

C'est l'opérateur qui déplace le palpeur

- Pas de sauvegarde du programme
- La présence de l'opérateur est nécessaire pour chaque palpé
- Incertitudes de mesurage importantes
- Machines de petites dimensions

### *2.3.2.2. Machines Motorisées*

L'opérateur commande les déplacements par l'intermédiaire de manettes de pilotage, mais la vitesse de déplacement est asservie en mode palpé.

- Plus faible influence de l'opérateur
- Pas de limites en dimensions

### *2.3.2.3. Machines à Commande Numérique*

Les axes de déplacement sont asservis en vitesse et position.

La pièce est modélisée par des éléments géométriques calculés à partir des points palpés.

- L'écriture d'une gamme C.N. nécessite la définition d'un repère associé à la pièce
- L'exécution d'une gamme ne nécessite plus la présence d'un opérateur
- La précision de palpé ne dépend plus de l'opérateur
- Le choix de la position des points palpés sur la surface n'est fait qu'une seule fois lors de l'apprentissage ou à l'aide d'un logiciel de FAO.

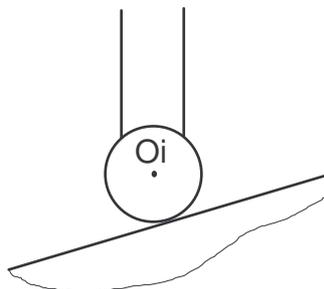
## 2.4. Mode de fonctionnement de la MMT TRI-MESURES

### 2.4.1. Introduction

Une MMT matérialise un repère orthonormé à 3 dimensions ( $O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$ )

Pour chaque point palpé, on recueille les coordonnées du centre du palpeur :

$$O_i \begin{cases} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{cases}$$



La pièce à mesurer est ensuite modélisée à l'aide des éléments géométriques définis par le préparateur ( points, droites, plans, cercles, cylindres, cônes et sphères ). A partir du nuage de points palpés, un traitement suivant la règle des moindres carrés permet de définir quantitativement les éléments géométriques .

Pour définir un élément géométrique sur la machine TRI-MESURES , le logiciel METROMECC demande de palper le nombre de points minimum+1, soit par exemple 4 points à palper pour définir un plan. Si l'on s'en tenait au nombre minimum de points (3) , le calcul d'optimisation suivant la méthode des moindres carrés, ainsi que le calcul du défaut de forme serait impossible.

### 2.4.2. Méthode de mesure

Le contrat à remplir par les ateliers de fabrication est l'obtention d'un produit conforme au dessin de définition. C'est donc à partir de celui-ci que l'on définira les cotes fonctionnelles devant être mesurées.

A partir de là, des travaux, d'une part d'aspect pratique, d'autre part d'aspect théorique peuvent être conduits parallèlement.

#### 2.4.2.1. Aspect pratique

a) Position de la pièce dans le repère machine :

Il sera nécessaire de définir une seule position possible pour la pièce , à quelques dixièmes de mm près, si l'on veut la mesurer en automatique en exécutant une gamme de mesure. Cette position sera définie dans le repère machine.

b) Définition du système de palpage :

Il est nécessaire de définir tous les systèmes de palpage ( Angles A et B de la tête motorisée, longueur des stylets et des rallonges ) qui sont nécessaires à la mesure d'une pièce et de les étalonner sur la sphère étalon.

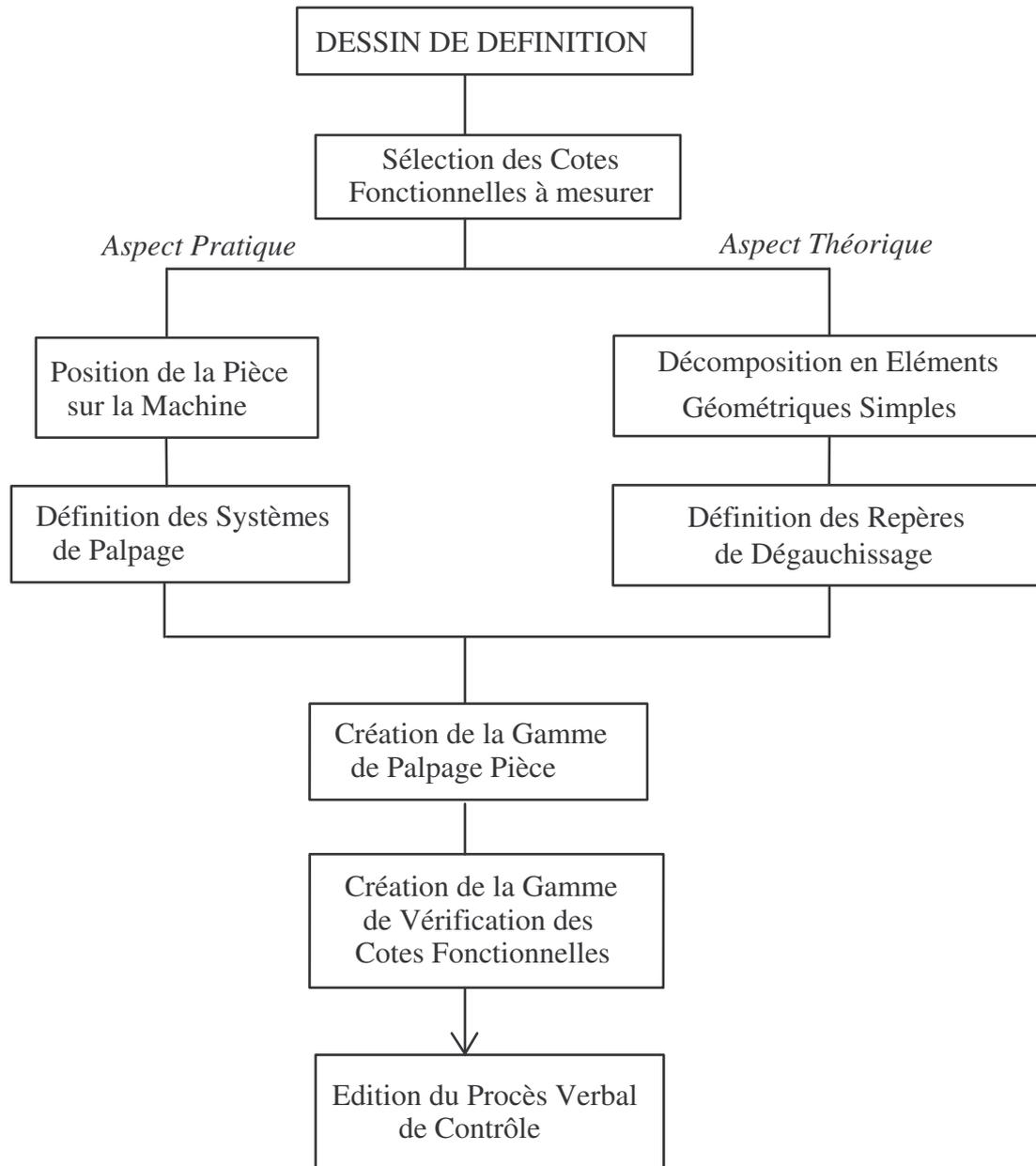
#### 2.4.2.2. Aspect théorique

Le préparateur devra définir à partir du plan les éléments géométriques qui seront définis lors des palpages .

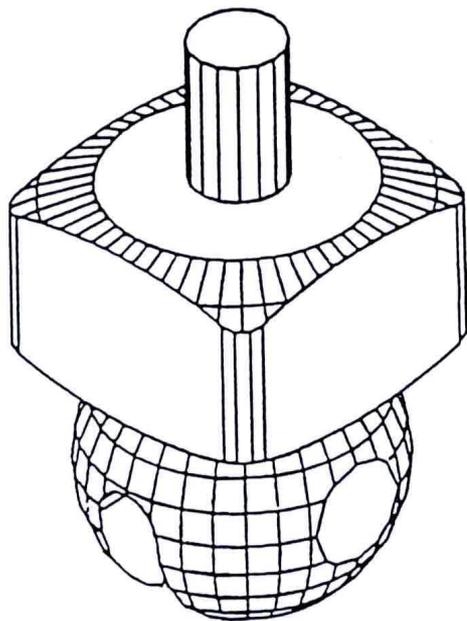
D'autre part , la définition des repères de dégauchissage est nécessaire pour une expression correcte des résultats de mesure.

Ensuite, seulement on pourra créer la gamme de palpage de la pièce, puis la gamme de vérification des cotes fonctionnelles qui conduira à l'édition du procès verbal de contrôle.

La méthode de mesure d'une pièce peut être schématisée par le synoptique ci-dessous.



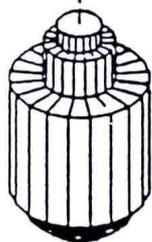
COMPOSITION d'UN SYSTEME d'ETALONNAGE



TETE MOTORISEE  
RENISHAW PH 9



GRANDE RALLONGE

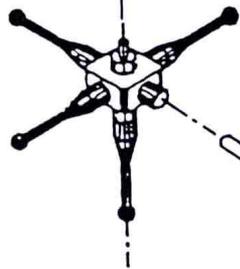


PALPEUR

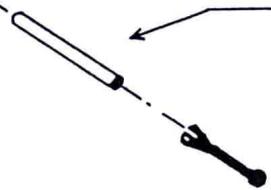


RALLONGE 1

STYLET



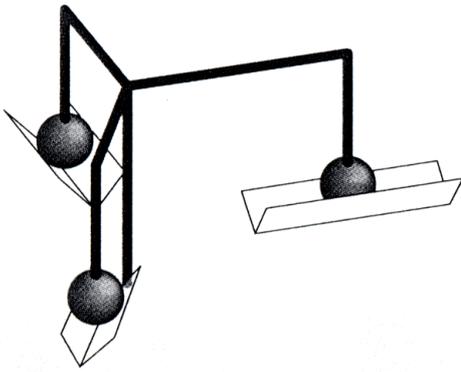
RALLONGE 2



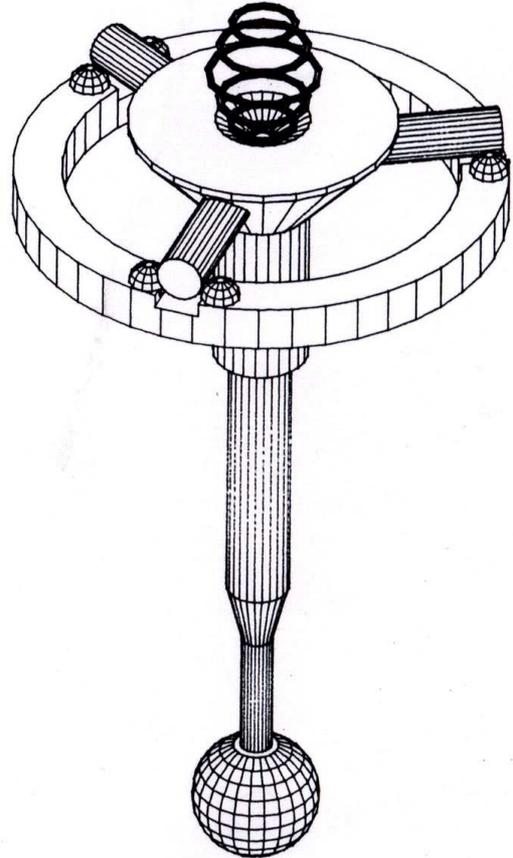
### 3. Le système de palpation

#### 3.1. Généralités

Le palpeur dont nous disposons est un palpeur dynamique à déclenchement. Il est construit sur le principe de la liaison isostatique de Boys.



Schématisme de la Liaison de Boys



Principe d'un palpeur dynamique à déclenchement

Le schéma page 11 montre la morphologie du système d'étalonnage qui comprend :

- la tête motorisée RENISHAW PH9 ; elle permet de déplacer tous les éléments qui lui sont rapportés suivant 2 axes perpendiculaires
  - Axe horizontal  $0 \leq A \leq +105^\circ$
  - Axe vertical  $-180 \leq B \leq +180^\circ$
- éventuellement une grande rallonge  $l=100$  mm maxi
- le palpeur à déclenchement RENISHAW TP2-5 sens de palpation permettant l'utilisation de stylets montés en étoile.
- éventuellement les rallonges puis les stylets.

***L'intérêt d'une tête motorisée réside dans le fait qu'elle permet l'accès à 5 faces d'un cube posé sur le marbre.***

### 3.2. Principe de fonctionnement

Les 6 points de contact sont montés en série électriquement et traversés en permanence par un courant faible. Lorsque la bille vient au contact de la pièce, le solide touche+tripode passe d'une situation isostatique à une situation hyperstatique. Un des 6 points tend à décoller et la résistance électrique du palpeur varie alors fortement. A partir de cette variation importante et brutale de la résistance, une électronique de traitement génère un signal de commutation qui permettra d'actionner la lecture des règles de mesure des axes X,Y et Z.

Pour assurer un bon contact sur les points d'appuis et pour éviter que le palpeur ne déclenche sous l'effet des accélérations nécessaires pour déplacer la MMT, un ressort tarable exerce un effort réglable au centre de l'étoile. Le ressort va provoquer un retard au déclenchement qui varie avec la géométrie des touches et le tarage.

Néanmoins la remise en position de l'étoile après un mouvement est meilleure que 0,1 micron.

### 3.3. Etalonnage des palpeurs

#### 3.3.1. Procédure d'étalonnage d'un palpeur simple

Si la mesure complète d'une pièce nécessite l'utilisation de plusieurs stylets pour accéder à toutes les surfaces, il faut être capable de corriger le rayon de la bille de chaque palpeur.

Pour être capable d'exprimer des relations géométriques entre les surfaces mesurées avec différents palpeurs, ces surfaces doivent être exprimées dans le même repère, celui de la sphère étalon.

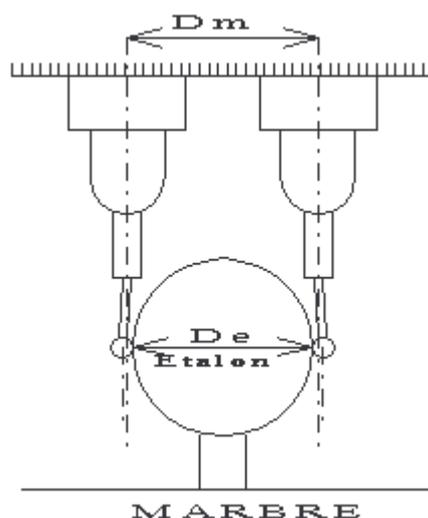
Pour diminuer l'influence de la flexion du stylet et du retard au déclenchement du palpeur, on détermine le diamètre fictif de la bille  $d_b$  du stylet en mesurant en 5 points une sphère étalon dont le diamètre  $D_e$  est connu par rattachement à la chaîne d'étalonnage.

A l'IUT  $D_e = 24,995\text{mm}$

Le diamètre mesuré en 5 points passant par les 5 centres bille vaut  $D_m$ .

A cause du retard au déclenchement, le système calcule un diamètre fictif de la bille  $\varnothing_{fb} = f(D_e, D_m, \Delta\alpha)$

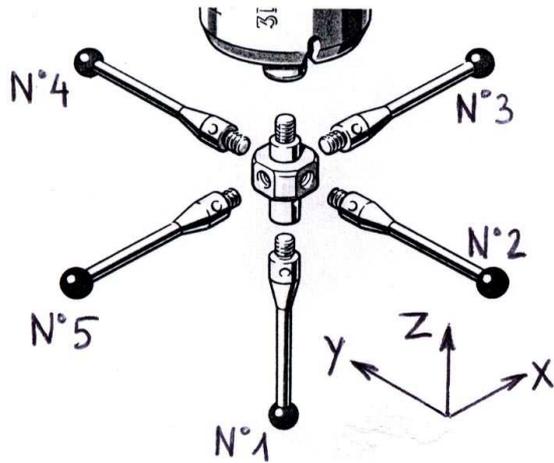
$\Delta\alpha$  étant l'angle du stylet par rapport à la verticale



Le diamètre calculé de la bille  $\varnothing_{fb}$  sera alors plus petit que son diamètre réel  $d$ .

Ex : Si  $d=2\text{mm}$  avec une rallonge de 10 mm on trouve  $\varnothing_{fb}$  voisin de 1,986mm

#### 3.3.2. Etalonnage d'un système en étoile



Si, pour pouvoir accéder à toutes les surfaces d'une pièce, on doit utiliser plusieurs billes, il faudra pratiquer une opération d'étalonnage qui consiste à mesurer préalablement la même sphère de référence avec toutes les billes. Cette opération permet de déterminer les coordonnées (  $X_b, Y_b, Z_b$  ) de chacune des billes dans le repère de la machine.

### 3.4. Codification d'un système de palpé

La configuration d'un système de palpé sera choisie à partir de la géométrie et des dimensions des pièces devant être mesurées.

Pour cela il peut être intéressant de définir le système de palpé schématisé ci-contre à l'aide d'un code .

Le tableau ci dessous donne la signification des codes à employer pour définir le système de palpé.

PIECE	CODE
Grande Rallonge	PEL L L = longueur en mm
Palpeur	TP2 le seul modèle disponible
Rallonge 1	SE L L = longueur en mm
Stylet Diamètre bille Nombre Système étoile	D valeur du Diamètre N nombre de billes SC2
Rallonge 2	SE L L = longueur en mm
Touche	Voir Référence RENISHAW Ex: PS 2 R Pour une bille D=2 L=20

Exemples de codification :

PEL 100 - TP2 - SE 20 - D 2 - N 5 - SC2 - SE 10 - PS2R

Pour une grande rallonge et un système en étoile avec des billes de diamètre 2.

TP2 - SE 20 - D 4 - N1 - PS17R

Pour un stylet simple de diamètre 4 , longueur 20 avec une rallonge de 20