

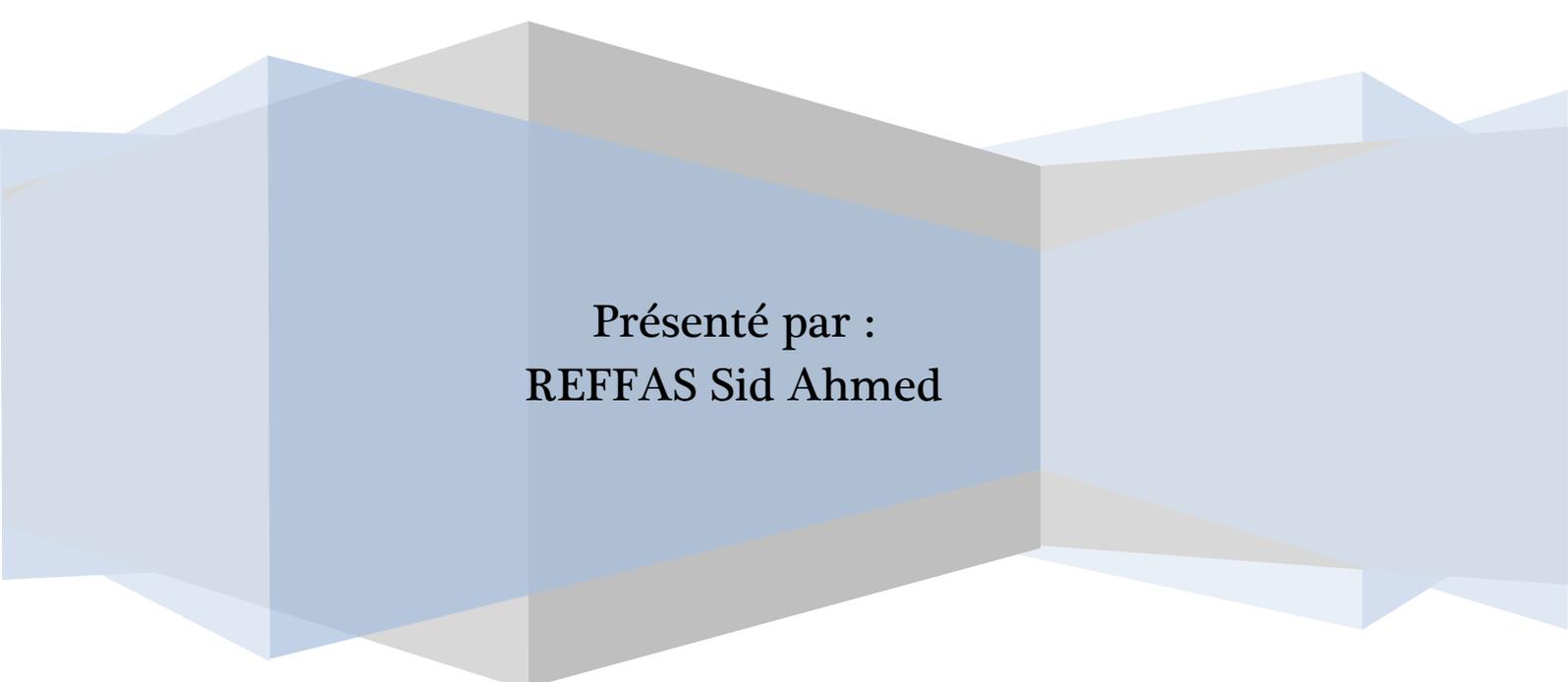
République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'enseignement Supérieur et de La Recherche  
Scientifique  
Université des Sciences et de La Technologie MOHAMED BOUDIAF  
D'ORAN

Faculté De Génie Mécanique  
Département de Génie Mécanique

# **POLYCOPIE**

## **Mesure et Instrumentation**

**Cours et exercices**



Présenté par :  
**REFFAS Sid Ahmed**

**Année universitaire 2017**



## Sommaire

	Inroduction	1
	<b>Chapitre I - Mesure des épaisseurs et des longueurs</b>	
I.1	Metrologie	3
I.1.1	Mesurage	3
I.1.2	Mesurande	3
I.1.3	Grandeur mesrable	3
I.1.4	Mesure (X)	3
I.1.5	Système de mesure	4
I.1.6	Valeur mesurée	4
I.1.7	Valeur vraie du mesurande	4
I.1.8	Le système d'unités internationales et ses symboles	5
I.2	Les Instruments Mécaniques	6
I.2.1	Règle	6
I.2.2	Le Pied à Coulisse	6
I.2.2.1	Méthode de mesure avec pied à coulisse	7
I.2.2.2	Mesure des petits alésages avec un pied à coulisse de type standard	10
I.2.3	Le micromètre extérieur	14
I.2.3.1	Méthode de mesure avec un micromètre	14
I.2.4	Le trusquin	19
I.2.5	La jauge de profondeur	24
I.2.6	Jauge micrometre de profondeur	25
I.2.7	Rapporteur d'angle	25
I.2.8	Le comparateur	25
I.2.8.1	Définition du point zéro du comparateur	26
I.2.8.2	Comparateurs à palpeur orientable et effet cosinus	27
I.3	Les instruments optiques_	29
I.3.1	Introduction	29
I.3.2	<b>BASES THEORIQUES</b>	29
I.3.2.1	Optique géométrique	29
1.3.3	Propriétés des instruments d'optique	30
	Grandissement	30
	Puissance	31
	Grossissement G	31
1.3.4	La loupe	32
1.3.5	Le microscope	33
1.4	Erreurs et incertitudes	35
1.4.1	<u>Introduction</u>	35
1.4.2	Les fautes	36
1.4.3	Les erreurs	36

1.4.4	Incertitude	37
1.4.4.1	Règles de présentation	38
1.4.4.2	Méthode algébrique	40
1.4.4.3	Incertitude de type A (incertitude de répétabilité)	40
1.4.4.4	Incertitude de type B	42
1.4.4.5	Incertitude-type élargie dans le cas de plusieurs sources d'erreurs	44

## **CHAPITRE II - MESURE DE TEMPERATURE**

II.1	Les différentes unités de température	45
II.2	Les échelles de température	45
II.3	Thermocouple	46
II.3.1	Principe de fonctionnement	46
II.3.2	Constitution d'un thermocouple industriel	47
II.3.3	Differentes types de thermocouple	47
II.3.4	Principe de mesure	48
II.3.5	Phénomènes thermoélectriques	48
II.4	Thermistance	49
II.5	Détecteur infrarouges	50
II.6	Pyromètre optique	52
II.6.1	Principes physiques	53
II.6.2	Lois du rayonnement thermique du corps noir	53
II.6.3	Lois du rayonnement thermique du corps réel	54

## **CHAPITRE III - MESURE DES DEBITS DES VITESSES ET DES PRESSIONS**

III.1	Mesure de débit	55
III.1.1	Le débit	55
III.1.2	Régime laminaire et régime turbulent	55
III.1.3	La vitesse	56
III.2	Débitmètres volumiques	56
III.2.1	Débitmètre à tube de Pitot	57
III.2.2	Débitmètres à organe déprimogène	57
III.2.2.1	Caractéristiques métrologiques	58
III.2.2.2	Montage du transmetteur de pression différentielle	59
III.2.3	Débitmètre à ludion	60
III.2.3.1	Caractéristiques métrologiques	61
III.2.4	Débitmètre à coupelle à hélice ou à turbine	61
III.2.4.1	Montage de mesure	61
III.2.4.2	Domaine d'utilisation	62
III.2.5	Débitmètre à palette	62

<b>III.2.6</b>	Débitmètres ultrasoniques	<b>62</b>
<b>III.2.6.1</b>	Caractéristiques métrologiques	<b>63</b>

## **Introduction:**

La métrologie à quoi ça sert ?

*La Métrologie* au sens étymologique du terme se traduit par « science de la mesure ».

La métrologie s'intéresse traditionnellement à la détermination de caractéristiques (appelées grandeurs) qui peuvent être fondamentales comme par exemple une longueur, une masse, un temps, ou dérivées des grandeurs fondamentales comme par exemple une surface, une vitesse <sup>[1]</sup>.

Cependant, dans les domaines courants des essais, il existe de nombreuses caractéristiques n'ayant qu'une relation indirecte avec ces grandeurs. C'est le cas, par exemple, de la dureté, de la viscosité, qui peuvent poser des problèmes dans l'interprétation.

Mesurer une grandeur physique consiste à lui attribuer une valeur quantitative en prenant pour référence une grandeur de même nature appelée unité.

Dans le langage courant des «métrologues», on entend souvent dire mesurer c'est comparer.

Les résultats des mesures servent à prendre des décisions dans de nombreux domaines, tels que:

- Acceptation d'un produit (mesure de caractéristiques, de performances, conformité à une exigence) ;
- Réglage d'un instrument de mesure, validation d'un procédé ;
- Réglage d'un paramètre dans le cadre d'un contrôle d'un procédé de fabrication ;
- Validation d'une hypothèse scientifique, protection de l'environnement ;
- Définition des conditions de sécurité d'un produit ou d'un système.

L'ensemble de ces décisions concourt à la qualité des produits ou des services: on peut qualifier quantitativement la qualité d'un résultat de mesure grâce à son incertitude.

En effet sans incertitude les résultats de mesure ne peuvent plus être comparés: Soit entre eux (essais croisés) ;

- Soit par rapport à des valeurs de référence spécifiés dans une norme ou une spécification (conformité d'un produit).

## CHAPITRE I :

### MESURE DES EPAISEURS ET DES LONGUEURS.

**I.1. Metrologie:** C'est la science des mesures et ses applications. Elle comprend tous les aspects théoriques et pratiques des mesurages, quels que soient l'incertitude de mesure et le domaine d'application.

**I.1.1. Mesurage :** Est un processus consistant à obtenir expérimentalement une ou plusieurs valeurs que l'on peut raisonnablement attribuer à une grandeur.

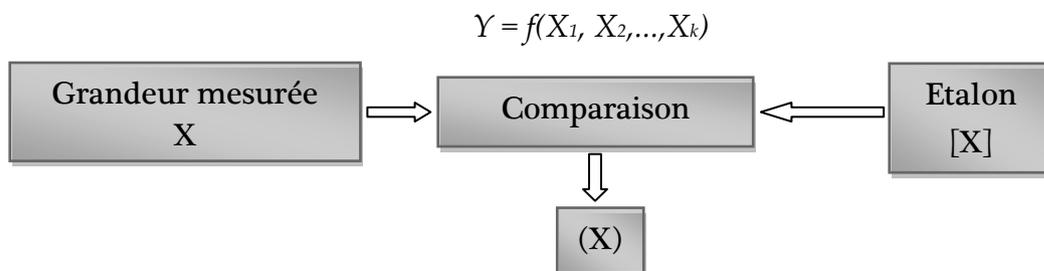
**I.1.2. Mesurande :** Le mesurande est la grandeur que l'on veut mesurer.

**I.1.3. Grandeur mesurable:** C'est une caractéristique d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, qui est susceptible d'être distingué qualitativement par un nom (en métrologie dimensionnelle : Distance, Angle...) et déterminé qualitativement par une valeur (nombre exprimé dans l'unité choisie) [2].

**I.1.4. Mesure (X) :** La mesure est l'ensemble des opérations ayant pour objet de déterminer la valeur {X} dans des conditions expérimentales spécifiées (appelée aussi mesurande), en la comparant directement ou indirectement à un étalon qui est la représentation matérielle de l'unité [X] dans laquelle sera exprimée la valeur de X.

Le procédé de mesure est direct lorsque le résultat de la mesure est obtenu par comparaison à un étalon de même nature que la grandeur mesurée (Fig. 1) [1].

Le procédé de mesure est indirect quand une grandeur Y est liée à des grandeurs  $X_1, X_2, \dots, X_k$  par une relation du type :



**Fig I.1 – Procédé de mesure [1].**

Par exemple, la valeur de l'aire  $S$  d'une surface rectangulaire se calcule à partir de la mesure de la longueur  $L$  et de la largeur  $l$  et en appliquant la relation  $S = L.l$ . Par conséquent, la valeur  $\{Y\}$  de  $Y$  est obtenue, à partir des valeurs de  $\{X_1\}$ ,  $\{X_2\}$ , ...,  $\{X_k\}$  de  $X_1, X_2, \dots, X_k$  selon le procédé de mesure (Fig. 2).

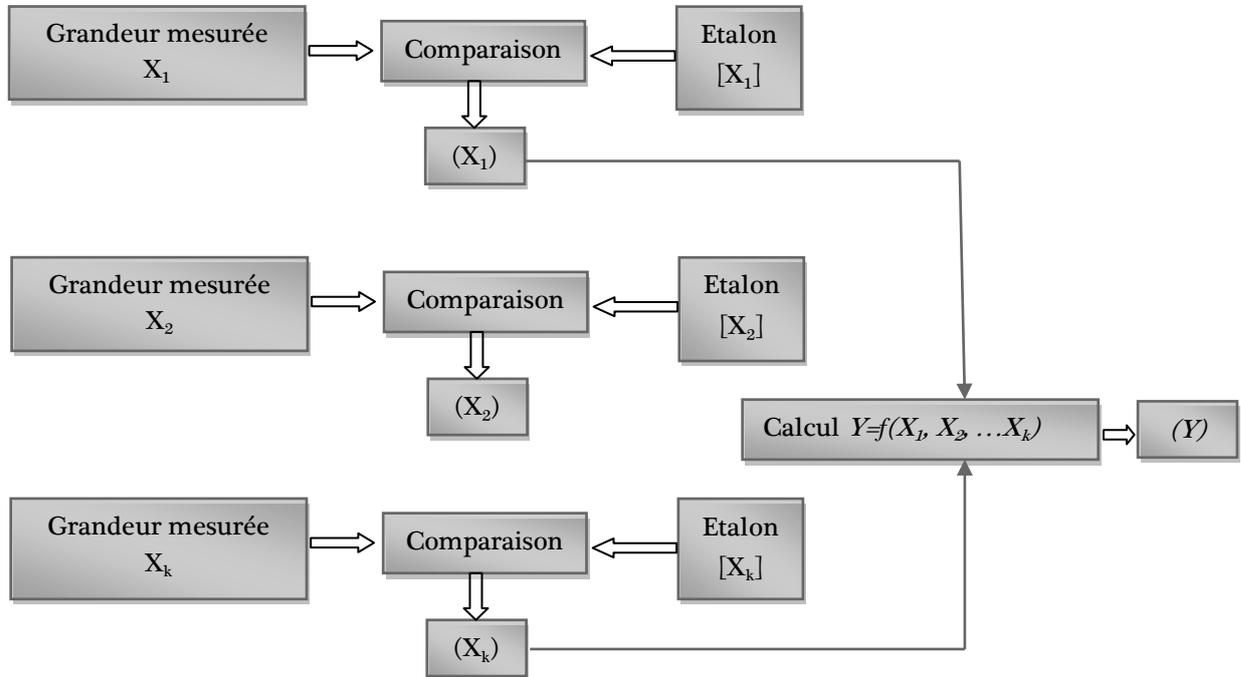


Fig I.2 – Procédé de mesure directe [1].

**I.1.5 Système de mesure :** Un système de mesure contient tout ce qui est nécessaire pour obtenir des valeurs mesurées d'un mesurande.

Un instrument de mesure qui peut être utilisé seul est un système de mesure.

**I.1.6 Valeur mesurée :**

- Valeur d'une grandeur représentant un résultat de mesure ;
- Pour un mesurage impliquant des indications répétées, chacune peut être utilisée pour fournir une valeur mesurée correspondante. Cet ensemble de valeurs mesurées individuelles peut ensuite être utilisé pour calculer une valeur mesurée résultante, telle qu'une moyenne ou une médiane, en général avec une incertitude de mesure associée.

**I.1.7 Valeur vraie du mesurande :** La valeur vraie ( $M_{vrai}$ ) du mesurande est la valeur que l'on obtiendrait si le mesurage était parfait.

I.1.8 Le système d'unités internationales et ses symboles :

<i>Grandeur</i>		<i>Unité</i>	
<i>Nom</i>	<i>Symbole</i>	<i>Nom</i>	<i>Symbole</i>
<i>Longueur</i>	<i>L</i>	<i>Mètre</i>	<i>m</i>
<i>Masse</i>	<i>M</i>	<i>Kilogramme</i>	<i>Kg</i>
<i>Temps</i>	<i>t</i>	<i>Seconde</i>	<i>s</i>
<i>Courant électrique</i>	<i>i</i>	<i>Ampère</i>	<i>A</i>
<i>Température</i>	<i>T</i>	<i>Kelvin</i>	<i>K</i>
<i>Quantité de matière</i>		<i>Mole</i>	<i>mol</i>
<i>Intensité lumineuse</i>	<i>I</i>	<i>Candela</i>	<i>cd</i>

**Tableau 1** – Unités de base.

## I.2 Les Instruments Mécaniques :

En mécanique, il est important de savoir prendre les mesures. La qualité de celles-ci dépend de la précision de l'instrument de mesure utilisé. Dans les cas de mesures exceptionnellement précises, il faut avoir tous les instruments nécessaires.

### I.2.1 Règle :

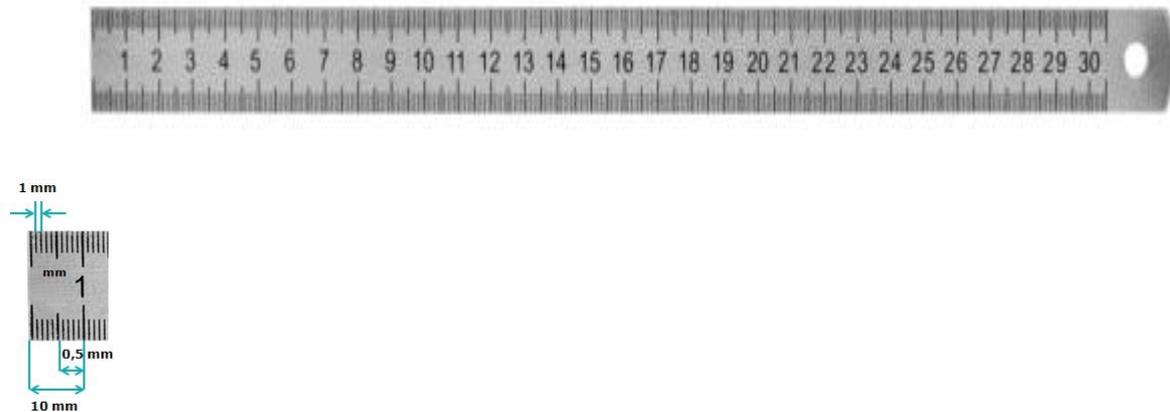


Fig I.3 – Règle.

Une règle est un instrument de géométrie, utilisé aussi pour le dessin industriel et la mesure de distances. À proprement parler, une règle sert à tracer des lignes droites.

Une règle est généralement en bois, en métal, en plexiglas ou en matériel composite souple. Les règles modernes comprennent généralement une échelle, avec laquelle des longueurs peuvent être mesurées par comparaison, généralement au millimètre près.

### I.2.2 Le Pied à Coulisse :

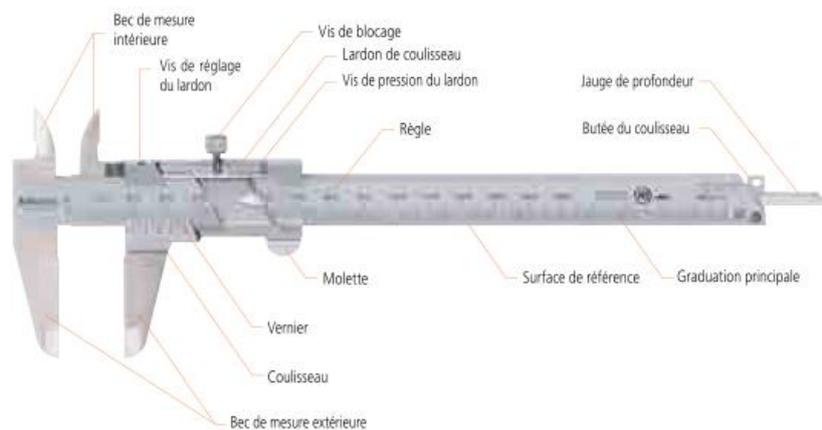


Fig I.4 – Pied à coulisse.

***Un pied à coulisse*** (vernier caliper) est un outil de mesure utilisé pour les prises de mesure internes, externes et de profondeur. Les pieds à coulisse sont disponibles en échelons métrique et impérial que l'on appelle «vernier». Un vernier comporte deux règles graduées, l'une fixe et l'autre mobile, se déplaçant sur la première pour la prise de mesure. Le relevé de la longueur est indiqué sur le vernier.

Le pied à coulisse possède une règle mobile qui est parallèle à une règle fixe (figure I.4). Ces instruments de mesure de précision servent à mesurer les diamètres extérieurs et intérieurs, et dans bien des cas, peuvent mesurer la profondeur. Les pieds à coulisse sont disponibles en mesures impériales et métriques.

L'échelle principale du pied à coulisse est divisée en pouces et en centimètres; la plupart vont jusqu'à 15 cm ou 6 po. L'échelle principale métrique du pied à coulisse est divisée en centimètres où chaque centimètre est lui-même divisé en 10 mm. L'échelle principale en mesures impériales du pied à coulisse est divisée en pouces où chaque pouce est divisé en 10 parties, chacune étant égale à 0,10 po. La section entre les marques de 0,100 est divisée en quatre. Chacun de ces divisions est égale à 0,025 po.

L'échelle du vernier à mesure métrique comporte 50 divisions, chacune représentant 0,02 mm. L'échelle principale du vernier à mesure impériale comporte 25 divisions, chacune représentant 0,001 po. Les lectures des mesures sont prises en associant l'échelle du vernier à l'échelle principale. Lors de la prise de

Un pied à coulisse est caractérisé par :

- *Son type de vernier ;*
- *Sa capacité maxi ;*
- *Ses types des becs.*

#### **I.2.2.1 Méthode de mesure avec pied à coulisse :**

Insérer l'objet à mesure entre les mâchoires [becs] du pied à coulisse et fermer ces mâchoires sur l'objet. On fige la mesure par la vis de blocage.

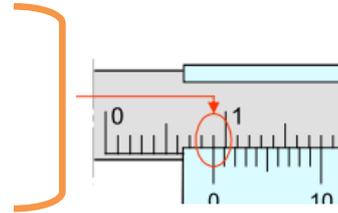
Lire le nombre entier de *mm*, à gauche du zéro du vernier. On localise la graduation du vernier (un seul possible) qui coïncide avec une graduation quelconque de règle. Et on ajoute aux millimètres, les  $1/10^{\text{eme}}$ ,  $1/20^{\text{eme}}$  ou  $1/50^{\text{eme}}$ , selon les cas, pour obtenir la mesure exacte.

**Exemples de mesures :**

• VERNIER AU 1/10

- LE ZERO DU VERNIER EST EN FACE D'UNE GRADUATION DE LA REGLE

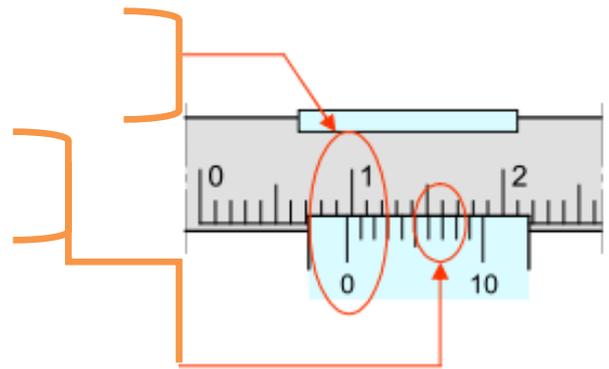
- Lire sur la règle le nombre de mm correspondant cette graduation.  
Sur l'exemple : 9 mm.



- LE ZERO DU VERNIER N'EST PAS EN FACE D'UNE GRADUATION DE LA REGLE

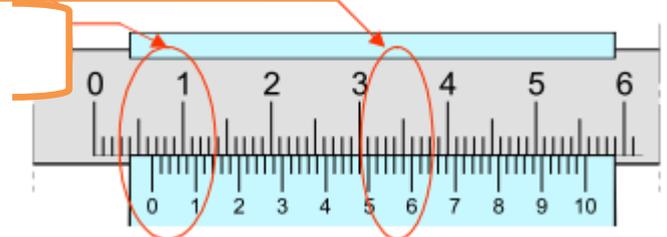
- Lire sur la règle le nombre entier de mm avant le zéro du vernier.
- Repérer la graduation du vernier qui est le mieux aligne , une graduation quelconque de la règle.
- La graduation du vernier indique les dixièmes de mm.

Sur l'exemple :  $9 + 0,7 = 9,7$  mm.



• VERNIER AU 1/50

- Lire sur la règle le nombre entier de mm avant le zéro du vernier.
- Repérer la graduation du vernier qui est le mieux aligne une graduation quelconque de la règle.



Lire sur le vernier, le chiffre situé avant les graduations alignées. Ce chiffre indique le nombre de 1/10 de millimètres.

Compter le nombre de divisions après le chiffre et le multiplier par 2. L'on obtient les 1/100 de mm correspondant , la cote mesure.

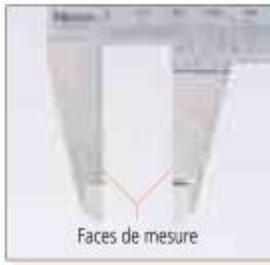
Sur l'exemple : Nombre de graduation avant le 0 du vernier ► 6 = 6mm ► pour la lecture du mm.

- Chiffre sur le vernier avant la graduation aligne 5 = 0,5 mm ► pour la lecture du 1/10 mm

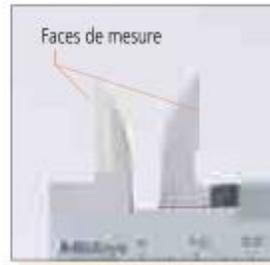
- 4<sup>eme</sup> graduation alignée •s le chiffre 5 multiplier par 2 ►  $4 \times 2 = 0,08$  ► pour la lecture du 1/50 mm

$$6 + 05 + 0.08 = 6.58 \text{ mm.}$$

Mesure extérieure



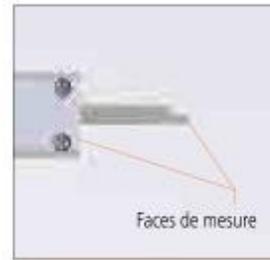
Mesure intérieure



Mesures d'épaulement

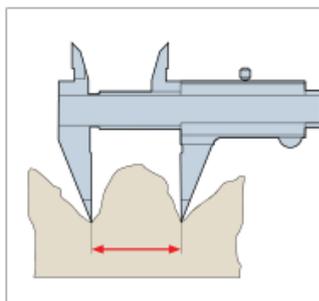


Mesures de profondeur



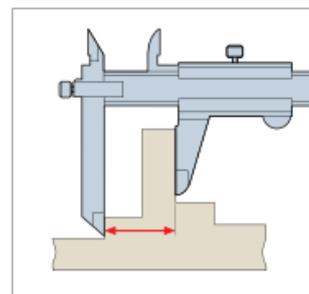
**Pieds à coulisse spéciaux [3] :**

Pied à coulisse à becs pointus



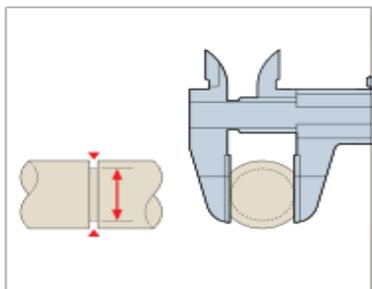
> Pour la mesure des surfaces irrégulières.

Pied à coulisse à becs décalés



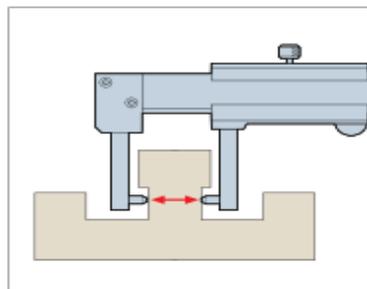
> Pour la mesure des pièces à épaulements.

Pied à coulisse à becs fins



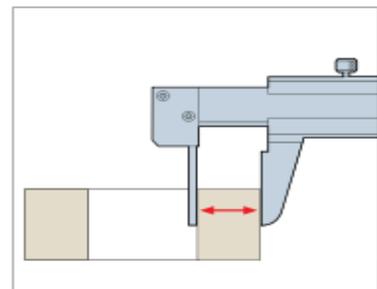
> Pour la mesure du diamètre des gorges étroites

Pied à coulisse à pointes de mesure intérieures.



> Pour la mesure du diamètre extérieur comme l'épaisseur d'un axe à épaulement.

Pied à coulisse pour la mesure de l'épaisseur des tubes



> Pour la mesure de l'épaisseur des tubes.

### I.2.2.2 Mesure des petits alésages avec un pied à coulisse de type standard :

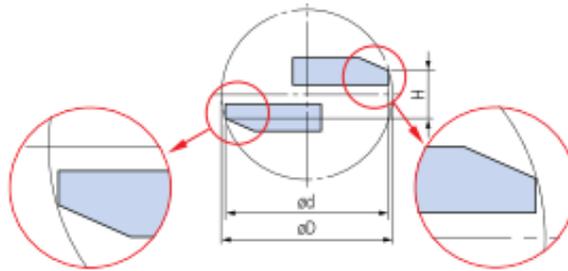
Une erreur structurelle «d» se produit lorsque vous mesurez le diamètre intérieur d'un petit alésage <sup>[3]</sup>.

$\varphi D$  : diamètre intérieur réel ;

$\varphi d$  : diamètre intérieur indiqué ;

$\Delta d$  : erreur de mesure ( $\varphi D - \varphi d$ ).

Diamètre intérieur réel $\varphi D = 5 \text{ mm}$			
H	0.3	0.5	0.7
$\Delta d$	0.009	0.026	0.047

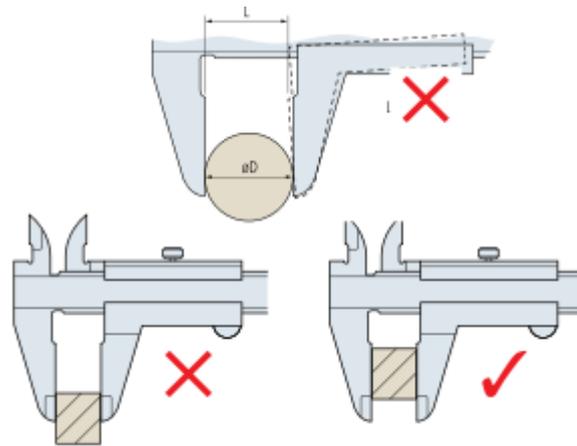


#### Remarques générales concernant l'utilisation d'un pied à coulisse <sup>[3]</sup> :

##### 1. Causes d'erreurs potentielles :

Différents facteurs peuvent être sources d'erreurs pendant une mesure avec un pied à coulisse. Les principaux facteurs sont les erreurs de parallaxes, une force de mesure excessive due au fait que le pied à coulisse n'est pas utilisé en tenant compte du principe d'Abbe, une dilatation thermique due à une différence de température entre le pied à coulisse et la pièce, et les effets de l'épaisseur des becs à lame ou du jeu entre les becs pendant la mesure du diamètre d'un petit alésage. Bien qu'il existe d'autres facteurs d'erreurs comme la précision de la graduation, la rectitude du bord de référence, la planéité de la règle principale et la perpendicularité des becs, ces facteurs sont pris en compte dans les valeurs de tolérances de l'instrument. Ils ne posent par conséquent aucun problème tant que le pied à coulisse est conforme aux tolérances d'erreur instrumentale.

Des remarques concernant l'utilisation du pied à coulisse ont été ajoutées à la norme JIS pour que les utilisateurs puissent évaluer les facteurs d'erreur liés à la structure du pied à coulisse avant son utilisation. Ces remarques ont trait à la force de mesure et précisent que « si le pied à coulisse n'est pas équipé d'un dispositif de stabilisation de la force de mesure, la pièce doit être mesurée en appliquant une force de mesure uniforme. Agissez avec la plus grande attention lorsque vous mesurez la pièce avec la base ou la pointe du bec car des erreurs de mesure importantes sont possibles dans de telles circonstances. ».



## 2. Mesure intérieure :

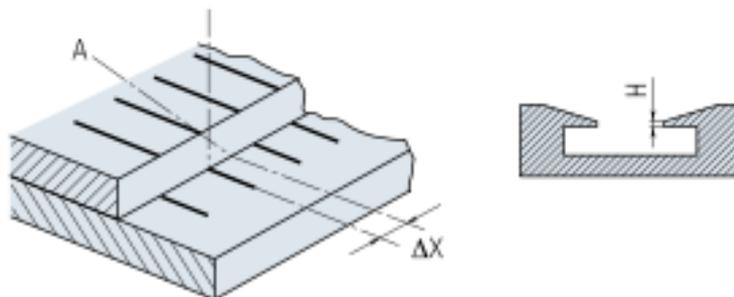
- Insérez le bec intérieur aussi loin que possible avant de mesurer ;
- Lisez la valeur maximale indiquée en cas de mesure intérieure ;
- Lisez la valeur minimale indiquée en cas de mesure de la largeur d'une gorge.

## 3. Mesure de profondeur :

Lisez la valeur minimale indiquée en cas de mesure de profondeur.

## 4. Erreur de parallaxe lors de la lecture des règles :

Observez les graduations du vernier selon une perspective directe pour vérifier si une graduation du vernier coïncide avec une graduation de la règle principale. Si vous observez les graduations du vernier selon une perspective oblique (A), la position d'alignement est décalée de 'X', comme le montre la figure ci-dessous, suite à un effet de parallaxe dû à la hauteur (H) de l'épaulement entre le plan du vernier et celui de la règle principale, entraînant une erreur de lecture de la valeur mesurée. Pour éviter cela, la JIS précise que la hauteur de l'épaulement ne doit pas dépasser 0,3 mm.

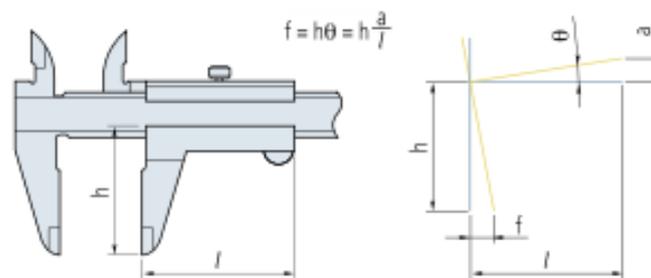


### 5. Relation entre mesure et température :

La règle principale du pied à coulisse est gravée (ou montée) sur de l'acier inoxydable dont le coefficient de dilatation thermique est égal à celui du matériau usiné le plus courant, l'acier, soit  $(10,2 \pm 1) \times 10^{-6} / K$ . Il convient de rappeler que l'utilisation d'un matériau différent, la température ambiante et la température de la pièce peuvent altérer la précision de la mesure.

### 6. Erreur de parallélisme du bec mobile :

Si le bec mobile n'est plus parallèle au bec fixe, suite à une force excessive appliquée au coulisseau ou à un défaut de rectitude du bord de référence de la règle, une erreur de mesure se produira, comme l'illustre la figure ci-dessous. Cette erreur peut être due en substance au fait que le pied à coulisse n'est pas conforme au principe d'Abbe.



### Exemple :

Supposons que l'erreur des becs due à un défaut de parallélisme du coulisseau soit de 0,01 mm à 50 mm et que les becs de mesure extérieure mesurent 40 mm de profondeur, l'erreur à la pointe des becs sera égale à  $(40/50) \times 0,01 \text{ mm} = 0,008 \text{ mm}$ . Si la surface de guidage est usée, l'erreur peut se produire même avec une force de mesure correcte.

### 7. Manipulation :

Les becs du pied à coulisse sont aiguisés et l'instrument doit être manipulé avec précaution pour éviter de se blesser ;

- Évitez d'endommager la règle d'un pied à coulisse numérique et ne marquez aucun numéro d'identification ou autres informations avec un stylo graveur électrique ;
- Évitez d'endommager le pied à coulisse en l'exposant à des chocs contre des objets durs ou en le faisant tomber sur l'établi ou par terre.

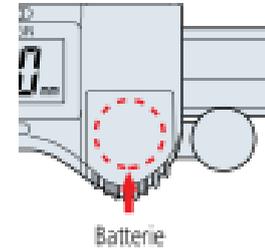
### 8. Entretien des surfaces de coulissement de la règle et des surfaces de mesure :

Essuyez les surfaces de coulissement et les surfaces de mesure avec un chiffon doux et sec pour éliminer la poussière avant d'utiliser le pied à coulisse.

### 9. Vérification et réglage du point d'origine avant l'utilisation :

Nettoyez les surfaces de mesure en enserrant un morceau de papier propre entre les becs de mesure extérieure et le retirant lentement.

Fermez les becs et vérifiez que le vernier (ou l'afficheur) indique zéro avant d'utiliser le pied à coulisse. En cas d'utilisation d'un pied à coulisse Digimatic, réinitialisez le point d'origine (bouton ORIGIN) après avoir



### 10. Opérations à effectuer après l'utilisation :

- Après avoir utilisé le pied à coulisse, essuyez-le pour éliminer toute trace d'eau et d'huile. Appliquez une fine couche d'huile anticorrosion et laissez-le sécher avant de le ranger ;
- Essuyez également les pieds à coulisse étanches car ils peuvent également s'oxyder.

### 11. Remarques concernant le stockage :

- Conservez le pied à coulisse à l'abri des rayons directs du soleil, des températures excessives et de l'humidité ;
- Si un pied à coulisse numérique ne doit pas être utilisé pendant plus de trois mois, retirez la pile avant de le ranger ;
- Ne laissez pas les becs du pied à coulisse complètement fermés pendant le stockage.

### I.2.3 Le Micromètre Extérieur :



Fig I.5 – Micromètre d'extérieur analogique standard.

Le micromètre permet de mesurer les dimensions linéaires intérieures et extérieures. L'étalonnage et la lecture des micromètres intérieurs et extérieurs s'effectuent de la même façon. La prise de mesure s'effectue sur chacun par des points de mesure en contact avec les surfaces à mesurer.

Les principaux composants et indicateurs d'un micromètre sont le corps, la touche fixe, la touche mobile, la bague de blocage, la vis micrométrique, les chiffres sur la vis micrométrique, la ligne horizontale sur la vis micrométrique, le tambour, les marques sur le tambour et le bouton à friction (figure 4). Les micromètres sont étalonnés en graduations métriques ou impériales et sont disponibles en différents formats.

La plupart des micromètres sont conçus pour mesurer des objets à une précision de 0,01 mm ou 0,001 po, voire même 0,0001 po.

#### I.2.3.1 Méthode de mesure avec un micromètre :

Insérer l'objet à mesurer dans les mâchoires du micromètre, pincer la pièce avec les touches à l'aide de la friction et on fait le serrage de la pièce à l'aide de molette limiteur d'effort.

Lire le nombre entier de mm et de  $1/2$  mm sur la génératrice de repérage (fermière graduation découverte par le tambour). Puis on lit la fraction de millimètre (X) sur le tambour gradué en 0.01.

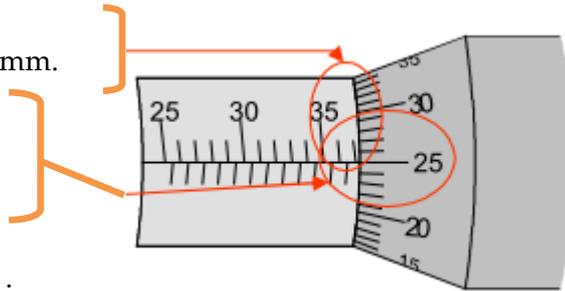
**Remarque :** la lecture au micromètre présent une particularité demandant une certaine attention pour ne pas commettre d'erreur.

**N.B :** pour un micromètre on doit vérifier étalonnage à l'aide de jauge prévu à cet effet, avant chaque utilisation.

**Exemples de mesures :**

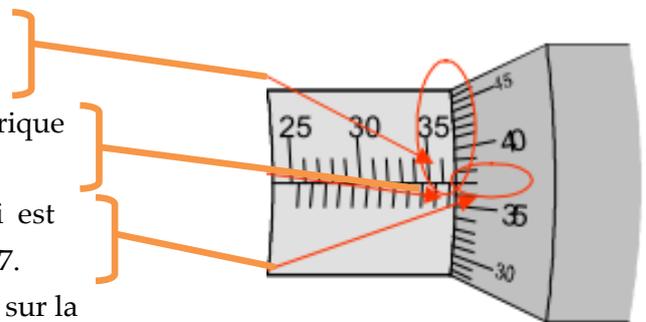
**Exemple 1 :**

- Lire sur la génératrice graduée le nombre entier de millimètre : 37 mm.
- Repérer la graduation de la douille qui est aligne la génératrice gradue en mm : 25.
- Ajouter au nombre entier de millimètre la valeur lue sur la douille :  
 $37 + 0,25 = 37,25 \text{ mm.}$



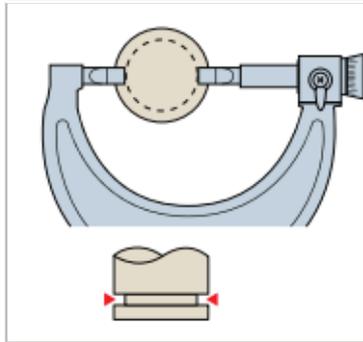
**Exemple 2 :**

- Lire sur la génératrice graduée le nombre entier de millimètre : 36 mm.
- Ajouter ... mm si la graduation ... millimétrique est visible :  $36 + 0,5 = 36,5 \text{ mm.}$
- Repérer la graduation de la douille qui est aligne , la génératrice gradue en mm : 37.
- Ajouter au nombre antérieur la valeur lue sur la douille :  $36,5 + 0,37 = 36,87 \text{ mm.}$



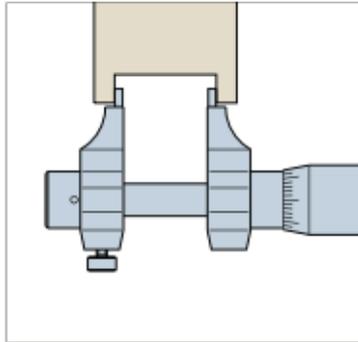
**Utilisations particulières des micromètres [3] :**

Micromètre à touches coteaux



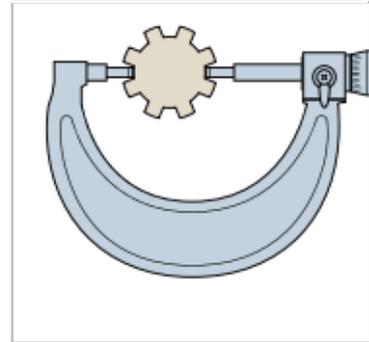
> Pour la mesure du diamètre Sphériques dans gorges étroites

Micromètre d'intérieur, type pied a coulisse



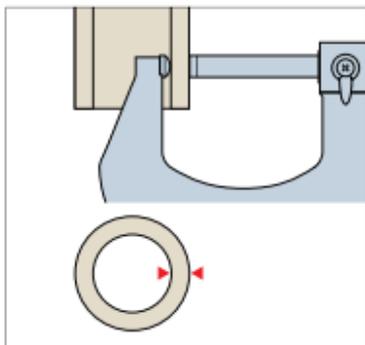
> Pour la mesure du diamètre interieur et de la largeur des gorges

Micromètre à touches fixes pour cannelures



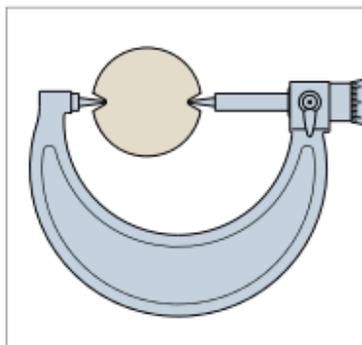
> Pour la mesure du diamètre des arbres cannelés

Micromètre à touches Pour surfaces incurvées



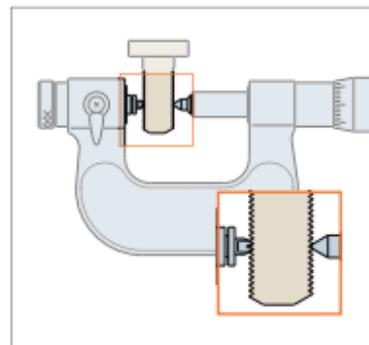
> Pour la mesure de l'épaisseur des Parois des tubes

Micromètre à touches pointues sphériques



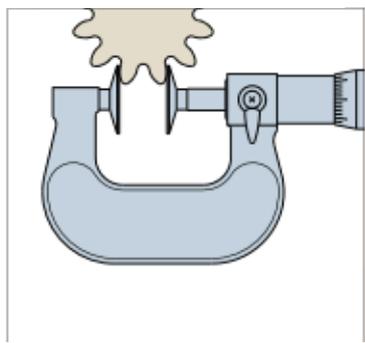
> Pour la mesure du diamètre à Fond de filet

Micromètre pour la mesure de filetage



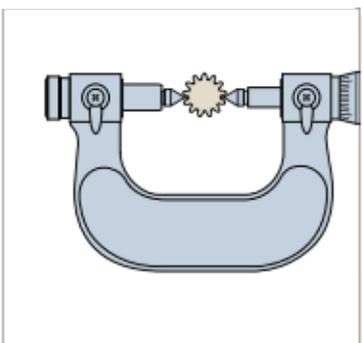
> Pour la mesure efficace du diamètre Du filetage

Micromètre d'extérieur à disque



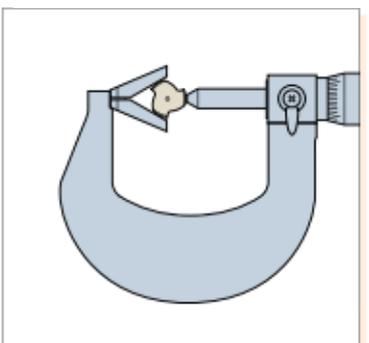
> Pour la mesure de la longueur de la tangente au cercle de base sur des engrenages cylindrique Et helicoidaux

Micromètre à touche à billes



> Mesure du diamètre d'engrenage sur pige

Micromètre à touche prismatique

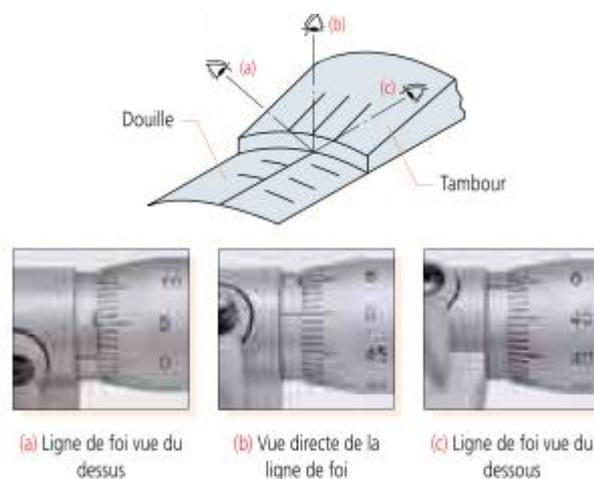


> Pour la mesure des outils de coupe

**Remarques générales concernant l'utilisation d'un micromètre <sup>[3]</sup> :**

1. Vérifiez attentivement le type, la plage de mesure, la précision et les autres caractéristiques du micromètre pour sélectionner un instrument adapté à votre application.
2. Laissez le micromètre et la pièce reposer à température ambiante suffisamment longtemps pour que leur température s'uniformise avant de procéder à une mesure.
3. Observez la ligne de foi selon un angle nul pour identifier correctement sa coïncidence avec une graduation du tambour.

Si les graduations sont observées selon un certain angle, la coïncidence des lignes peut ne pas être identifiée correctement en raison d'une erreur de parallaxe.



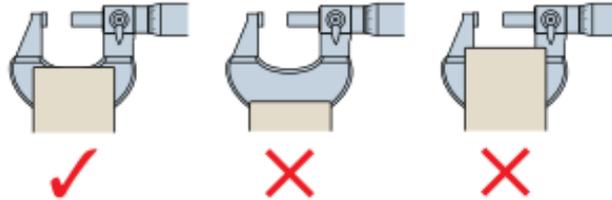
4. Essuyez les faces de mesure de la touche fixe et de la broche avec du papier non pelucheux et réglez le point zéro avant de mesurer.



5. A titre d'entretien quotidien, éliminez la poussière, les copeaux et autres impuretés de la circonférence et des faces de mesure de la broche. Essuyez convenablement l'instrument avec un chiffon sec pour éliminer les taches et les traces de doigts.

6. Utilisez le dispositif de serrage continu correctement de sorte que les mesures soient effectuées avec une force de mesure appropriée.

7. Si le micromètre doit être installé sur un support, le support doit maintenir le micromètre par le centre de la structure. Ne serrez pas le support excessivement.



8. Veillez à ne pas faire tomber le micromètre ou à le heurter avec un objet. Ne faites pas tourner le tambour du micromètre avec une force excessive. Si vous pensez que votre micromètre a été endommagé par une manœuvre involontaire, soumettez-le à un contrôle rigoureux avant de le réutiliser.

9. Après une longue période d'inutilisation ou si aucun film d'huile de protection n'est plus visible, appliquez un léger film d'huile anticorrosion sur le micromètre avec un chiffon.

10. Remarques concernant le stockage :

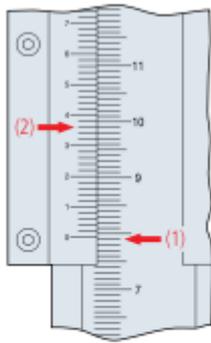
- Évitez d'exposer le micromètre aux rayons directs du soleil ;
- Conservez le micromètre dans un endroit sec et correctement aéré ;
- Conservez le micromètre dans un endroit non poussiéreux ;
- Conservez le micromètre dans un étui ou tout autre contenant sans le poser à terre ;
- Lorsque vous rangez le micromètre, laissez toujours un espace de 0,1 à 1 mm entre les touches ;
- Ne conservez pas le micromètre serré dans un support.

### I.2.4 Le Trusquin :

On appelle *trusquins* les outils de traçage opérant par translation sur une surface d'appui de référence. Ils sont utilisés principalement en menuiserie, en ébénisterie et en fabrication mécanique. Il en existe de nombreuses formes, présentant des degrés de sophistication plus ou moins grands.



Fig I.6 – Trusquin a vernier.

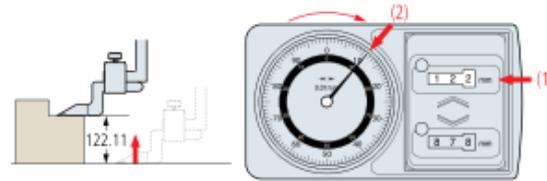
**Exemples de mesures <sup>[3]</sup>:**
**Trusquin à vernier**


Graduation : 0,02 mm

(1) Graduation principale	79,30 mm
(2) Vernier	0,36 mm
Lecture	79,36 mm

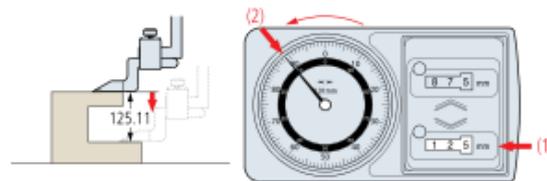
**Trusquin à compteur mécanique**

&gt; Mesure vers le haut par rapport à une surface de référence.



(1) Compteur	122,00 mm
(2) Cadran	0,11 mm
Lecture	122,11 mm

&gt; Mesure vers le bas par rapport à une surface de référence.



(1) Compteur	125,00 mm
(2) Cadran	0,11 mm
Lecture	125,11 mm

**Remarques générales concernant l'utilisation d'un micromètre <sup>[3]</sup> :**

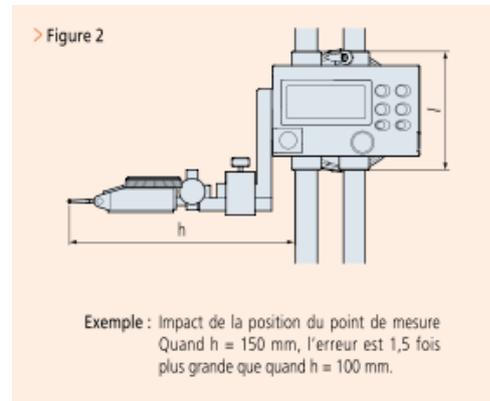
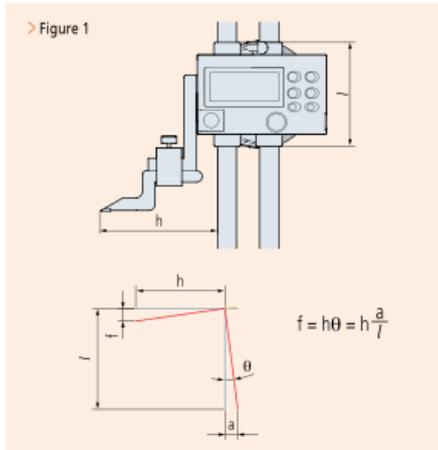
## 1. Causes d'erreurs potentielles :

Comme pour un pied à coulisse, les facteurs d'erreurs de mesure possibles sont, entre autres, les erreurs de parallaxe, les erreurs dues à l'application d'une force de mesure excessive dérivant de l'utilisation d'un trusquin non conforme au principe d'Abbe, et la dilatation thermique due à une différence de température entre le trusquin et la pièce mesurée. Il existe d'autres facteurs d'erreurs liés à la structure du trusquin. En particulier, les facteurs d'erreurs liés à un bord de référence déformé et à une mauvaise installation de la pointe à tracer décrits ci-dessous doivent être pris en compte avant d'utiliser l'appareil.

## 2. Déformation du bord de référence (colonne) et installation de la pointe à tracer :

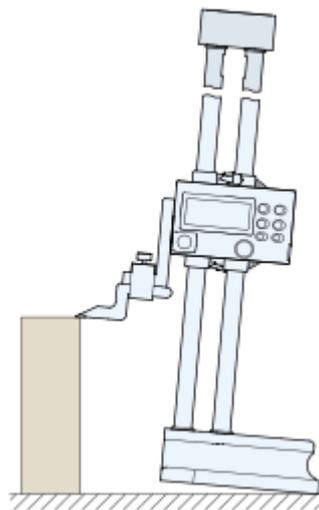
Comme pour le pied à coulisse et comme l'illustre la figure ci-dessous, des erreurs de mesure se produisent en cas de déformation, pendant la mesure, de la colonne de référence qui guide le coulisseau. Cette erreur peut être calculée avec la même formule que celle utilisée pour les erreurs dues à un non respect du principe d'Abbe. L'installation de la pointe à tracer (ou d'un comparateur à palpeur orientable) exige une attention particulière car elle influence l'ampleur des erreurs dérivant d'une déformation de la colonne de référence en augmentant la valeur de la variable h dans la formule ci-dessus. En d'autres termes, l'erreur de mesure sera plus

grande en cas d'utilisation d'une pointe à tracer de grande longueur ou d'un comparateur à palpeur orientable.



### 3. Soulèvement de l'embase par rapport au plan d'appui :

Lors du réglage de la hauteur de la pointe à tracer par rapport à un empilage de cales parallèles ou la surface d'une pièce, l'embase peut se soulever et se désolidariser du plan d'appui si une force descendante excessive est appliquée sur le coulisseau, entraînant une erreur de mesure. Pour effectuer un réglage précis, déplacez le coulisseau délicatement vers le bas pour amener la pointe à tracer en contact avec la surface de la cale parallèle ou de la pièce à mesurer. Le réglage correct est obtenu quand la pointe à tracer touche légèrement la surface lors de son déplacement le long du bord de la surface. Il est également nécessaire de s'assurer que le plan d'appui et la surface de référence de l'embase du trusquin sont exempts de poussière et de bavures avant d'effectuer la mesure.



#### 4. Erreur due à l'inclinaison de la règle principale (colonne) :

Selon la norme JIS, la perpendicularité du bord de référence de la colonne par rapport à la surface de référence doit être meilleure que :

$(0.01+L/100)$  mm L : représente la longueur de mesure (unité : mm).

Cette exigence n'est pas très contraignante. Selon cette formule, la limite de perpendicularité admissible est, par exemple, de 0,61 mm quand  $L = 600$  mm. Ceci parce que ce facteur d'erreur a très peu d'influence et ne modifie pas l'inclinaison du coulisseau, contrairement à une colonne déformée.

#### 5. Relation entre précision et température

Les trusquins sont constitués de différents matériaux. Il convient de rappeler qu'une pièce réalisée dans un matériau différent peut, en fonction de sa propre température et de la température ambiante, altérer la précision de la mesure si ces effets ne sont pas compensés par un calcul de correction.

6. L'extrémité de la pointe à tracer d'un trusquin est très aiguisée et doit être manipulée avec précaution pour éviter de se blesser.

7. Les opérations de gravure de numéros d'identification ou d'autres informations avec un stylo graveur électrique sont dommageables pour les trusquins numériques.

8. Manipulez le trusquin avec précaution pour éviter les risques de chutes et de chocs contre d'autres objets..

9. Maintenez la colonne de guidage du coulisseau en état de propreté.

L'accumulation de poussière sur la colonne rend le coulissement difficile et entraîne des erreurs de réglage et de mesure.

10. Pendant le tracé, verrouillez le coulisseau en position à l'aide des dispositifs de blocage fournis. Il est conseillé de vérifier le réglage après le verrouillage de la pointe à tracer car, sur certains trusquins, cette opération peut modifier légèrement le réglage. Le cas échéant, une tolérance doit être appliquée pour compenser ce phénomène.

11. L'écart de parallélisme entre la surface de mesure de la pointe à tracer et la surface de référence de l'embase doit être de 0,01 mm maximum. Enlevez la poussière et ébavurez les surfaces de contact des dispositifs de fixation lors de

l'installation d'une pointe à tracer ou d'un comparateur à palpeur orientable avant de procéder à une mesure. La pointe à tracer et les autres composants doivent être maintenus en position pendant la mesure.

12. Si la règle principale du trusquin est mobile, déplacez-la de la distance nécessaire pour définir le point d'origine et serrez les écrous de fixation.

13. Les erreurs de parallaxe ne sont pas négligeables. Lorsque vous lisez une valeur, regardez toujours les graduations selon une perspective directe.

14. Opérations à effectuer après l'utilisation :

Essuyez l'instrument pour éliminer toute trace d'eau et d'huile.

Appliquez une légère couche d'huile anticorrosion et laissez sécher avant de ranger l'instrument.

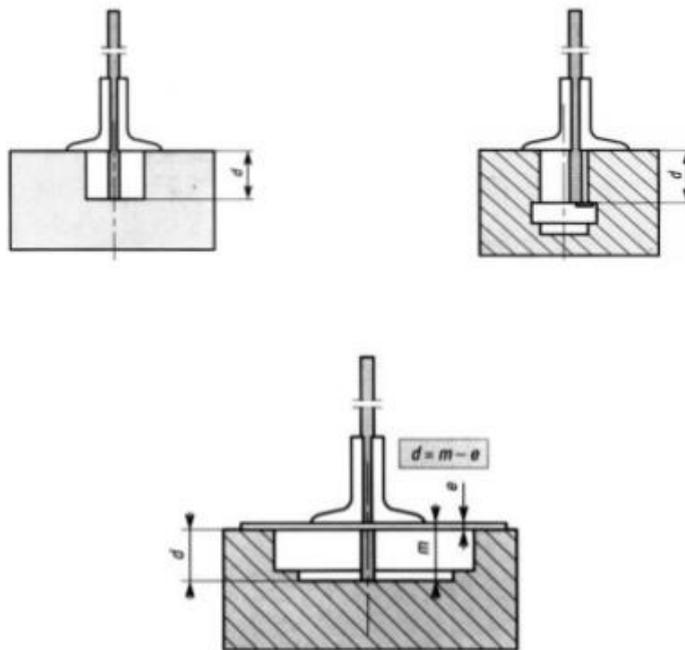
15. Remarques concernant le stockage :

- Conservez le trusquin à l'abri des rayons directs du soleil, des températures excessives et de l'humidité ;
- Si un trusquin numérique ne doit pas être utilisé pendant plus de trois mois, retirez la pile avant de le ranger ;
- Si vous disposez d'une housse de protection, utilisez-la pour le stockage afin d'éviter le dépôt de poussière sur la colonne.

### I.2.5 La Jauge de Profondeur :

La jauge de profondeur est une variante du calibre à coulisse. Il permet la mesure des profondeurs et la méthode de lecture utilisée strictement identique au pied à coulisse.

Utilisation des jauges de profondeurs :



Types des jauges de profondeurs :

On trouve différentes types de jauges de profondeur dont on peut classées selon la nature de lecture :



### I.2.6 Jauge Micromètre de Profondeur :

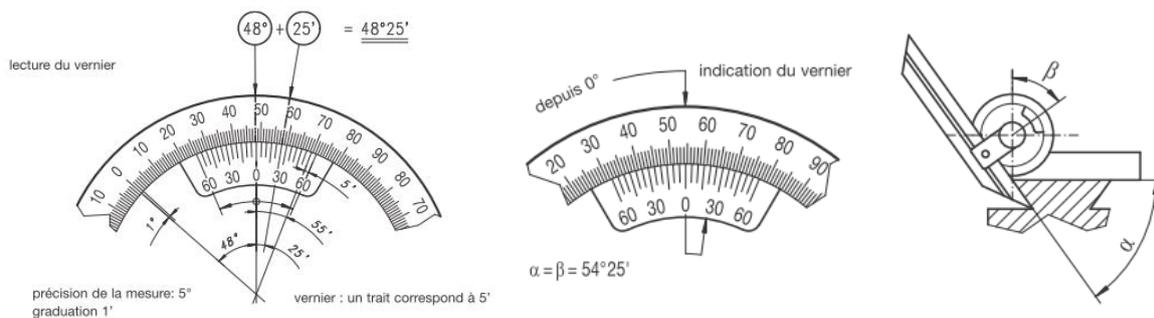


### I.2.7 Rapporteur d'angle :

Un rapporteur d'angle sert à mesurer des angles à l'aide de deux règles en acier inoxydable qui prennent appui sur chacune des surfaces matérialisant l'angle.

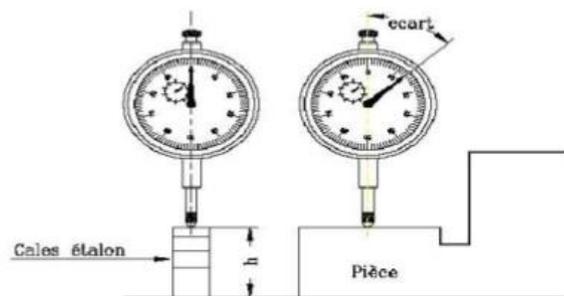


### Exemples de mesures :



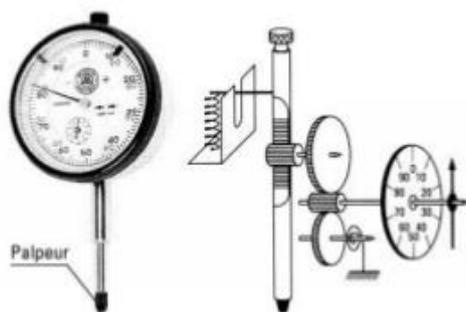
### I.2.8 Le Comparateur :

On peut relever cette grandeur à l'aide d'un capteur ; c'est l'écart entre une pièce à mesurer et un étalon (pièce de référence). Pour ce type de mesurage on utilise le comparateur à cadran.



Le comparateur à cadran utilise un système d'amplification mécanique par pignon crémaillère et train d'engrenages.

Pour un déplacement de  $1\text{ mm}$  du palpeur lié à la crémaillère, l'aiguille liée au pignon terminal de la chaîne cinématique fait 1 tour. Le cadran étant divisé en 100 graduations, chaque graduation est égale à  $0.01\text{ mm}$ . le petit cadran indique le nombre de tours de la grande aiguille.



### **I.2.8.1 Définition du point zéro du comparateur :**

Le respect des spécifications à moins de  $0,2\text{ mm}$  de la fin de course de la broche n'est pas garanti pour les comparateurs numériques.

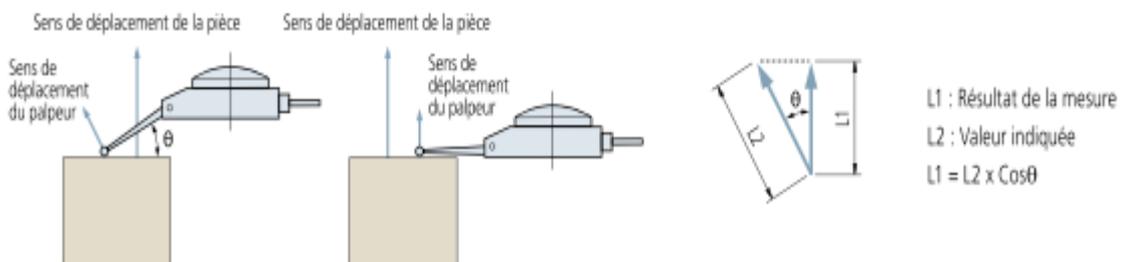
Lors de la définition du point zéro ou de la programmation d'une valeur spécifique, veillez à soulever la broche de  $0,2\text{ mm}$  minimum par rapport à la fin de course [3].



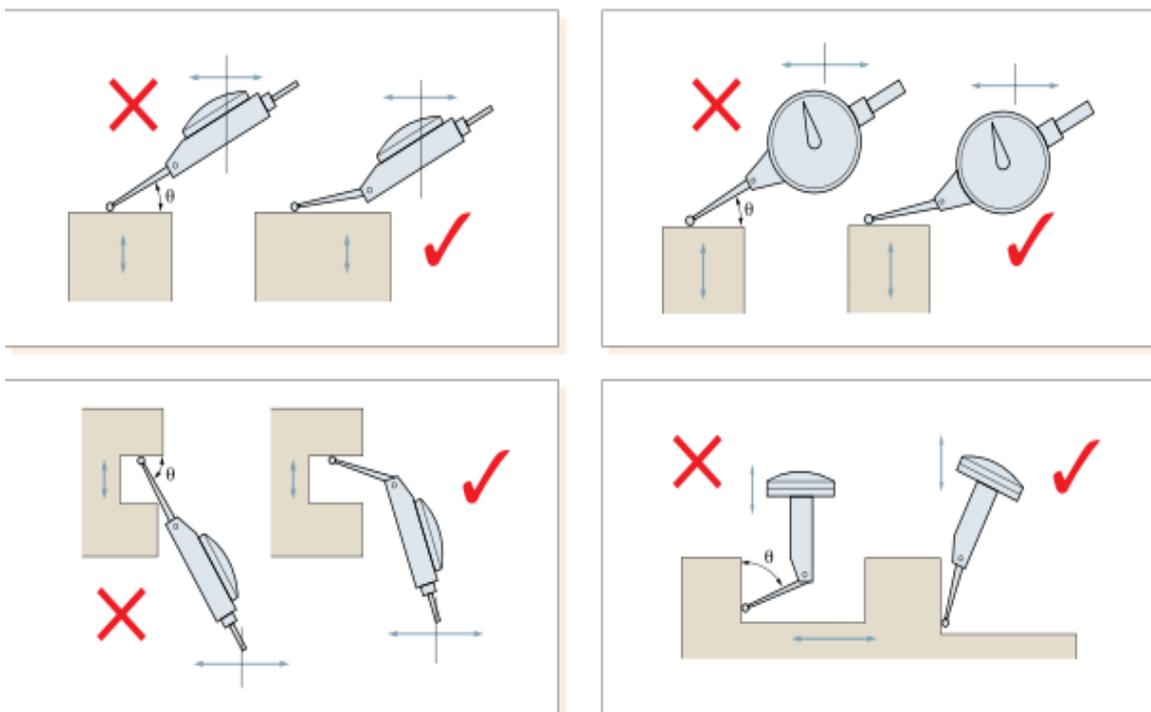
**II.2.8.2 Comparateurs à palpeur orientable et effet cosinus <sup>[3]</sup> :**

Le comparateur n'affichera pas une valeur de mesure correcte si le sens de la mesure est désaxé par rapport au sens de mesure théorique (effet cosinus). Le sens de mesure d'un comparateur à palpeur orientable étant perpendiculaire à la droite passant par la touche et le pivot du palpeur, cet effet peut être atténué en réglant le palpeur de manière à réduire au minimum l'angle T (comme l'illustrent les figures). Si nécessaire, la valeur indiquée par le comparateur peut être corrigée pour les 6 angles indiqués dans le tableau ci-dessous par une valeur de compensation afin d'obtenir le résultat de la mesure.

$$\text{Résultat de la mesure} = (\text{valeur indiquée}) \times (\text{valeur de compensation})$$



Pendant l'utilisation, réduisez toujours l'angle des différents sens de déplacement au minimum.



**❖ Compensation en cas d'angle différent de zéro****Exemples**

Si le comparateur indique une valeur de 0,200 mm pour différentes valeurs de T, les résultats obtenus après compensation sont les suivants :

- ✓ Pour  $\theta = 10^\circ$ ,  
 $0,200 \text{ mm} \times 0,98 = 0,196 \text{ mm}$
- ✓ Pour  $\theta = 20^\circ$ ,  
 $0,200 \text{ mm} \times 0,94 = 0,188 \text{ mm}$
- ✓ Pour  $\theta = 30^\circ$ ,  
 $0,200 \text{ mm} \times 0,86 = 0,172 \text{ mm}$

Angle	Valeur de compensations
10°	0.98
20°	0.94
30°	0.86
40°	0.76
50°	0.64
60°	0.50

**Remarque :**

Une touche spéciale en forme de développante peut être utilisée pour appliquer une compensation automatique et pouvoir mesurer sans compensation manuelle n'importe quel angle  $\theta$  de 0 à 30°. (Ce type de touche est réalisé sur mesure.)

### I.3 Les instruments optiques :

#### I.3.1 Introduction :

Les instruments d'optique ont pour but d'améliorer l'observation des objets en leur substituant des images. On classe ces appareils dans deux catégories principales:

- Ceux qui fournissent des images réelles (téléobjectif, appareils de projection, appareil photographique,... permettant la visualisation ou l'impression de l'image sur un écran ou un film photosensible) ;
- Ceux qui fournissent des images virtuelles observables uniquement à l'œil (miroir, télescope, lunette, périscopes, endoscope, loupe, microscope).

#### I.3.2 BASES THEORIQUES :

##### I.3.2.1 Optique géométrique.

L'optique géométrique se préoccupe de la propagation de la lumière sans se soucier de sa nature ondulatoire. Elle introduit le modèle du rayon lumineux et s'appuie sur les postulats suivants:

1. Propagation rectiligne de la lumière dans un milieu homogène et isotrope ;
2. Réversibilité des trajectoires lumineuses. Un rayon peut parcourir la même trajectoire indifféremment dans les deux sens.
3. Indépendance des rayons lumineux. Chaque rayon lumineux se propage indépendamment des rayons voisins qui n'exercent aucune influence sur lui.

Lorsqu'un rayon arrive sur la surface de séparation de deux milieux optiques différents (dioptré), il se scinde généralement en deux: un rayon réfléchi qui retourne dans le premier milieu, un autre réfracté qui pénètre dans le second milieu après changement de direction (Fig. I.7).

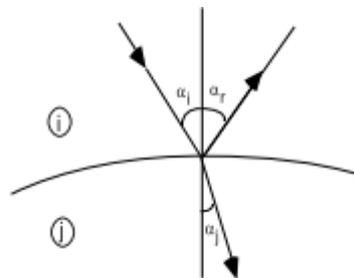


Fig. I.7 – Réflexion et réfraction de la lumière.

### ❖ SYSTEME OPTIQUE :

Un système optique dont le principe de base est l'alignement parallèle du rayon principal avec l'axe optique sur le point focal côté image. Ce procédé permet de conserver la taille de l'image même si elle devient floue lors du déplacement de l'objet le long de l'axe optique. Pour les projecteurs de mesure et les microscopes de mesure, un effet similaire est obtenu en plaçant une lampe incandescente sur le point focal d'un condenseur au lieu du dispositif d'arrêt de l'objectif pour que l'objet soit éclairé par des faisceaux parallèles. (Voir la figure ci-dessous.)

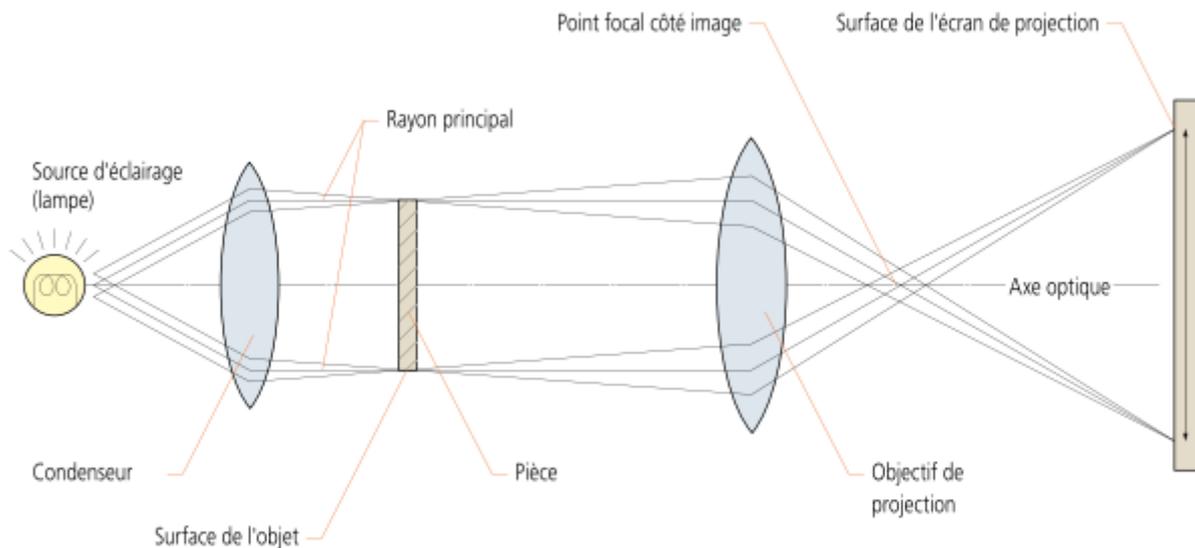


Fig. I.8 – Éclairage diascopique télécentrique.

### I.3.3 Propriétés des instruments d'optique :

Les instruments d'optiques peuvent être classés en deux catégories :

- les systèmes optiques donnant une image réelle, tels que les objectifs des appareils photos, les systèmes de projection, les caméras ;
- les systèmes optiques donnant une image virtuelle ayant un diamètre apparent plus grand que l'objet observé à l'œil nu, comme les loupes, les microscopes, ou les systèmes astronomiques.

#### a. Grandissement :

Le grandissement caractérise un instrument de projection pour lequel l'image est réelle donc caractérisée par sa taille  $A'B'$ .

$$\gamma = \frac{A'B'}{AB}$$

**b. Puissance  $P$  :**

Ce paramètre caractérise les instruments d'optique servant à observer un objet rapproché.

$$P = \frac{\theta'}{AB}$$

Unité : dioptrie  $\delta$  ou encore  $m^{-1}$

Ou :

$\theta'$  : L'angle sous lequel est vue par l'œil l'image formée par l'instrument.

$AB$  : est la taille de l'objet (placé à distance rapprochée)

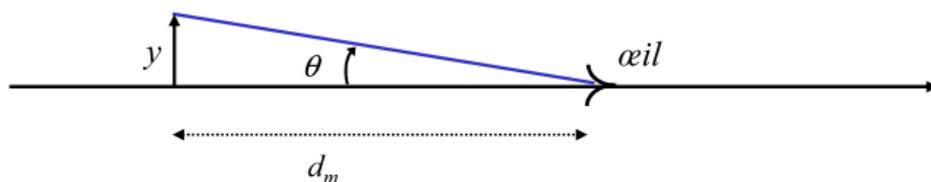
La puissance dépend de la position de l'œil et du réglage de l'instrument.

Lorsque l'image est à l'infini on parle de puissance intrinsèque :  $P_i$

**c. Grossissement  $G$  :**

Le grossissement est le paramètre servant à caractériser un système oculaire dont l'objet observé est à grande distance. Il est défini comme le rapport de l'angle sous lequel est vue par l'œil l'image formée par l'instrument et l'angle sous lequel est vu l'objet à l'œil nu.

$$G = \frac{\theta'}{\theta}$$



$d_m$ : distance minimale de vision nette :  $d_m=25 \text{ cm}$

Bien retenir que l'œil « voit net » un objet situé entre l'infini et  $d_m$ .

On le voit à l'œil sous un angle maximum

$$\theta = \frac{AB}{d_m}$$

Or

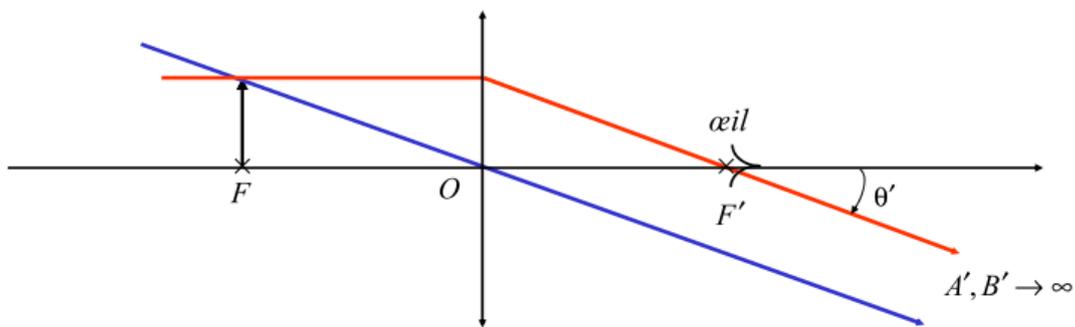
$$\theta' = P * AB$$

Donc

$$G = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{P * AB}{\frac{AB}{dm}} = P * dm = \frac{P}{4}$$

### I.3.4 La Loupe :

La loupe est une lentille convergente de focale qui donne d'un objet à distance finie une image virtuelle agrandie. On la classe dans la catégorie des instruments oculaires. On va donc la caractériser par sa puissance.



#### ✓ Puissance P :

$$P = \frac{\theta'}{AB}$$

$$\tan \theta' = \frac{AB}{f'} \rightarrow \theta' \rightarrow AB = \theta' * f'$$

$$P = \frac{\theta'}{\theta' * f'} = \frac{1}{f'}$$

#### ✓ Grossissement G :

$$G = \frac{\theta'}{\theta}$$

$$\tan \theta' = \frac{AB}{f'} \rightarrow \theta'$$

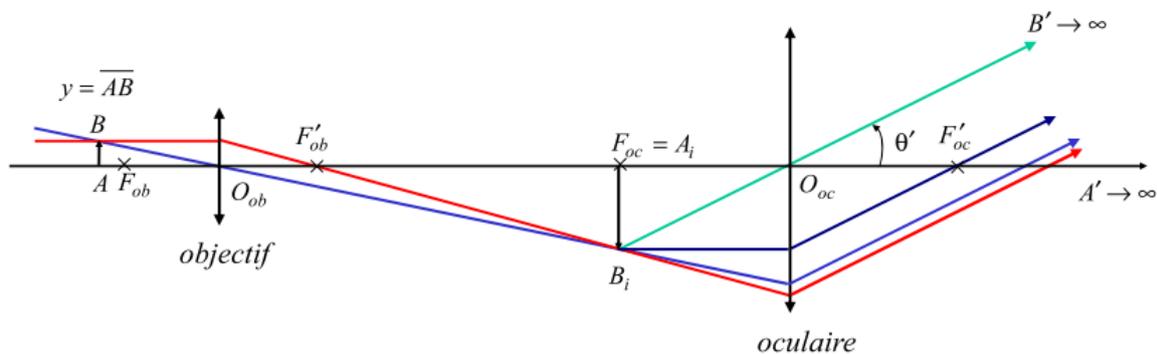
$$\theta = \frac{AB}{dm}$$

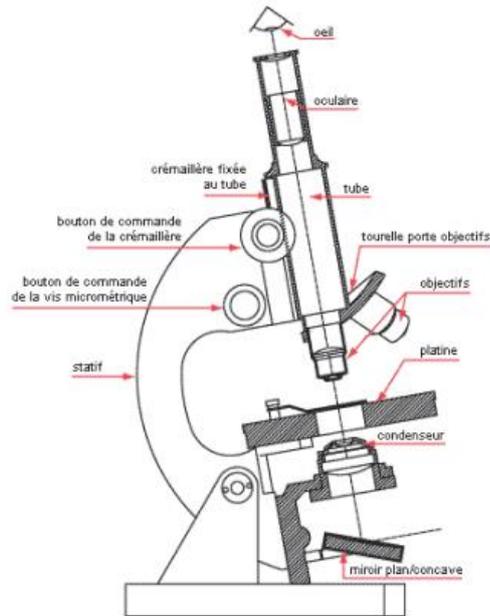
$$G = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{\frac{AB}{f'}}{\frac{AB}{dm}} = \frac{f'}{dm} = \frac{1}{4} f'$$

### I.3.5 Le Microscope :

Le microscope est un instrument destiné à l'observation d'objet très petit. On peut le schématiser par deux lentilles convergentes :

- ✓ Un oculaire dont la focale est plutôt de quelques centimètres :  $f'_{oc}$
- ✓ Un objectif de focale courte (quelques millimètres) :  $f'_{ob}$





✓ **Puissance P :**

$$P_{mic} = \frac{\theta'}{AB} = \frac{\theta'}{AiBi} = * \frac{AiBi}{AB}$$

Puissance de l'oculaire

$$P_{oc} = \frac{\theta'}{AiBi}$$

Grandissement de l'objectif

$$\gamma_{obj} = \frac{AiBi}{AB}$$

$$P_{mic} = P_{oc} * \gamma_{obj}$$

✓ **Grossissement G :**

$$G = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{0.25 * \theta'}{AB} = \frac{0.25 * \theta'}{A'B'} * \frac{A'B'}{AB}$$

Grandissement de l'objectif

$$\gamma_{obj} = \frac{AiBi}{AB}$$

Grossissement commercial de l'oculaire

$$G_{oc} = \frac{0.25 * \theta'}{A'B'}$$

Ainsi, nous pouvons écrire

$$G = \gamma_{obj} * G_{oc}$$

## I.4 Erreurs et incertitudes :

### I.4.1 Introduction :

Tout système de mesure est inéluctablement attaché d'erreurs <sup>[1]</sup> :

- le système de mesure n'est jamais parfait puisqu'il est en général plus ou moins sensible à l'environnement (température, pression, humidité...), il n'est pas fidèle et même les étalons servant à l'étalonnage de l'instrumentation ne sont qu'une matérialisation imparfaite de la définition de l'unité qu'ils sont chargés représenter,
- la mauvaise définition de la grandeur est elle-même une source d'erreur.

Le résultat de mesure s'écrit par conséquent :

$$\text{Resultat de mesure} = \text{Valeur vraie} + \text{erreurs}$$

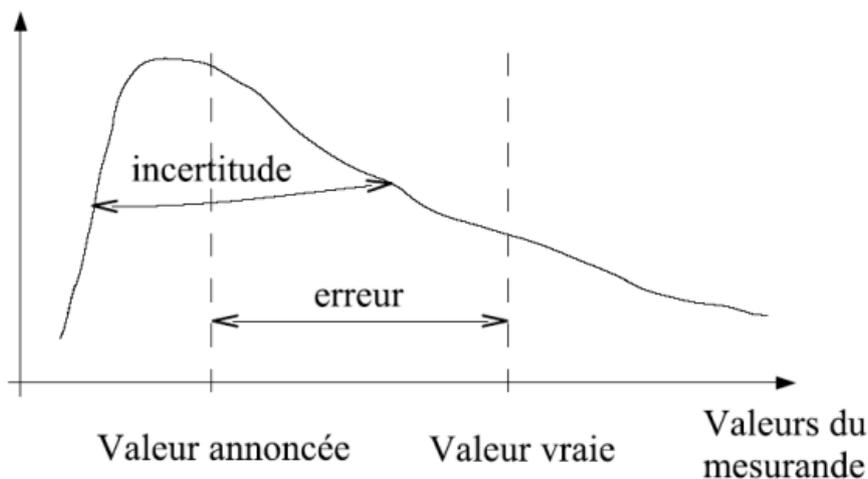


Fig. I.9 – Illustration du concept d'erreur et d'incertitude <sup>[1]</sup>.

Mesurer c'est l'action de comparer une grandeur (quantité) par rapport à une grandeur de même espèce prise comme référence: talon ou gabarit.

L'inexactitude d'une mesure quelconque est due à deux causes différentes: "l'erreur" ou "la faute".

#### **I.4.2 Les fautes :**

Les fautes en topographie sont des inexactitudes qui proviennent de l'opérateur ou de son aide. Les causes fréquentes sont: la maladresse, l'inattention ou l'oubli.

#### **I.4.3 Les erreurs:**

Une erreur est l'inexactitude due à l'imperfection des instruments de mesure et éventuellement la lecture des mesures. Les erreurs peuvent être minimisées en effectuant un bon choix des instruments et des méthodes de mesure.

Il est toujours possible de décomposer le terme erreurs en une erreur systématique et une erreur aléatoire (Fig. I.10).

- L'erreur aléatoire (notée  $e_a$ ) est le résultat d'un mesurage moins la moyenne d'un nombre infini de mesurages du même mesurande (grandeur physique) effectués dans des conditions de répétabilité (tout reste identique).

***NB*** : Comme on ne peut faire qu'un nombre limité (fini) de mesurages, il est seulement possible de déterminer une estimation de l'erreur aléatoire. Cela veut dire que l'erreur aléatoire a elle-même une incertitude associée.

- L'erreur systématique (notée  $e_s$ ) est la moyenne qui résulterait d'un nombre infini de mesurages du même mesurande, effectués dans des conditions de répétabilité, moins une valeur vraie du mesurande.

***NB*** : comme la valeur vraie, l'erreur systématique et ses causes ne peuvent être connues complètement.

On peut toute fois diminuer leur influence en répétant les mesures.

- a- Erreurs vraies: ce sont les erreurs faites par rapport à une valeur exacte parfaite.
- b- Erreurs apparentes: ces sont les écarts de mesures à leur moyenne.

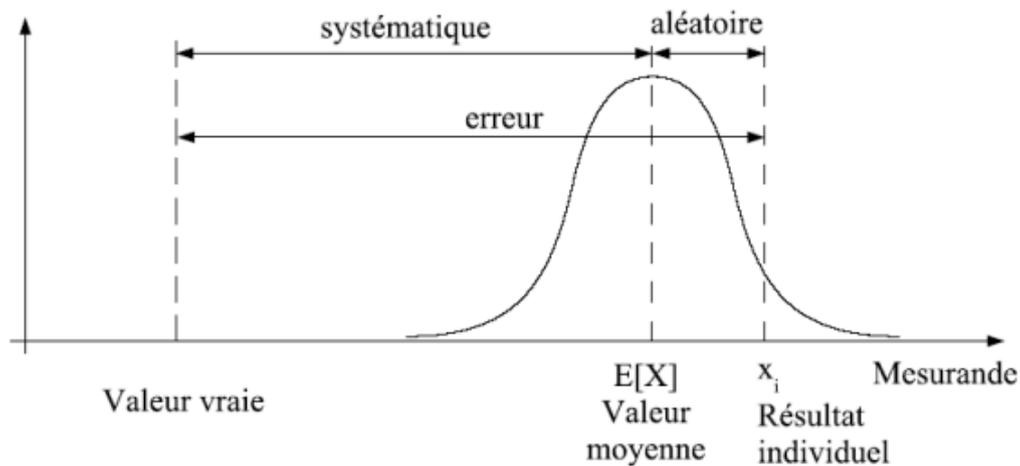
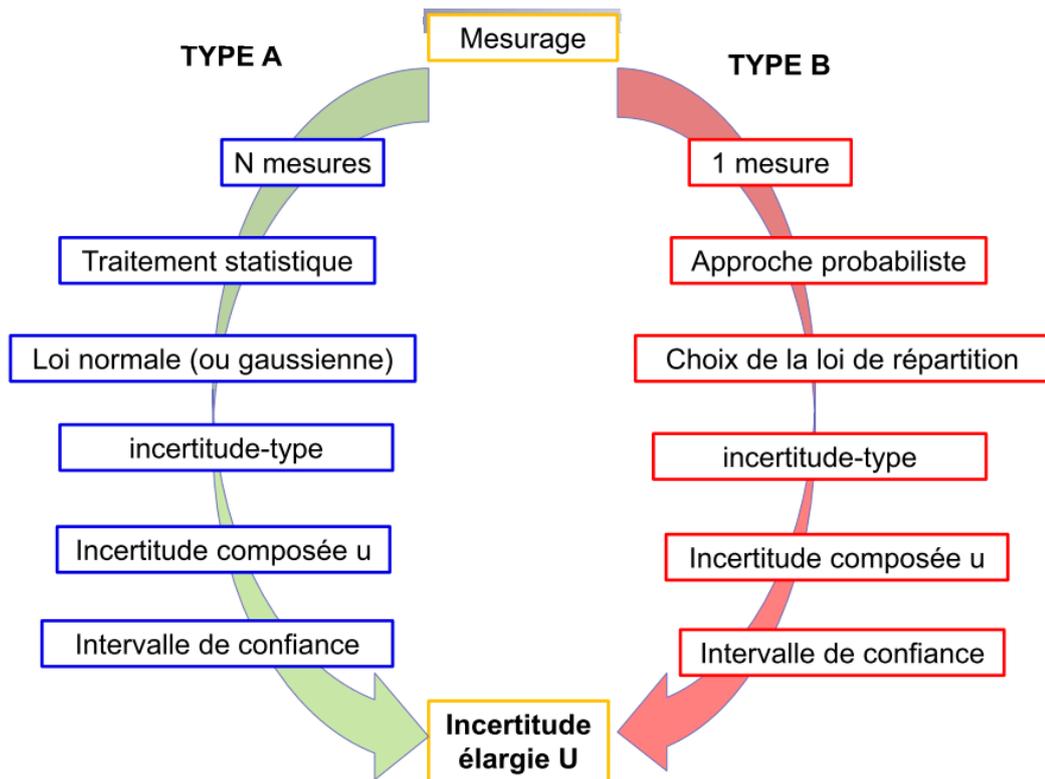


Fig I.10 – Décomposition de l'erreur.

#### I.4.4 Incertitude :

L'incertitude  $\delta x$  traduit les tentatives scientifiques pour estimer l'importance de l'erreur aléatoire commise. En absence d'erreur systématique, elle définit un intervalle autour de la valeur mesurée qui inclut la valeur vraie avec un niveau de confiance déterminé. La détermination de l'incertitude n'est pas simple à priori. On rencontre en pratique deux situations :

- $\delta x$  est évaluée statistiquement : on parle alors d'évaluation de type A de l'incertitude.
- $\delta x$  est évaluée par d'autres moyens : on parle alors d'évaluation de type B de l'incertitude.



**I.4.4.1 Règles de présentation :**

L'incertitude absolue s'exprime avec un seul chiffre significatif. Les chiffres significatifs d'un nombre indiquent le degré de précision de celui-ci :

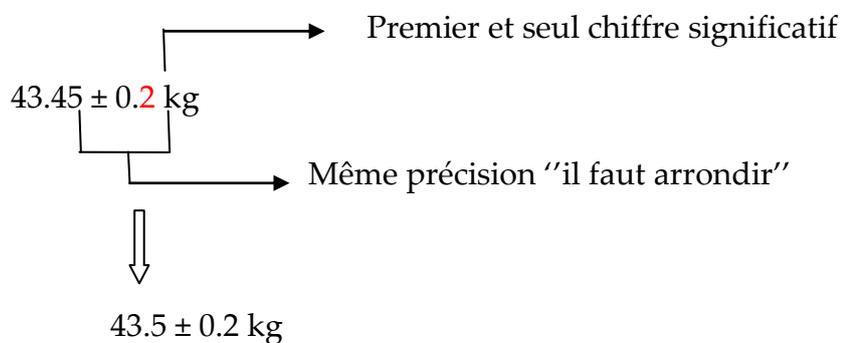
Le premier chiffre significatif dans un nombre, est le premier chiffre dont la valeur n'est pas 0.

La précision d'une mesure doit être la même que celle de son incertitude.

**Exemple 1 :**

Résultat : 43.45 kg

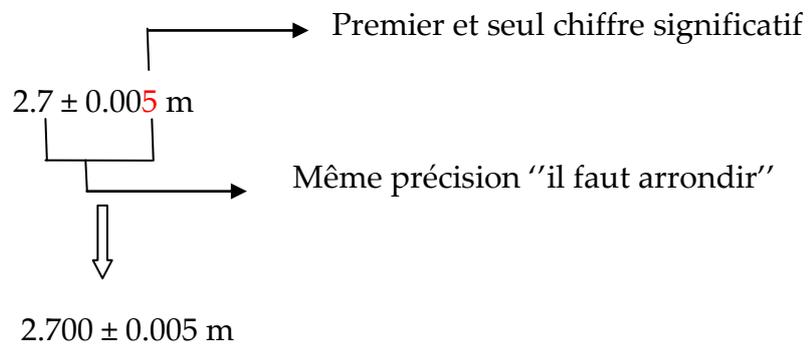
Incertitude :  $\pm 0.2$  kg



Exemple 2 :

Résultat : 2.7 m

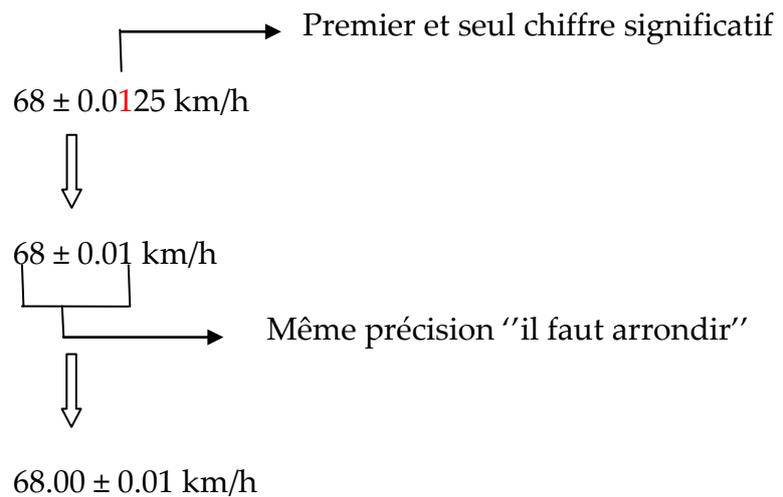
Incertitude :  $\pm 0.005$  m



Exemple 2 :

Résultat : 68 km/h

Incertitude :  $\pm 0.0125$  km/h



Exercices :

- Résultat : 0.0399721 s                      Incertitude :  $\pm 0.000548$  s
- Résultat : 3.1139283 g                    Incertitude :  $\pm 0.00972$  g

**I.4.4.2 Méthode algébrique**

Les opérations sont appliquées successivement sur les différentes parties de l'expression mathématique.

Les grandeurs premières ne doivent apparaître qu'une fois.

Aucune expression trigonométrique.

Opération	$x$	$\Delta x$	$\Delta x / x$
Somme	$a + b$	$\Delta a + \Delta b$	$(\Delta a + \Delta b)/(a+b)$
Différence	$a - b$	$\Delta a + \Delta b$	$(\Delta a + \Delta b)/(a-b)$
Produit	$a * b$	$b\Delta a + a \Delta b$	$\Delta a/a + \Delta b/b$
Quotient	$a / b$	$(b\Delta a + a\Delta b)/b^2$	$\Delta a/a + \Delta b/b$
Puissance	$a^n$	$N a^{n-1} \Delta a$	$n * \Delta a/a$

**I.4.4.3 Incertitude de type A (incertitude de répétabilité) :**

Un même opérateur effectue  $n$  mesures du même mesurande  $m$  dans les mêmes conditions. Si les valeurs mesurées sont différentes, alors il y a une erreur de répétabilité dont l'origine est souvent inconnue. D'une mesure à l'autre, cette erreur peut prendre une valeur différente : erreur de répétabilité est une erreur aléatoire. Elle est évaluée par une méthode statistique.

La meilleure estimation du résultat de la mesure est donnée par la moyenne arithmétique :

$$\text{Meilleure estimation de } \bar{m} = \frac{m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + \dots + m_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n m_n$$

La meilleure estimation de  $\sigma$  déduite des  $n$  mesures  $m_1, m_2, \dots, m_n$ , notée  $\sigma_{n-1}$ , est donnée par:

$$\text{Meilleure estimation de } \sigma = \sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{n=1}^n (m_n - \bar{m})^2}$$

On détermine l'incertitude type de répétabilité  $u(m)$  du mesurande  $m$  à l'aide de la relation suivante :

$$\text{Incertainde type } u(m) = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$$

Comme le nombre de mesures est limité, on introduit le facteur d'élargissement  $k$  (ou coefficient de Student  $t(n; x\%)$ ) qui dépend du nombre de mesures  $n$  et de l'intervalle de confiance ( $x\%$ ) choisi. L'incertitude élargie sur le mesurande se calcule avec la relation :

$$U(m) = k \times u(m) = t(n ; x\%) \times u(m)$$

Coefficient de students

Nombre de mesures	Intervalle de confiance				
	90.0 %	95.0 %	98.0 %	99.0 %	99.9 %
2	2.92	4.3	6.96	9.92	31.60
3	2.35	3.18	4.54	5.84	12.92
4	2.13	2.78	3.75	4.60	8.61
5	2.02	2.57	3.36	4.03	6.87
6	1.94	2.45	3.14	3.71	5.96
7	1.89	2.36	3.00	3.5	5.41
8	1.86	2.31	2.9	3.36	5.04
9	1.83	2.26	2.82	3.25	4.78
10	1.81	2.23	2.76	3.17	4.59
12	1.78	2.18	2.68	3.05	4.32
14	1.76	2.14	2.62	2.98	4.14
17	1.74	2.11	2.57	2.90	3.97
20	1.72	2.09	2.53	2.85	3.85
30	1.70	2.04	2.46	2.75	3.65
40	1.68	2.02	2.42	2.7	3.55
50	1.68	2.01	2.40	2.68	3.50
100	1.66	1.98	2.36	2.63	3.39
10 000	1.64	1.96	2.33	2.58	3.29

**Application :**

On réalise une série de pesées d'un échantillon de masse  $m$  avec une balance électronique. Les résultats sont les suivants :

<i>Essai</i>	$n^{\circ} 1$	$n^{\circ} 2$	$n^{\circ} 3$	$n^{\circ} 4$	$n^{\circ} 5$
$M(g)$	22.85	22.87	22.81	22.79	22.84

La valeur moyenne de ces mesures

$$\bar{m} = (22,85+22,87+22,81+22,79+22,84)/5 = \mathbf{22,83g}$$

On calcule l'incertitude-type de répétabilité pour cette série de mesure :

$$u(m) = 0.071g$$

Pour une série de mesures et un intervalle de confiance de 95%, le coefficient d'élargissement (coefficient de Student) vaut  $t(5 ; 95\%) = \mathbf{2,57}$

L'incertitude élargie de répétabilité de cette série de mesures sera :

$$U(m) = t(5 ; 95\%) \times u(m) = 2,57 \times 0,071 = 0,18 \text{ g}$$

Conclusion : la masse  $m$  de cet échantillon vaut :

$$M = (22,83 \pm 0,18) \text{ g} \text{ soit } M = (22,8 \pm 0,2)g$$

**I.4.4.4 Incertitude de type B:**

L'évaluation de l'incertitude de type B est effectuée par des moyens autres que l'analyse statistique de série d'observations. Elle est basée sur la connaissance de la loi de probabilité suivie par le mesurande.

Différents cas peuvent se présenter :

Le constructeur fournit l'incertitude-type  $u(m)$ . Dans ce cas, on utilise directement son incertitude.

Pour une mesure avec un instrument à graduation (appareil à cadran, lecture d'un réglet, d'un thermomètre ...), l'incertitude type de lecture est :  $u = q/6$ ,  $q$  étant la résolution.

Pour une mesure avec un instrument à affichage numérique, si la résolution est  $q$ , l'incertitude-type de lecture est donnée par la relation  $u = q/(2 \cdot 3^{0.5})$

Le constructeur fournit une indication de type  $\Delta c$  sans autre information.

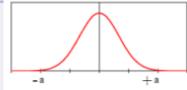
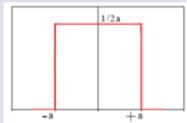
Dans ce cas, on prendra pour incertitude-type :  $u = \Delta c / (3)^{0.5}$

Pour un instrument vérifié et conforme à une classe, si la classe est  $\pm a$ , l'incertitude-type est :  $u = a / (3)^{0.5}$  Si le constructeur ne donne pas d'indications, il faut procéder à l'évaluation expérimentale de l'appareil.

Dans la majorité des cas, lorsqu'on a une estimation de type B, on peut montrer que le coefficient d'élargissement  $k$  à retenir pour un niveau de confiance de 95 % est  $k = 2$  et pour un niveau de confiance de 99 %,  $k = 3$ .

L'incertitude élargie  $U(m)$  est donnée par la relation :

$$U(m) = k \times u(m).$$

Type B					
LOIS DE PROBABILITE USUELLES					
Moyenne = 0			étendue 2a		
Loi	Allure	Écart-type	Instrument	Méthode de calcul	Remarque(s)
Normale		$\frac{a}{3}$	Instrument à graduation	si la résolution est "q", on a : $u = \frac{q}{6}$	IGEN en contradiction avec les recommandations internationales
Uniforme ou rectangle		$\frac{a}{\sqrt{3}}$	indicateur Numérique  Instrument vérifié et conforme à une classe	si la résolution est $q = 2a$ , on a : $\frac{q}{2\sqrt{3}} = \frac{q}{\sqrt{12}}$  si la classe est définie par $\pm a$ , on a : $u = \frac{a}{\sqrt{3}}$	Affichage s'ajoute souvent un pourcentage  $\pm 0,05 \text{ mL} >$ $u = 0,03 \times 2$ (si 2 traits) = 0,06 mL
Dérivée d'arcsinus		$\frac{a}{\sqrt{2}}$	Variation entre deux valeurs de façon sinusoïdale	si les variations sont $\pm b$ , on a : $u = \frac{b}{\sqrt{2}}$	Utile pour la régulation de température

**Exemple 1 :**

Un thermomètre à alcool indique une température de  $\theta = 20,0 \text{ }^\circ\text{C}$ . La résolution du thermomètre est de  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , elle correspond une graduation du thermomètre.

L'incertitude-type de lecture vaut :  $u(\theta) = q/6 = 0,5/6 = 0,08 \text{ }^\circ\text{C}$ .

L'incertitude élargie vaut  $U(\theta) = k \times u_{lecture}(\theta) = 2 \times 0,08 = 0,16 \text{ }^\circ\text{C}$  pour un niveau de confiance de 95 %.

Si on ne tient compte que de cette incertitude :  $U = (20,0 \pm 0,2) \text{ }^\circ\text{C}$  ;  $k = 2$ .

**Exemple 2 :**

On mesure avec un voltmètre de classe 2 une tension  $U = 2,53 \text{ V}$  avec le calibre 20V

L'incertitude-type pour le calibre 20 V sera :  $u(U) = 2/100 \times 20 / \sqrt{3} = 0,23 \text{ V}$

L'incertitude élargie pour un niveau de confiance de 99 % vaut :

$U(U) = k \times u(U) = 3 \times 0,23 = 0,69 \text{ V}$ .

Si on ne tient compte que de cette incertitude :

$U = (2,53 \pm 0,69) \text{ V}$  ou  $U = (2,5 \pm 0,7) \text{ V}$  ;  $k = 3$ .

**I.4.4.5 Incertitude-type élargie dans le cas de plusieurs sources d'erreurs :**

Lors d'un mesurage, nous pouvons évaluer l'incertitude-type élargie de  $n$  sources d'erreurs. L'évaluation peut être du type A, du type B ou les deux mélangées.

Si  $U_i(m)$  est l'incertitude élargie d'une source d'erreur, le calcul de l'incertitude élargie  $U(m)$  sur le mesurande  $m$  s'effectue à partir des variances en appliquant la formule :

$$U(m) = \sqrt{\sum_{i=1}^n U_i(m)^2}$$

**Exemple :**

On mesure le volume d'une solution avec une pipette jaugée de 10,00 mL à la température de 18 °C. Avec le diagramme d'Ishikawa, trois sources d'erreurs sont identifiées et évaluées :

- Incertitude élargie liée à la classe de la pipette :  $U(V) = 0,023 \text{ mL}$
- Incertitude élargie liée au facteur température :  $U_\theta(V) = 0,0048 \text{ mL}$
- Incertitude élargie de répétabilité liée à la mise en œuvre de la manipulation  $U_{\text{rép}}(V) = 0,012 \text{ mL}$

L'incertitude élargie sur le volume  $V$  vaut :  $U(V) = (0,0232^2 + 0,00482^2 + 0,0122^2)^{1/2} = 0,026 \text{ mL}$

On notera donc  $V = (10,00 \pm 0,03) \text{ mL}$ .

L'incertitude relative vaut  $U(V)/V = 0,03/10,00 = 0,003$  soit 0,3 %

## **CHAPITRE II :**

### **MESURE DE TEMPERATURE**

#### **II.1 Les différentes unités de température :**

La température est une grandeur intensive, qui peut être mesurée de deux façons différentes <sup>[4]</sup> :

- A l'échelle atomique, elle est liée à l'énergie cinétique moyenne des constituants de la matière ;
- Au niveau macroscopique, certaines propriétés des corps dépendant de la température (volume massique, résistivité électrique, etc...) peuvent être choisies pour construire des échelles de température.

#### **II.2 Les échelles de température :**

La plus ancienne est l'échelle centésimale (1742), attribuant arbitrairement les valeurs 0 et 100 degrés à la glace fondante et à l'eau bouillante, sous la pression atmosphérique normale. La température ainsi définie dépendant du phénomène choisi (la dilatation d'un fluide) pour constituer le thermomètre étalon on utilise de préférence l'échelle Celsius, définie à partir de l'échelle Kelvin par :

$$T (^{\circ}\text{C}) = T (\text{K}) - 273,15$$

Cette dernière échelle, qui est celle du système international, ne dépend d'aucun phénomène particulier et définit donc des températures absolues. Le zéro absolu (-273,15°C) a pu être approché à quelques millièmes de degrés près. Les phénomènes physiques qui se manifestent aux très basses températures connaissent d'importantes applications (supraconductivité). Dans le domaine des hautes températures, les torches à plasma permettent d'atteindre 50 000 K et les lasers de grande puissance utilisés pour les recherches sur la fusion nucléaire contrôlée donnent, pendant des temps très brefs, des températures dépassant 100 millions de degrés.

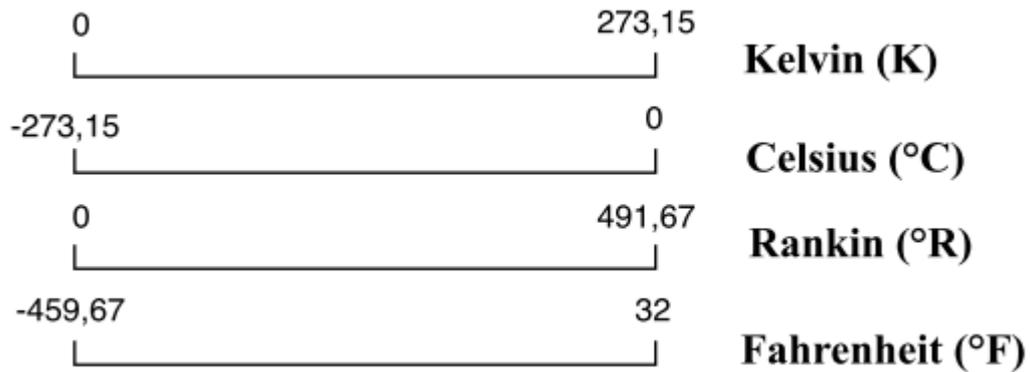


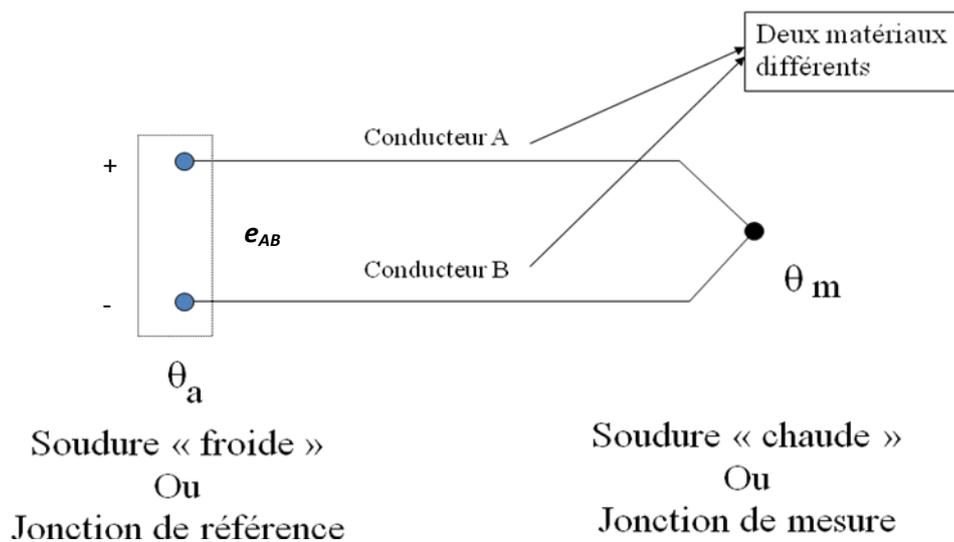
Fig II.1 – Echelles de température [4].

**II.3 Thermocouple :**

En physique, les thermocouples sont utilisés pour la mesure de températures. Ils sont bon marché et permettent la mesure dans une grande gamme de températures. Leur principal défaut est leur précision : il est relativement difficile d'obtenir des mesures avec une erreur inférieure à 0,1 - 0,2 °C. La mesure de température par des thermocouples est basée sur l'effet Seebeck.



**II.3.1 Principe de fonctionnement :**



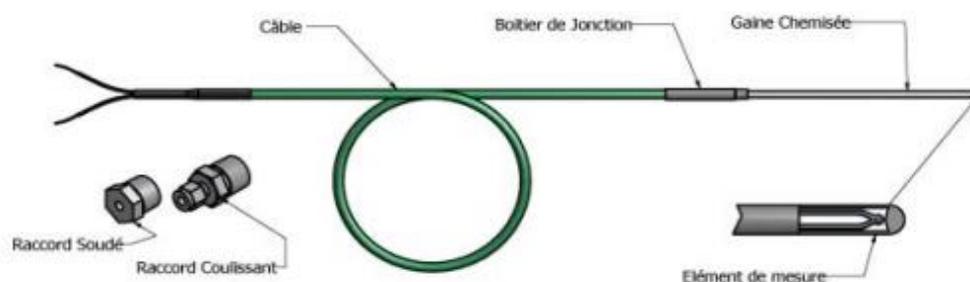
Un thermocouple utilise principalement l'effet Seebeck afin d'obtenir une mesure de la température. Si on réunit à une extrémité deux fils métalliques de natures différentes et que l'on élève la température de cette extrémité, il apparaît une tension  $e_{AB}$  aux extrémités restées libres.

Il est possible de déterminer la température de l'extrémité chauffée à partir de la mesure de  $e_{AB}$ .

On appelle :

- " **Soudure chaude** : Jonction de l'ensemble thermocouple soumis à la température à mesurer : c'est la jonction Capteur.
- " **Soudure froide** : Jonction de l'ensemble thermocouple maintenu à une température connue ou à 0 °C : c'est la jonction Référence.

### II.3.2 Constitution d'un thermocouple industriel :



### II.3.3 Différents types de thermocouples :

Le domaine d'utilisation et le prix d'un thermocouple dépendent des deux métaux utilisés. A chaque couple de métaux, on associe une lettre normalisée. Voici les désignations correspondant aux principaux thermocouples utilisés dans l'industrie :

Type	Métal A(+)	Métal B(+)	Plages utilisation	Coef. Seebeck $\alpha(\mu V/^\circ C)$	Erreur standard
<b>J</b>	<i>Fer</i>	<i>Constantan</i>	-40 à +750 °C	50.38 $\mu V/^\circ C$ à 0°C	2.2% à 0.75%
<b>K</b>	<i>Chromel</i>	<i>Alumel</i>	-40 à +1200 °C	39.45 $\mu V/^\circ C$ à 0°C	2.2% à 0.75%
<b>S</b>	<i>Platine 10% Rhodium</i>	<i>Platine</i>	0 à +1600 °C	10.21 $\mu V/^\circ C$ à 600°C	1.5% à 0.25%
<b>T</b>	<i>Cuivre</i>	<i>Constantan</i>	-40 à +350 °C	38.75 $\mu V/^\circ C$ à 0°C	1% à 0.75%

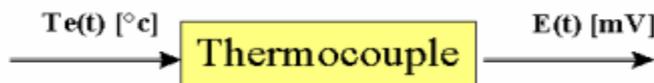
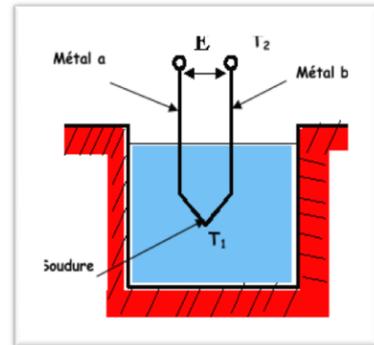
Constantan (alliage nickel+cuivre)

Chromel (alliage nickel + chrome) / Alumel (alliage nickel + aluminium (5%) + silicium)

**II.3.4 Principe de mesure :**

Les deux métaux a et b, de natures différentes, sont reliés par deux jonctions (formant ainsi un thermocouple) aux températures  $T_1$  et  $T_2$ .

Par effet Seebeck, le thermocouple génère une différence de potentiel qui dépend de la différence de température entre les jonctions,  $Te = T_1 - T_2$ .

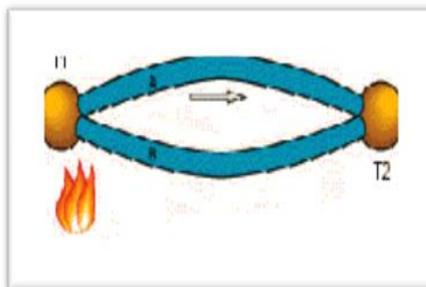


Pour mesurer une température inconnue, l'une des deux jonctions doit être maintenue à une température connue, par exemple celle de la glace fondante (0 °C). Il est également possible que cette température de référence soit mesurée par un capteur (température ambiante, par exemple). La mesure de température est donc une mesure indirecte, puisque les thermocouples mesurent en fait une différence de potentiel électrique.

**II.3.3 Phénomènes thermoélectriques :**

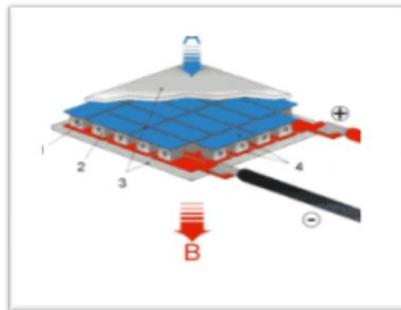
❖ **Effet Seebeck:**

Thomas Johann Seebeck (1770-1831) est le premier à avoir mis en évidence le fait que dans un circuit fermé constitué de deux conducteurs de nature différente (un métal A et un métal B), il circule un courant lorsqu'on maintient entre les deux jonctions une différence de température. Ce courant est dû à l'apparition d'une force électromotrice (fém) directement liée à la différence entre les températures  $T_1$  et  $T_2$  des deux jonctions.



### ❖ L'effet Peltier :

Jean Charles Athanase Peltier, physicien français (1785-1845) est connu pour sa découverte en 1834 de l'effet Peltier : c'est lorsqu'un courant électrique passe dans une jonction de deux conducteurs de métaux différents, on observe une augmentation ou une baisse de température selon le sens du courant ; la quantité de chaleur dégagée ou absorbée étant proportionnelle à l'intensité du courant. C'est, en quelque sorte, l'inverse de l'effet Seebeck. Le passage d'un courant peut donc absorber de la chaleur ; on utilise cet effet dans certains petits réfrigérateurs ou pour le refroidissement de circuits électriques.



### ❖ L'effet Thomson :

Découvert par lord Kelvin. L'effet Thomson se rapporte à la production - ou à l'absorption - de chaleur provoquée par le passage d'un courant dans une portion de conducteur, en présence d'une différence de température entre les extrémités du tronçon.

## II.4 Thermistance :

Les thermistances sont tout simplement des résistances qui ont la propriété de varier en fonction de la température. Branchées en série avec un générateur, présentant une résistance variable, elles se laissent traverser par un courant également variable, en fonction de leur température. On distingue deux types de thermistances :

- *CTN : coefficient de température négatif (NTC thermistor en anglais) dont la résistance diminue quand sa température augmente.*
- *CTP : coefficient de température positif (PTC thermistor) dont la résistance augmente avec la température.*



Elles sont utilisées comme :

- ✓ Capteurs de température ;
- ✓ Élément de protection contre les surintensités et les surchauffe à la matière d'un fusible ;
- ✓ Élément de chauffage s'auto-régulant.

Les thermistances ne peuvent être utilisées que dans une gamme de températures ne dépassant pas 300 °C.

La thermistance est un composant passif en matériau semi-conducteur, c'est à dire qui n'est conducteur qu'à haute tension.

Sa résistance varie avec la température selon la loi :

$$R(T) = R(T_0) e^{\beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

Les températures sont exprimées en Kelvin, les constantes  $B$  et  $T_0$  sont des caractéristiques du composant.  $R(T)$  et  $R(T_0)$  sont de même unité ( $K\Omega$ ).

## II.5 Détecteur infrarouges :

### Qu'est ce que l'infrarouge ????

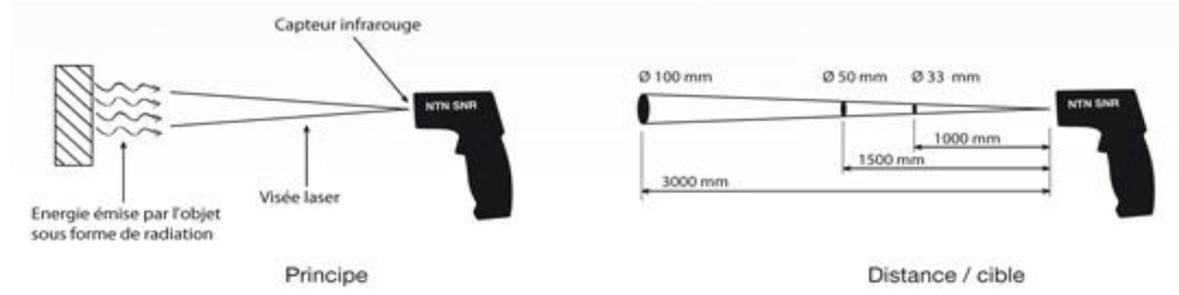
L'infrarouge ( $IR$ ) est un rayonnement électromagnétique d'une longueur d'ondes supérieure à celle de la lumière visible mais plus courte que celle des micro-ondes. Le nom signifie " au-delà du rouge", le rouge étant la couleur de longueur d'onde, la plus longue de la lumière visible.



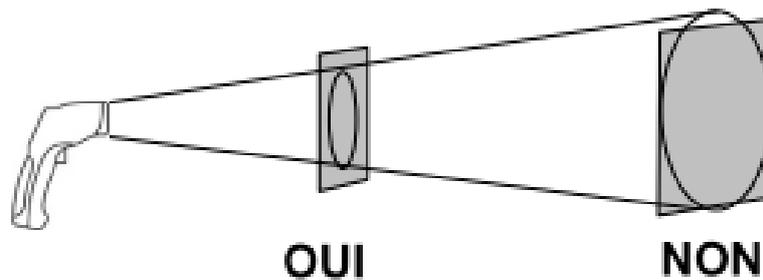
Le thermomètre infrarouge est un thermomètre infrarouge utilisé pour diagnostiquer, inspecter et vérifier n'importe quelle température. Grâce à son système optique élaboré, il permet une prise de mesure facile et précise de petites cibles éloignées.

**Le thermomètre infrarouge, comment ça marche ?**

Un thermomètre infrarouge mesure la température de surface d'un objet. La lentille optique de l'appareil capte l'énergie émise, réfléchié et transmise par l'objet. Cette énergie est collectée et concentrée vers un détecteur. L'électronique de l'appareil traduit cette information en une température qui est ensuite affichée sur l'écran LCD. Pour les appareils dotés d'un laser, celui-ci ne sert qu'à viser l'endroit dont on souhaite connaître la température.



Assurez-vous que la cible est plus large que la taille de la visée laser.



## II.6 Pyromètre optique <sup>[4]</sup> :



La pyrométrie optique est une méthode de mesure de la température basée sur la relation entre la température d'un corps et le rayonnement optique (infrarouge ou visible) que ce corps émet. Les capteurs utilisés sont donc des capteurs optiques, photo-électriques ou thermiques. L'intérêt de la pyrométrie optique est de permettre la détermination d'une température sans contact avec l'objet ; c'est donc une méthode appropriée quand les conditions expérimentales n'autorisent pas l'utilisation de capteurs thermométriques classiques :

- Température très élevée (supérieure à 2000°C) ;
- Mesures à grande distance ;
- Environnement très agressif ;
- Pièce en mouvement ;
- Localisation des points chauds.

### II.6.1 Principes physiques :

Tout corps émet spontanément et en permanence un rayonnement électromagnétique dont le spectre continu a une répartition énergétique fonction de la température : c'est le rayonnement thermique.

Les lois de cette émission sont d'abord établies pour un corps idéal, le corps noir.

- Le corps noir : il est caractérisé par une absorption totale de tout rayonnement incident
- Le corps réel : son rayonnement thermique se rapproche plus ou moins de celui du corps noir suivant son pouvoir absorbant.

## II.6.2 Lois du rayonnement thermique du corps noir :

**Émittance  $E_n$**  : C'est la puissance totale rayonnée dans un hémisphère par unité de surface de l'émetteur ( $W.m^{-2}$ ).

**Loi de Stefan** :

$$E_n = \sigma * T^4$$

$$\sigma = 5.68 \cdot 10^{-8} W.m^{-2} .K^{-4} \quad \text{constante de Stefan}$$

**Émittance spectrale  $E_{\lambda,n}$**  : C'est la densité spectrale de puissance rayonnée dans un hémisphère par unité de surface de l'émetteur, à une longueur d'onde  $\lambda$ .

**Loi de Planck** : loi fondamentale de l'émission thermique.

$$E_{\lambda,n}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)}$$

$$C_1 = 2\pi^5 h^6 C^2$$

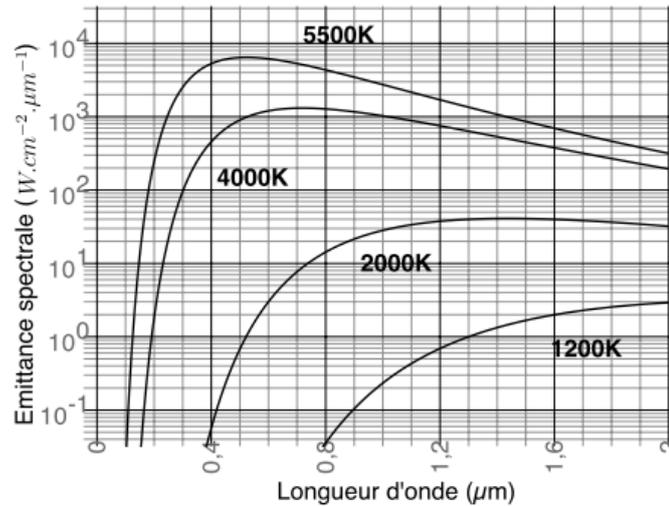
$$C_2 = hc/k$$

$$h : \text{Constante de Planck} = 6.6256 \cdot 10^{-34} W.s^2$$

$$C : \text{vitesse de la lumière} = 2.998 \cdot 10^8 m.s^{-1}$$

$$k : \text{constante de Boltzmann} = 1.38054 \cdot 10^{-23} W.s.K^{-1}$$

Évolution de l'émittance spectrale en fonction de la longueur d'onde pour diverses températures :



**Fig II.2** – – Emission spectrale en fonction de la longueur d'onde pour diverses températures [4].

Sur la figure, on remarque l'augmentation rapide de l'émission avec la température et le déplacement du spectre de l'infrarouge vers le visible (de 0,4  $\mu\text{m}$  à 0,8  $\mu\text{m}$ ) au fur et à mesure que la température augmente.

**Remarque :**

- En dessous de 500°C, le rayonnement thermique est quasi totalement dans le domaine infrarouge ;
- Dans le cas du soleil, ( $T = 5500 \text{ K}$ ),  $\lambda_{\text{max}}$  correspond au maximum de sensibilité de l'œil.

**II.6.3 Lois du rayonnement thermique du corps réel:**

L'émission spectrale d'une cible réelle  $E$ , est liée à l'émission spectrale du corps noir  $E_{\lambda,n}$  par la relation :

$$E_{\lambda}(T) = e(\lambda, T)E_{\lambda,n}(T)$$

$e(\lambda, T)$  : émissivité du corps réel à la longueur d'onde  $\lambda$  et à la température  $T$ . Elle est égale à son coefficient d'absorption (loi de Kirchhoff). Elle est inférieure à 1 et dépend de la nature du corps réel et de son état de surface. L'incertitude sur sa valeur est l'une des principales sources d'erreurs potentielles en pyrométrie optique.

**Le corps gris** : son émissivité ne dépend pas de  $\lambda$ .

## CHAPITRE III :

### MESURE DES DEBITS ,

### DES VITESSES ET DES PRESSIONS

#### III.1 Mesure de débit:

##### III.1.1 Le Débit :

Le débit, c'est la quantité de fluide qui s'écoule ou qui est fournie par unité de temps.

Exemple : Le débit d'un cours d'eau, d'une pompe, d'une vanne...

Il existe deux types de débits, le **débit massique**  $Q_m$  (kg/s) et le **débit volumique**  $Q_v$  (m<sup>3</sup>/s). Ils sont reliés par <sup>[5]</sup> :

$$Q_m \text{ (kg/s)} = \rho \text{ (kg/m}^3\text{)} Q_v \text{ (m}^3\text{/s)}$$

##### III.1.2 Régime laminaire et régime turbulent :

La Viscosité : C'est la résistance d'un fluide à son écoulement uniforme et sans turbulence. En fonction de la viscosité du fluide, la répartition de la vitesse du fluide n'est pas la même sur toute la surface.

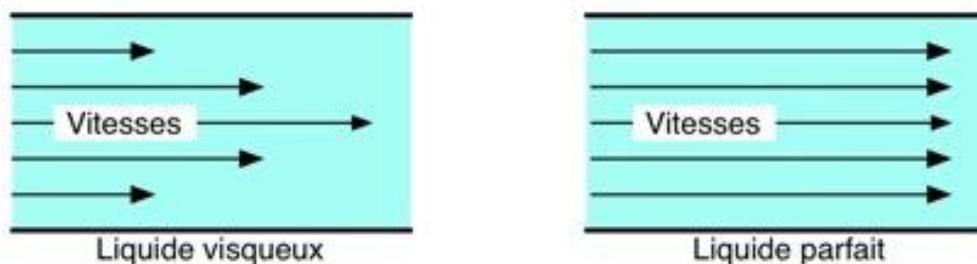
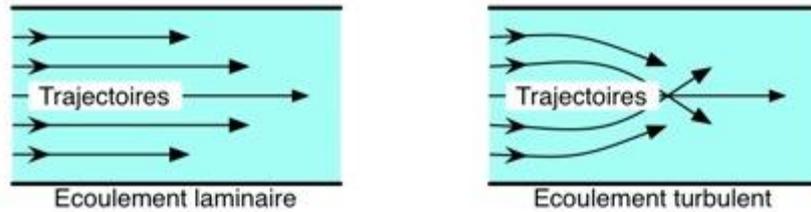


Fig III.1 – Influence de la viscosité sur la vitesse du fluide <sup>[5]</sup>.

Le régime laminaire d'un fluide s'effectue par glissement des couches de fluide les unes sur les autres sans échange de particules entre elles, par opposition au régime turbulent.



**Fig III.2** – Ecoulement laminaire ou turbulent.

Dans le cas d'un écoulement incompressible et isotherme, le nombre de Reynolds suffit pour déterminer le type d'écoulement :

$$R_e = \frac{V(m/s) \cdot Q(m)}{\nu(m^2/s)}$$

$V$  : vitesse du fluide en  $m/s$ .

$L$  : longueur caractéristique de la canalisation en  $m$ .

$\nu$  : la viscosité cinématique du fluide en  $m^2/s$ .

La viscosité cinématique est égale à la viscosité dynamique divisée par la masse volumique.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

$\mu$  : viscosité dynamique en  $kg/ms$  ou  $N/m^2s$  ou  $Pas$ .

$\rho$  : masse volumique en  $kg/s$ .

Un écoulement est **turbulent** pour  $Re > 2\,300$ . Dans le cas contraire, l'écoulement est laminaire.

### III.1.3 La Vitesse :

Dans le cas d'un écoulement laminaire, on peut déterminer le débit d'un fluide à partir de sa vitesse :

$$Q(m^3/s) = V(m/s) \cdot S(m^2)$$

Avec :

$Q$  : le débit du fluide,  $V$  : la vitesse du fluide et  $S$  : la section de la canalisation.

### III.2 Débitmètres Volumiques :

Pour un écoulement laminaire (figure III.2), la connaissance de la vitesse du fluide et de la section de la canalisation suffit pour déterminer le débit du fluide (figure III.3).

Lors de la mise en place de ces capteurs, on s'attachera à les placer dans des parties droites de la canalisation et à une distance respectable (en général plusieurs fois le diamètre de la canalisation) de dispositif générant des pertes de charges importantes (coude, restriction, vannes, etc...).

### III.2.1 Débitmètre à Tube de Pitot :

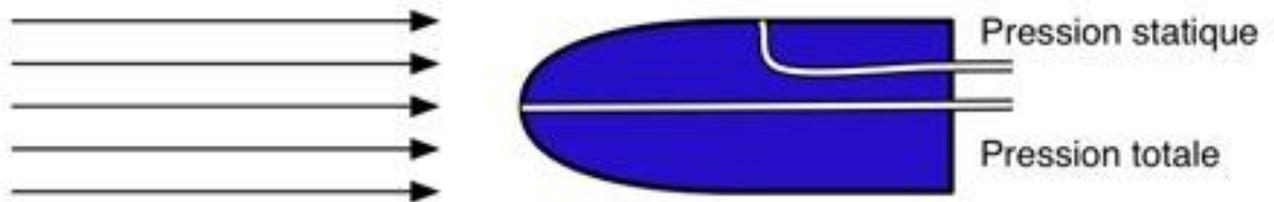


Fig III.3 – Tube de Pitot <sup>[5]</sup>

Dans un tube de Pitot (figure III.3), la mesure des pressions statique et totale permet de connaître la vitesse du fluide.

$$V(m/s) = \sqrt{\frac{2(P_{total}(Pa) - P_{statique}(Pa))}{\rho(kg/m^3)}}$$

### III.2.2 Débitmètres à Organe Déprimogène :

Un resserrement de la conduite ou un changement de direction créent entre amont et aval une différence de pression  $\Delta P$  liée au débit par une relation de la forme :

$$Q_v(m^3/s) = k(m^2) \sqrt{\frac{\Delta P(Pa)}{\rho(kg/m^3)}}$$

Avec  $\rho$  : est la masse volumique du fluide et  $k$  une constante fonction de l'organe. Cette équation est vérifiée dans une certaine gamme du nombre de Reynolds. Les principaux organes déprimogènes sont représentés sur la figure III.4 :

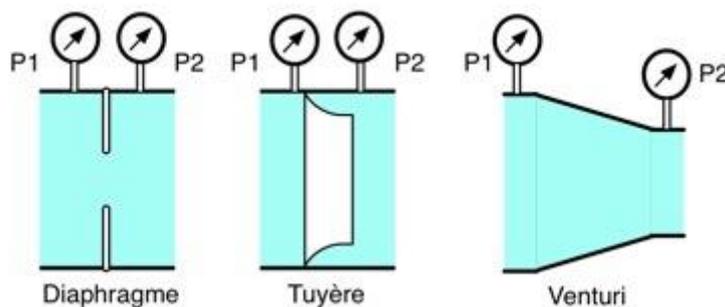


Fig III.4 – Les différents organes déprimogènes <sup>[5]</sup>

Le diaphragme est l'organe déprimogène le plus utilisé.

### III.2.2.1 Caractéristiques métrologiques :

Ces dispositifs permettent des mesures dans une très large gamme de mesure ; d'une fraction de  $\text{m}^3/\text{h}$  à  $10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ . Les mesures sont approximativement de classe 1.

Ces dispositifs entraînent des pertes de charges non négligeables, elles sont fonction du  $\beta=d/D$ , le rapport entre le petit et le grand diamètre de l'organe utilisé (figure III.5).

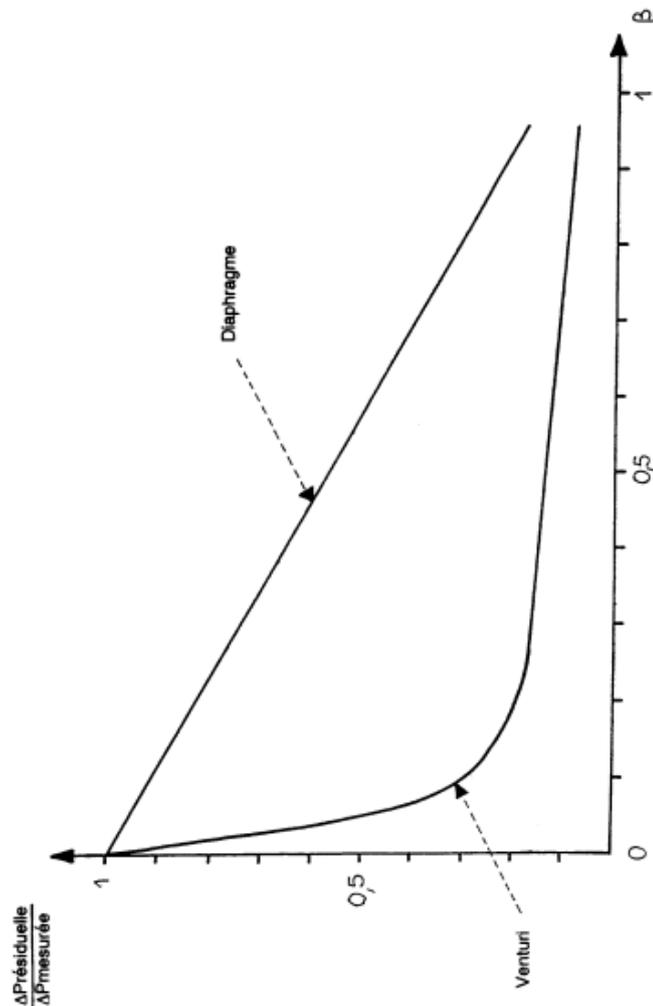


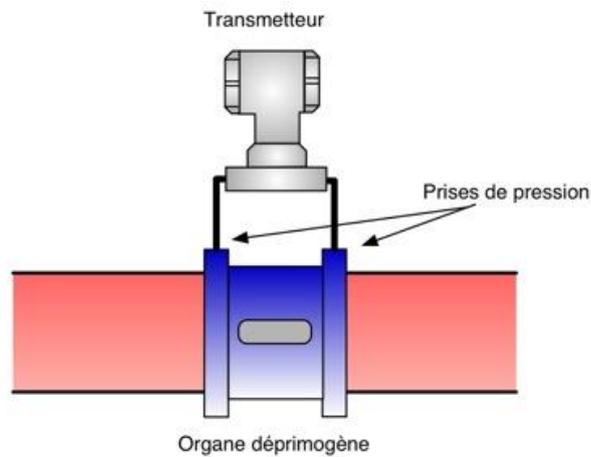
Fig III.5 – Pertes de charge d'un diaphragme et d'un venturi <sup>[5]</sup>

**III.2.2.2 Montage du transmetteur de pression différentielle :**

Pour mesurer le débit à l'aide d'un organe deprimogène, on utilise un transmetteur de pression différentielle (voir montage fig III.6). En réglant le transmetteur de pression conformément au tableau 1.

Unité physique primaire	kPa
Valeur basse étendue de mesure en unité physique primaire	0
Valeur haute étendue de mesure en unité physique primaire	50
Unité physique secondaire	m <sup>3</sup> /h
Valeur basse étendue de mesure en unité physique primaire	0
Valeur haute étendue de mesure en unité physique primaire	20
Type de sortie	directe
Fonction de sortie	racine

**Tableau III.1** - Exemple de réglage d'un transmetteur de pression intelligent <sup>[5]</sup>



**Fig III.6** – Montage du transmetteur de pression différentielle <sup>[5]</sup>

En réglant le transmetteur de pression, on réalise alors les relations entre les grandeurs physiques représentées sur la figure.



Fig III.7 – Relation entre les grandeurs physiques d'une mesure de débit par organe déprimogène <sup>[5]</sup>.

### III.2.3 Débitmètre à Ludion:

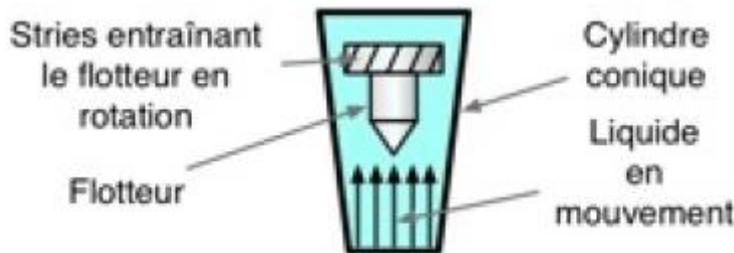


Fig III.8 – Débitmètre à ludion <sup>[5]</sup>

Un flotteur tiens en équilibre dans une canalisation conique (fig III.8). Quand le flotteur est en équilibre on peut écrire (équation d'équilibre) :

$$Mg = \rho Vg + \rho \frac{SCxU^2}{2} \Rightarrow U = \sqrt{\frac{2g}{\rho SCx}} (M - \rho V)$$

$\rho$ : la masse du fluide

$g$ : l'accélération de la pesanteur

$Cx$ : coefficient de trainée du flotteur selon l'axe x

$S$ : le maître couple (sa surface projetée sur le plan yz) en m<sup>2</sup>

$U$ : la vitesse du fluide en m/s

$M$ : la masse du flotteur en kg

Le diamètre du conduit varie linéairement en fonction de la hauteur  $z$  :  $D = D_0 + az$

Le débit  $Q$  vérifie :

$$Q = \frac{\pi}{4} ((D_0 + az)^2 - D_0^2) U$$

$$\text{Si } S = \frac{D_0^2}{4} \text{ et } az \ll D_0, \text{ on a}$$

$$Q = az \sqrt{\frac{2g\pi(M - \rho V)}{\rho Cx}}$$

### III.2.3.1 Caractéristiques métrologiques

La gamme de mesure va :

- de 0,5 litre/h à 200 000 litres/h pour les gaz ;
- de 0,2 litre/h à 20 000 litres/h pour les liquides.

La précision est de 3 % à 10% de l'étendue de la mesure. La température du fluide peut approcher 400°C sous 25 bars. Le rotamètre introduit des pertes de charge.

### III.2.4 Débitmètre à coupelle, à hélice ou à turbine :



Fig III.9 – Débitmètre à turbine <sup>[5]</sup> .

Ce type d'anémomètre, désigné aussi comme moulinet, comprend un corps d'épreuve formé d'un ensemble de coupelle ou d'une hélice qui est mise en rotation par le fluide en mouvement (figure III.9). La vitesse de rotation est mesurée par un dispositif tachymétrique <sup>[5]</sup> .

#### III.2.4.1 Montage de Mesure :

On utilise les capteurs classiques de vitesse de rotation :

- La dynamo-tachymétrique ;
- Le capteur optique ;
- Le capteur inductif.

#### **La dynamo-tachymétrique**

C'est une machine à courant continu qui fournit une tension proportionnelle à la vitesse de rotation de son rotor. L'inconvénient de ce type de mesure est que la dynamo-tachymétrique diminue la sensibilité de notre capteur <sup>[5]</sup> .

#### **Le capteur optique et le capteur inductif**

On transforme la vitesse de rotation en une suite d'impulsions électriques dont la fréquence est proportionnelle à cette vitesse. On utilise un procédé optique ou inductif.

### III.2.4.2 Domaine d'utilisation :

Des précisions de l'ordre de 1 % peuvent être atteintes. Cependant, la réponse peut être faussée par de fortes turbulences et par des variations de vitesses importantes.

Leur domaine d'utilisation est de 0,1 à 30 m/s pour les gaz et de 0,05 à 10 m/s pour les liquides.

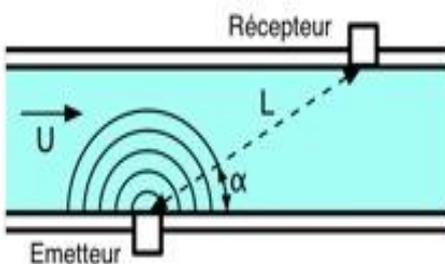
### III.2.5 Débitmètre à palette :

Une palette est soumise à la force aéro ou hydrodynamique de l'écoulement, à son poids, et éventuellement à l'action d'un ressort de rappel (figure III.10). La position d'équilibre est mesurée à l'aide d'un montage potentiométrique. L'intérêt de ce type de débitmètre est sa simplicité. Il entraîne des pertes de charges <sup>[5]</sup> .



Fig III.10 – Débitmètre à palette <sup>[5]</sup>.

### III.2.6 Débitmètres ultrasoniques :



Un émetteur ultrasonique émet des trains d'ondes. La mesure du temps mis par le signal pour parcourir la distance  $L$  entre l'émetteur et le récepteur nous permet de connaître la vitesse du fluide. Le temps mis par l'onde ultrasonore pour aller de l'émetteur vers le récepteur est :

$$t = \frac{L}{c + U \cos \alpha}$$

Avec

$t$  : temps en s ;

$c$  : vitesse de propagation du son dans le fluide en m/s ;

$U$  : vitesse du fluide en m/s ;

$\alpha$  : angle entre  $U$  et la direction définie par le couple émetteur / récepteur.

### III.2.6.1 Caractéristiques métrologiques :

L'intérêt de ce dispositif est que l'ensemble du dispositif est à l'extérieur de la canalisation. Il est donc insensible à l'agressivité du fluide et n'entraîne aucune perte de charge. Il permet des mesures de débit compris entre 0,1 m<sup>3</sup>/h et 105 m<sup>3</sup>/h, selon le diamètre de la conduite qui peut être compris entre quelques millimètres et plusieurs mètres. Ce débitmètre est utilisé par exemple pour mesurer les débits des hydrocarbures. Il existe des systèmes semblables utilisant l'effet Doppler à partir d'une source lumineuse (laser) dans les gaz <sup>[5]</sup> .

**Référence :**

- [1] Notions de métrologie, Frédéric Taillade, 30 juin 2005.
- [2] Métrologie et Appareils de mesure, Frijia Mounir, Institut Supérieur des Sciences Appliquées et de Technologie de Sousse.
- [3] Guide pratique des instruments de mesure de précision.
- [4] Mesures de températures, 2006-2007.
- [5] Mesures de débit, 2006-2007.