

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Larbi Ben M'Hidi Oum El Bouaghi

Faculté des Sciences et Science Appliquées

Département de Génie Mécanique

Support de Cours

Matière : Mesure et Instrumentation

Pour les étudiants de 3^{ème} année Energétique

Filières : Génie Mécanique

Dr. Amar HADEF

Le présent document consiste à donner un aperçu sur les différents instruments de mesure. Il s'agit d'un support de cours de la matière " Mesure et Instrumentation " destiné aux étudiants de la 3^{ème} année de Licence (S5), Filière de Génie Mécanique du domaine des Sciences et Technologie (ST). Le cours est structuré selon le programme des enseignements du socle commun, 5ème semestre, défini par l'arrêté 562 du 23 Juillet 2014.

Le contenu de ce document est largement inspiré des documents et sources cités dans la liste des références bibliographiques. Dans cette matière l'étudiant(e) apprendra à choisir les bons instruments et les bons capteurs pour monter ses propres expériences. Être capable d'apprécier les erreurs.

Sommaire

Chapitre 1. Mesures des épaisseurs et des longueurs

1.1 Principe des mesures de longueur	1
1.2 Appareils employé en élongation	
1.2.1 Le réglelet normal ou à talon	2
1.2.2 Le pied à coulisse	2
1.2.2.1 Principe du vernier au dixième de millimètre	3
1.2.2.2 Pied à coulisse avec une précision de lecture au 1/20 de millimètre.....	3
1.2.2.3 Pied à coulisse avec une précision de lecture au 1/50 de millimètre.....	4
1.2.3 Le palmer ou micromètre	4
1.2 Les instruments pneumatiques (Tampons de mesure à soufflage direct).....	5
1.3 Les instruments optiques	
1.3.1 Rappel de physique	7
1.3.1.1 Réflexion des rayons lumineux	7
1.3.1.2 Réfraction des rayons lumineux	7
1.3.1.3 L'amplification optique	8
1.3.2 Réticules et micromètres	8
1.3.3 Principe de la projection	9
1.4 L'appréciation des erreurs	
1.4.1 Les erreurs systématiques	11
1.4.2 Les erreurs aléatoires liées aux conditions opératoires	11
1.4.3 Erreur de Justesse	12
1.4.4 Erreur de fidélité	12
1.4.5 Erreur de Répétabilité	12

Chapitre 2. Mesures de température

2.1 Thermocouples, thermistances, détecteurs infrarouges, pyromètres	
2.1.1 Thermocouples	13
2.1.2 Thermomètres à thermistance	14
2.1.3 Détecteurs infrarouges	15
2.1.4 Pyromètre	

2.1.4.1	Le pyromètre optique à disparition de filament	17
2.1.4.2	Pyromètres à radiation totale	18
2.1.4.3	Pyromètres bi chromatiques	18
2.1.4.4	Pyromètres mesureurs d'énergie	18
2.2	L'étalonnage des capteurs thermiques	19
2.3	Les erreurs liées aux capteurs thermiques. Le choix des capteurs	20
2.3.1	Les erreurs	20
2.3.1.1	Incertitude de mesure	20
2.3.1.2	Ecart de mesure systématiques	20
2.3.1.3	Ecart de mesure statistique	20
2.3.1.4	Erreur de dissipation de chaleur de la sonde de température	20
2.3.2	Le choix des capteurs	
2.4	L'acquisition automatique des mesures et les cartes d'acquisition.	21
2.4.1	L'acquisition automatique des mesures	21
2.4.2	Les cartes d'acquisition	21

Chapitre 3. Mesures des débits, des vitesses et des pressions

3.1	Les principaux débitmètres	24
3.1.1	Le Venturi :	24
3.1.2	Diaphragme (débitmètre à pression différentielle)	25
3.1.3	Mesure de débit par un flotteur	25
3.1.4	Le débitmètre à ultrasons	26
3.2	Le choix et les erreurs liées à chaque type	27
3.3	Les tubes de Pitot, Präsil et Prandtl	28
3.4	Les anémomètres à fils chauds et films chauds, anémomètres laser Dopler, PIV	
3.4.1	Les anémomètres à fils chauds et films chauds	29
3.4.2	Anémomètres laser Dopler	31
3.4.3	Vélocimétrie par Images de Particules (PIV)	33
3.5	Mesures de pression : Capteurs mécaniques, capteurs piezo-électriques	34
3.5.1	Capteurs mécaniques	
3.5.1.1	Manomètres à déformation de solide	37
3.5.1.2	Manomètre à capsule	40
3.5.2	Capteurs piezo-électriques	41

4. Mesures électriques	.....	42
4.1 Méthode direct	.....
4.1.1 ohm mètre à déviation	.....	43
4.1.2 Ohmmètre numérique	.....	44
4.2 Méthode indirect volt-ampéremétrique	.....	44
5. Le traitement du signal	.....	45
5.1 L'échantillonnage	.....	46
5.2 Modulation	.....	49
5.2.1 Principe de la modulation	.....	49
5.2.2 Intérêt de la modulation	.....	49
5.3 L'analyse spectrale	.....	50
6. Interprétation des résultats et mise au point des expériences	.....	53

1. Mesures des épaisseurs et des longueurs

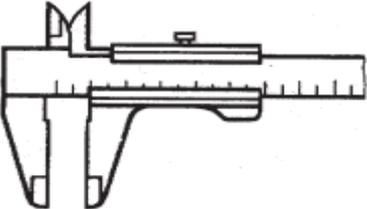
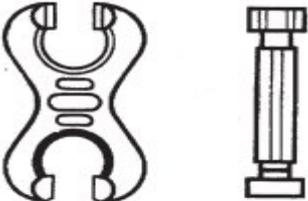
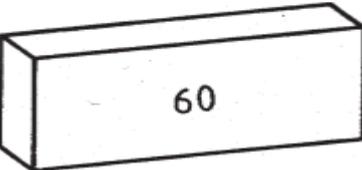
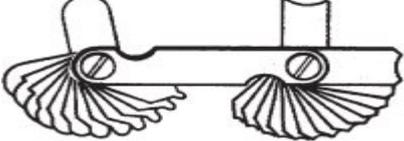
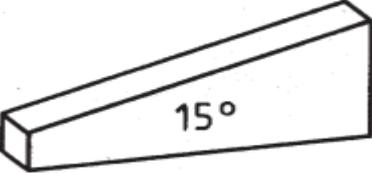
1.1 Principe des mesures de longueur.

Les moyens (instruments ou appareils) de mesure des épaisseurs et de longueurs sont divisés en trois groupes :

◆ **Les instruments de mesure** : sont divisés en instruments de mesure par comparaison et instruments de mesure directe (par affichage). Les instruments par comparaison produisent une représentation de la taille de la mesure, par exemple la distance entre deux traits (règle), la distance fixe entre deux surfaces (cales étalon) ou la position d'un angle entre deux surfaces (rapporteur). Les instruments par affichage disposent de repères mobiles, de cadrans gradués ou de compteurs (aiguilles, vernier). La valeur de la mesure peut immédiatement être lue.

◆ **Les jauges** : Les jauges représentent soit la cote, soit la cote et la forme demandées d'une pièce.

◆ **Les moyens auxiliaires** : représentent les supports d'instruments et les prismes.

Par comparaison	mesure directe	en jaugeant
 règle graduée	 pied à coulisse	 calibre mâchoire ou tampon
 cale étalon	 comparateur	 jauge à rayon (jauge de forme)
 15°		

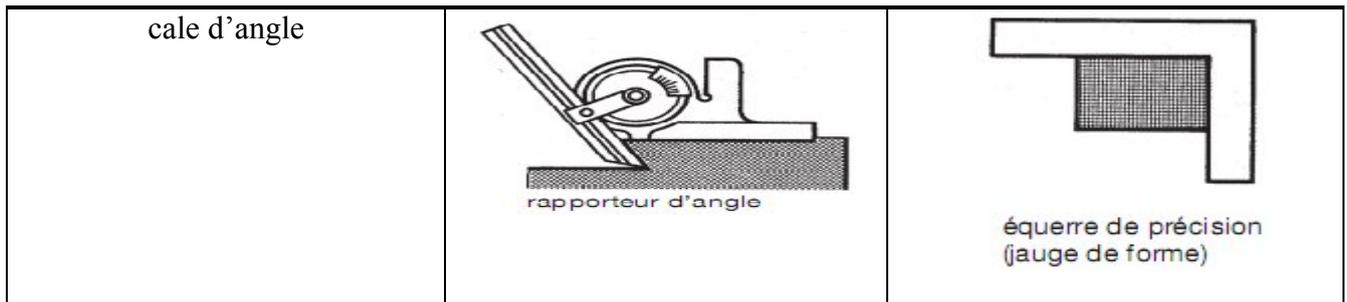


Tableau :1.1 Différents instruments de mesure utilisé

1.2 Appareils employé en élongation.

1.2.1 Le régle normal ou à talon.

Sa longueur varie entre 150 et 500 mm, le régle est gradué en millimètre sur une face et demi millimètre sur l'autre. Cet instrument rudimentaire de mesure, employé pour le traçage peu précis et l'élaboration d'ébauches qui permet en fait d'apprécier les dimensions d'une manière très facile en demi-millimètre.

1.2.2 Le pied à coulisse.

Sur une règle, graduée en millimètre, coulisse un curseur portant le vernier qui peut être gradué en dixième, vingtième ou cinquantième de millimètre et permet donc d'apprécier les fraction de millimètre.

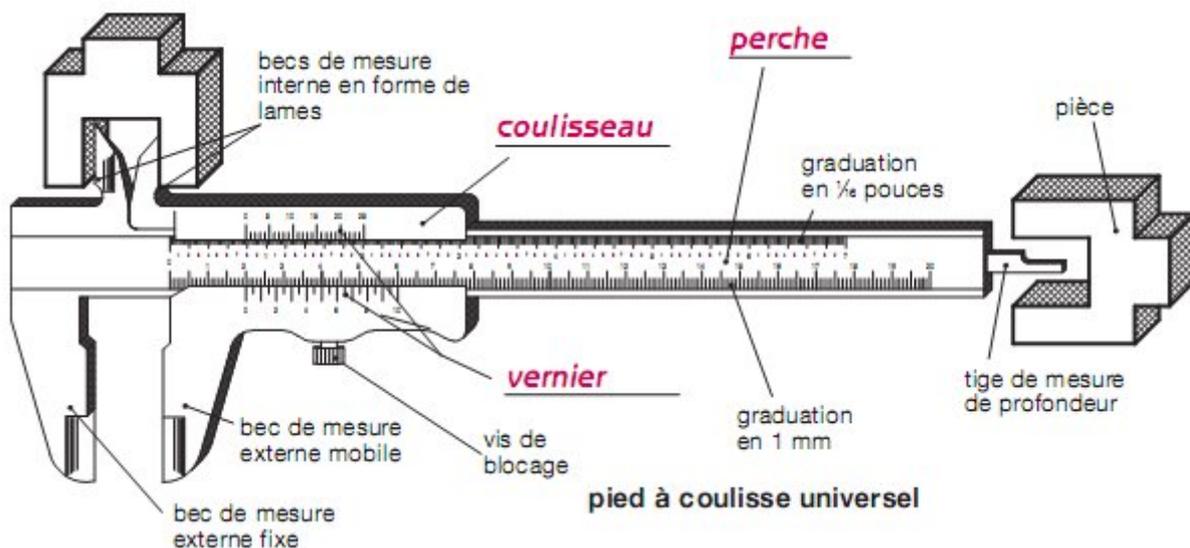


Figure : 1.1 Pied à coulisse

En fonction du nombre de graduations qui se trouvent sur le vernier, la précision de lecture du pied à coulisse est :

Nombres de graduation sur le vernier	10	20	50
Précision de lecture du pied à coulisse	1/10 de millimètre	1/20 de millimètre	1/50 de millimètre

1.2.2.1 Principe du vernier au dixième de millimètre

Sur le vernier au 1/10^{ème}, 9 mm sont partagé en 10 parties valant chacune 0,9 mm .

Sur la règle, chaque graduation vaut 1 mm.

Chaque écart d'une graduation entre la règle et le coulisseau vaut :

$$1\text{mm} - 0,9\text{mm} = 0,1\text{mm} \text{ soit } 1/10\text{ème}$$

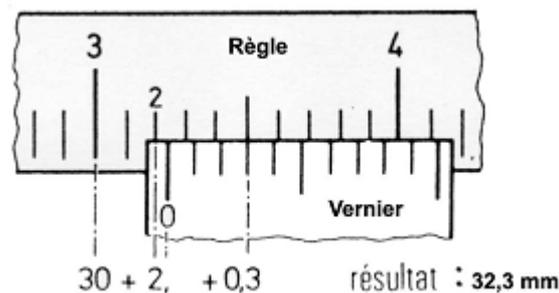


Figure : 1.2 Vernier 1/10

Si le 0 du vernier était juste en face de la graduation 2 de la règle, la lecture serait : 32 mm (exactement)

Dans le schéma de gauche, le 0 du vernier se trouve à droite du 2 de la règle ; la mesure est donc de plus de 32 mm.

Pour avoir la mesure exacte, il suffit de regarder quelle graduation du vernier se trouve exactement en face d'une graduation de la règle, ici, c'est la graduation 3.

La mesure exacte est donc de 32,3mm $30 + 2 + 0,3 = 32,3 \text{ mm}$

1.2.2.2 Pied à coulisse avec une précision de lecture au 1/20 de millimètre

Sur le vernier au 1/20^{ème}, ce sont 19 mm partagés en 20 parties et valant chacune 0,95 mm .

Sur la règle, chaque graduation vaut 1 mm.

Chaque écart d'une graduation entre la règle et le coulisseau vaut : $1\text{mm} - 0,95\text{mm}$ soit $0,05\text{ mm}$ soit $1/20^{\text{ème}}$.

1.2.2.3 Pied à coulisse avec une précision de lecture au 1/50 de millimètre

Sur le vernier au $1/50^{\text{ème}}$, ce sont 49 mm partagés en 50 parties et valant chacune $0,98\text{ mm}$.

Sur la règle, chaque graduation vaut 1 mm .

Chaque écart d'une graduation entre la règle et le coulisseau vaut : $1\text{mm} - 0,98\text{mm} = 0,02\text{ mm}$ soit $1/50^{\text{ème}}$

1.2.3 Le palmer ou micromètre.

1.2.3.1 Micromètre au centième

Sur un cylindre, gradué en millimètre et demi millimètre, l'avance est en tournant un tambour gradué de 50 divisions solidaires d'une touche.

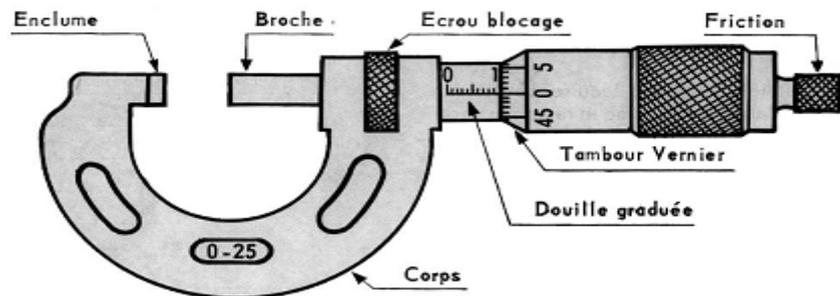


Figure 1.3: Palmer 1/100

L'avance du tambour s'effectue par un système vis et écrou au pas de $0,5\text{ mm}$, lorsque le tambour est divisé en 50 divisions égales, et lorsqu'il tourne d'un tour, la touche avance de $0,5\text{ mm}$, si il tourne de 1 division la touche avancera de :

$$0,5 / 50 = 0,01\text{ mm}$$

Pour lire une mesure d'une cote quelconque il faut suivre les étapes suivantes :

1. Lire le nombre de millimètre entiers sur la graduation supérieure du cylindre.
2. Lire s'il y a lieu, le demi-millimètre situé sur la graduation inférieure du cylindre.
3. Lire le nombre de centièmes sur le tambour gradué en regard avec la ligne index du cylindre.

N.B La course entre broche et enclume est limitée à 25 mm pour des raisons de précision de fabrication (micromètre de 0 à 25 mm , 25 à 50 mm , 50 à 75 mm , etc.).

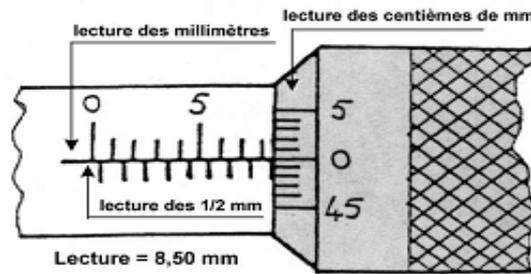
Exemple :

Figure 1.4: Exemple de mesure d'un Palmer 1/100

1. Compter le nombre de graduations qui indiquent les millimètres (ici 8 mm), lecture provisoire 8 mm
2. Regarder si après la graduation des millimètres, une graduation des $\frac{1}{2}$ millimètres apparaît ou non.
 - Cas 1 : **la graduation n'apparaît pas**, lire le nombre de centièmes affichés sur le vernier et les ajouter à la lecture des millimètres
 - Cas 2 : **la graduation est juste en face du tambour** vernier qui à lui même sa graduation « 0 » en face du trait horizontal (figure ci dessus), lire le nombre de mm et ajouter u $\frac{1}{2}$ mm soit 50/100 de mm, la lecture est donc de 8,50 mm.
 - Cas 3 : **La graduation des $\frac{1}{2}$ mm est visible** et les graduations du tambour indiquent une valeur positive en regard du trait horizontal de la douille graduée, lire le nombre de mm , ajouter 50/100 de mm de la graduation des $\frac{1}{2}$ mm et ajouter enfin le nombre de 100^{ème} de mm lus sur le tambour vernier par rapport à la barre horizontale de la douille graduée.

1.2.3.2 Micromètre au micron

A l'aide d'un vernier spécial, les micromètres permettent d'atteindre une précision de 1/1000 mm.

- A = graduation mm : 2 mm
- B = graduation 0.1 mm : 0.70 mm
- C = graduation 0.01 mm : 0.05 mm
- D = graduation 0.001mm : 0.000 mm
- Résultat de mesure : 2.750 mm

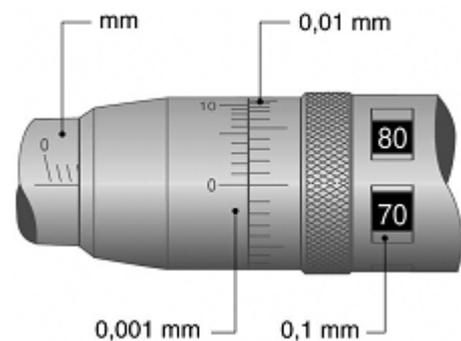


Figure 1.5 : Micromètre 1/1000

1.2 Les instruments pneumatiques (Tampons de mesure à soufflage direct)

Les systèmes pneumatiques de mesure sont très utilisés dans l'industrie mécanique pour le contrôle dimensionnel des pièces mécaniques en raison de leurs avantages (mesure sans contact, autonettoyage des pièces à contrôler, entretien facile, possibilité d'obtenir des amplifications élevées,

appareils robustes et fiables, etc.). Par mis ces systèmes les tampons de mesure à soufflage direct contrôlent les alésages débouchant ou non.

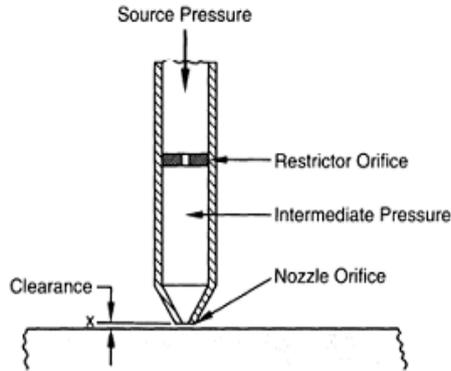


Figure 1.6 : Principe de mesure

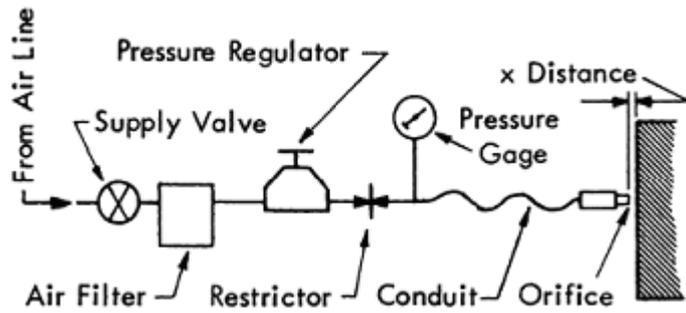


Figure 1.7 : jauge d'air à contre-pression

Avant de commencer le contrôle dimensionnel, on doit régler la pression à une côte de référence qui indique une valeur de zéro dans le manomètre, si la côte a mesuré est supérieur la pression doit être inférieure, et si la côte a mesuré est inférieure la pression doit être supérieur à la pression de référence (Figure 1.8)

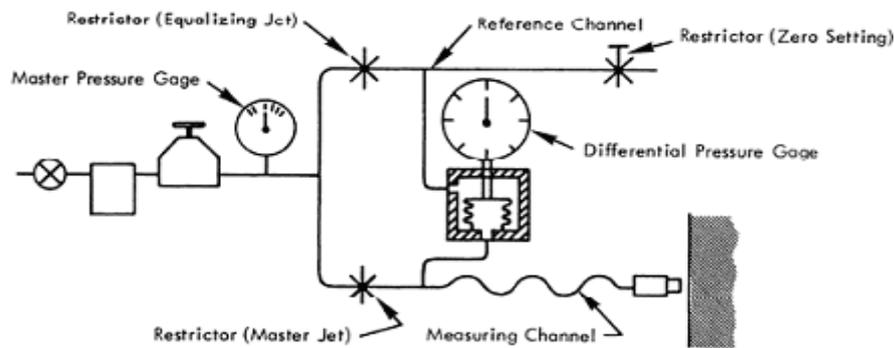


Figure 1.8 : Méthode de mesure

Pour les alésages La mesure est effectuée sans contact par deux buses de mesure diamétralement opposées, situées en retrait par rapport au cylindre extérieur du tampon pneumatique (Figure 1.9). Cette mesure peut être statique ou dynamique. Par rotation du tampon dans la pièce, on obtient l'ovalisation et par translation la conicité, le tampon de mesure peut être fabriqué avec trois buses pour la mesure de la triangulation. La gamme de mesure est de 3 mm à 150 mm. L'étendue de mesure va de 0,010 mm à 0,160 mm.

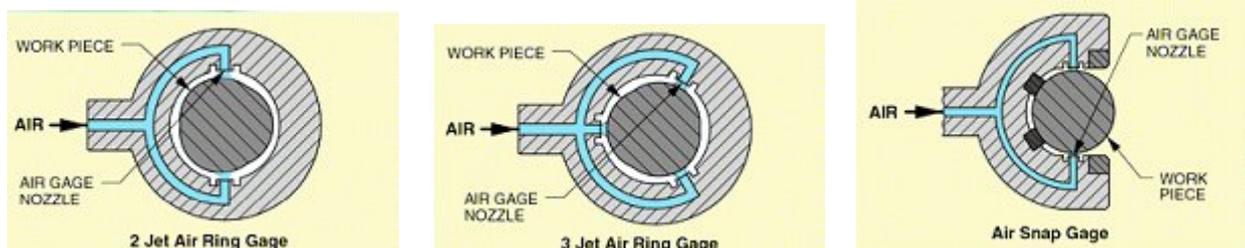


Figure 1.9 Différents types de buses

1.3 Les instruments optiques

1.3.1 Rappel de physique :

Les rayons lumineux issus d'une source lumineuse se propagent dans l'espace en ligne droite jusqu'à rencontrer un obstacle opaque ou transparent (miroir, prisme, lentille) qui en modifie la direction.

Le qualificatif "opto mécanique" s'applique à des appareils où sont associés des éléments optiques à des éléments mécaniques qui permettent et contrôlent les déplacements linéaires et angulaires.

1.3.1.1 Réflexion des rayons lumineux

Tout rayon incident R_i qui atteint un miroir plan suivant un angle β est réfléchi en R_r suivant un angle β_1 égale à β (figure 1.1). On dit alors que la différence de marche entre les rayons incident et réfléchi est égale à 2β . D'autre part un prisme est assimilable à un miroir. Ainsi le rayon incident qui frappe sa face optique est dévié de 90° (prisme à simple réflexion) cas de la figure 1.2. Quand le prisme est placé selon la figure 1.3, le rayon est réfléchi deux fois, puis ressort parallèle à lui-même (prisme à deux réflexions).

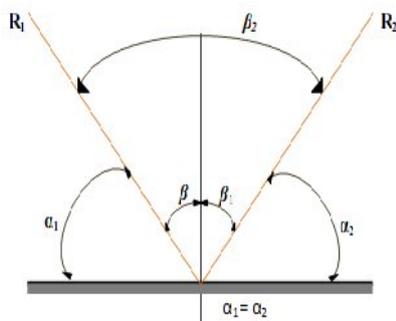


Fig. 3.1 Miroir plan

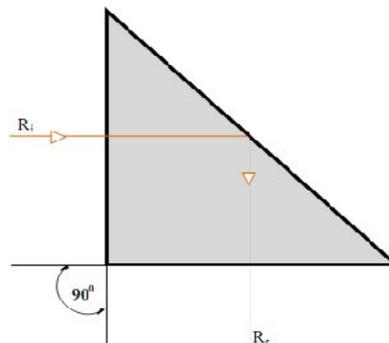


Fig. 3.2 Prisme à réflexion Simple

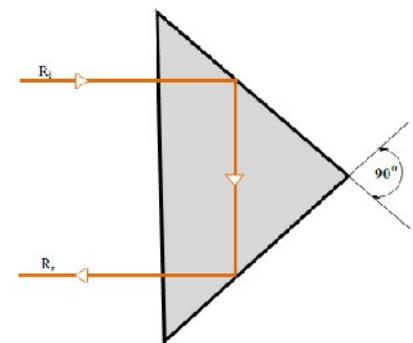


Fig. 3.3 Prisme à double réflexion

1.3.1.2 Réfraction des rayons lumineux

Tout rayon atteignant la surface d'un nouveau milieu transparent est dévié d'une quantité angulaire correspondant à l'indice de réfraction du corps traversé.

Le rayon entrant dans un prisme, puis en sortant (fig. 2.1) subit deux déviations successives d'égale valeur, dont le résultat global est double de l'angle formé entre le rayon incident et le plan bissecteur du prisme.

C'est ce même phénomène de réfraction qui fait apparaître brisée la règle droite plongée dans un bac rempli d'eau et semble rapprocher le fond de ce bac vers l'observateur (fig. 2.2).

Quand un rayon traverse une plaque de verre à faces parallèles « lame mince », la double déviation se traduit par un « déplacement » ; le rayon sortant est parallèle à celui d'entrée (fig. 2.3).

Les lentilles convergentes (fig. 2.4) sont comparables à des prismes « circulaires » tels que les rayons entrant parallèlement à leur « axe optique » convergent vers un point commun situé sur cet axe et appelé « foyer ». Il existe deux foyers extérieurs pour chaque lentille et tout rayon traversant une lentille en passant par son centre optique ne subit aucune déviation.

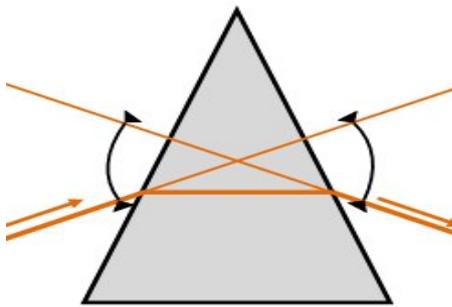


Fig. 3.3 Déviation par un prisme

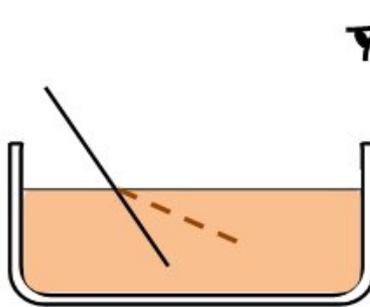


Fig. 3.5 Déviation par l'eau

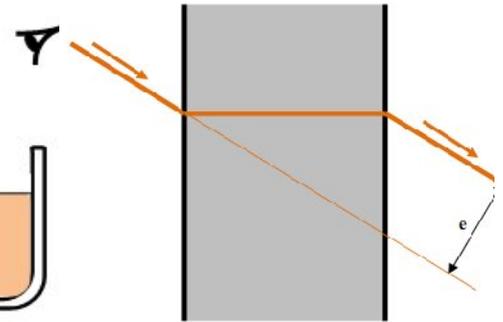


Fig. 3.6 Déviation par une lame mince

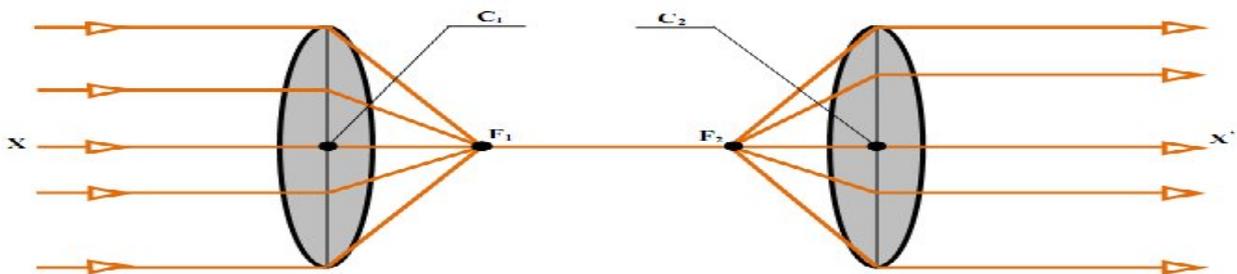


Fig. 3.7 Lentilles convergentes
 xx' : axe optique C_1, C_2 : Centres optique

1.3.1.3 L'amplification optique

Elle atteint une valeur comprise entre 2,5 x et 10 000x grâce à l'intervention exclusive ou combinée des moyens suivants :

- levier optique (miroir)
- substitution à la pièce à mesurer de sa propre image agrandie (lentille de projecteur ou microscope)
- utilisation des propriétés du spectre lumineux (interférences).

1.3.2 Réticules et micromètres

Ces dispositifs équipent les lunettes et microscopes. Ces sont des lames minces placées dans le plan de l'image formée par l'objectif.

Pour les mesures indirectes, on apprécie la position de l'image- objet par rapport à un index appelé réticule.

Le réticule simple (fig. 3.8) est formé par deux traits croisés dont l'intersection constitue le point de référence. Dans les appareils de mesure à règle graduée, le réticule (fig. 3.9), porte un double trait avec intervalle légèrement plus grand que l'épaisseur d'un trait-étalon et l'œil apprécie aisément l'égalité des faisceaux lumineux encadrant le trait-étalon : intervalle entre traits du réticule ≈ 1.5 fois l'épaisseur du trait étalon d'où la précision $\approx 1\mu$

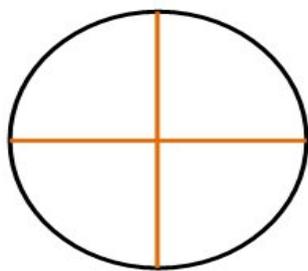


Fig. 3.8 Réticule Normal

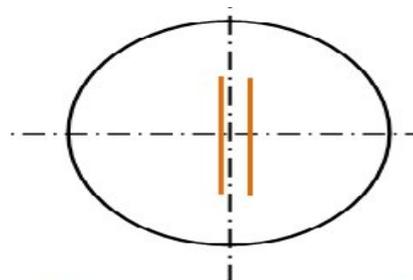


Fig. 3.9 Réticule pour appareil de mesure à traits

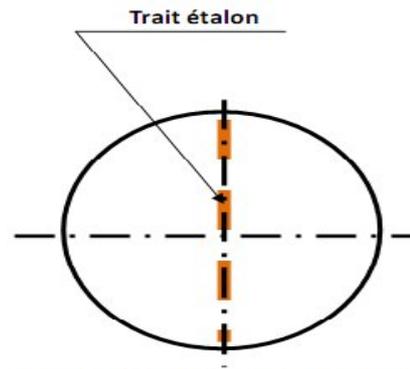


Fig. 3.10 Réticule pour appareil de mesure à traits

D'autres réticules pour le même usage portent un seul trait pointillé dans les parties vides duquel le trait-étalon se centre avec facilité fig. 3.10.

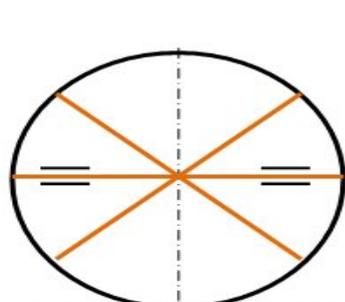


Fig. 3.11 Réticule pour mesure d'angle

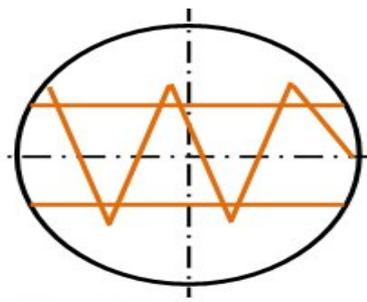
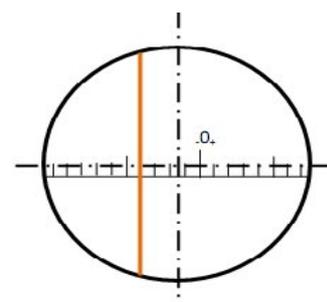


Fig. 3.12 Réticule pour mesure d'angle

Fig. 3.13 Micromètre de lecture on lit -2.5 μ

1.3.3 Principe de la projection

Le contrôle des petites pièces de forme complexe est favorisé par l'observation sur un écran tournant, divisé en degrés avec vernier, ce qui assure la lecture des angles à $5'$ près avec un agrandissement de (10x à 100x). Les pièces sont placées sur un support approprié : table plane en verre, vé, montage entre pointes, la projection lumineuse s'opère de deux façons différentes

➤ **Projection de profil** (projection diascopique)

L'éclairage se fait en arrière de la pièce à examiner et l'on obtient sur l'écran une silhouette sombre, limitée par le profil à contrôler, un condenseur, placé entre la lampe et la pièce, concentre sur celle-ci les rayons lumineux ; ceux qui ne sont pas arrêtés par la pièce traversent l'objectif agrandisseur, puis déviés par miroirs plans, vont éclairer l'écran, l'agrandissement est de 10x à 100x. La projection diascopique permet les mesures dimensionnelles des profils par comparaison avec des étalons (Fig.4.1).

- 1- Pièce ;
- 2- Projection sur l'écran ;
- 3 et 4 - Lampes ;
- 5- Condenseur ;
- 6- Objectif ;
- 7- Miroirs.

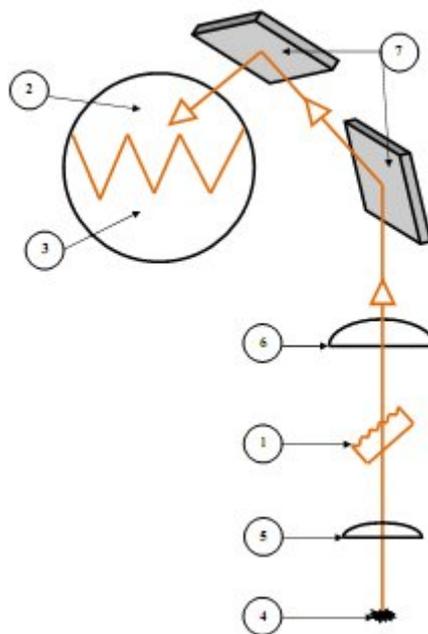


Figure 4.1 Principe de la projection de profil

➤ **Projection de surface** (projection épiscopique)

L'éclairage est concentré sur la surface à examiner et ce sont les détails de cette surface qui apparaissent à l'écran, surtout si le relief est net et très peu accentué. L'agrandissement épiscopique est limité à 20x. La projection s'applique à l'examen des détails, notamment des tracés, situés sur des surfaces (Fig. 4.2).

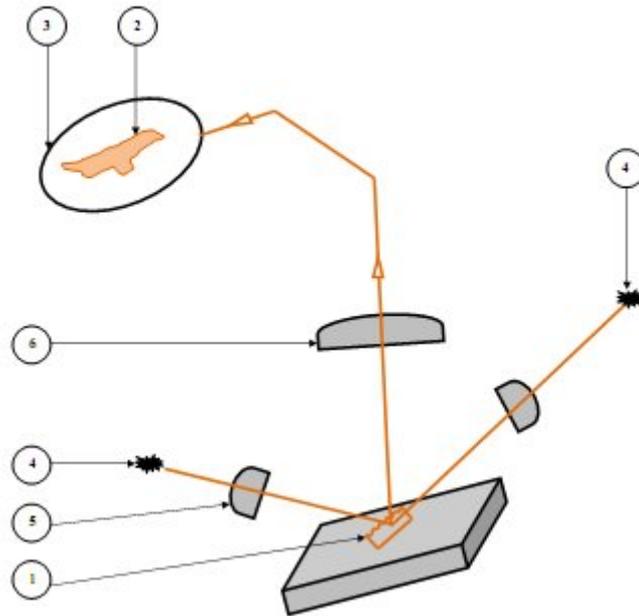


Figure 4.2 Principe de la projection de surface

1.4 L'appréciation des erreurs

L'erreur de mesure est donc la différence entre la valeur mesurée et la valeur exacte celle-ci étant inconnue, parmi ces erreurs on peut citer :

1.4.1 Les erreurs systématiques : Ce sont les erreurs provenant de l'appareil de mesure, du processus de mesure ou de l'opérateur, qui sont répétitives et constantes. C'est une erreur qui prend la même valeur (inconnue) lors de chaque mesure.

Par exemple:

- ◆ Une erreur de conception ou de fabrication de l'appareil de mesure.
- ◆ Défaut de calibrage, de zéro, d'étalonnage de l'appareil de mesure.
- ◆ Des conditions d'utilisation de l'appareil non conformes aux spécifications de l'appareil.
- ◆ Erreur de parallaxe dans la lecture d'une indication.

1.4.2 Les erreurs aléatoires liées aux conditions opératoires.

C'est une erreur qui prend une valeur différente lors de chaque mesure, valeur qu'il faudra essayer d'estimer.

1.4.3 Erreur de Justesse : Aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications égales à la valeur vraie de la grandeur mesurée dans des conditions données.

$$J = M - \bar{M}$$

avec

$$\bar{M} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} M_i$$

1.4.4 Erreur de fidélité : La fidélité est l'aptitude d'un instrument de mesure à donner pour une même valeur de la grandeur mesurée et dans des conditions identiques, des valeurs très voisines. Elle représente la dispersion des mesures M_i d'une même grandeur et elle est caractérisée par son écart-type estimé :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^{i=n} (M_i - \bar{M})^2}$$

L'erreur de fidélité est égale à 6 fois la valeur de l'écart type :

$$F = 6 \times \sigma$$

1.4.5 Erreur de Répétabilité : Ecart observé lors de mesurages successifs d'une même grandeur dans des conditions identiques (même opérateur, même lieu, mesures effectuées successivement dans une courte période de temps, même méthode).

1.4.6 Reproductibilité : Ecart observé lors de mesurages successifs d'une même grandeur en faisant varier les conditions (changement d'opérateur, de lieu, de temps, de méthode).

2. Mesures de température

La température est une grandeur intensive, qui peut être mesurée de deux façons différentes :

- 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, pour constituer le thermomètre étalon on utilise de préférence l'échelle Celsius, définie à partir de l'échelle Kelvin par :

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15 \quad (2.1)$$

Kelvin : défini à partir du point triple de l'eau, qui vaut 273,16 K

« Le kelvin est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau »

0 K est le zéro absolu (aucune agitation thermique)

Celsius : $T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15$, le zéro absolu vaut donc $-273,15^{\circ}\text{C}$

Fahrenheit : L'échelle fahrenheit attribue une plage de 180°F entre la température de solidification de l'eau et sa température d'ébullition (solidification de l'eau à 32°F et point d'ébullition à 212°F).

Ainsi :

$$T^{\circ}\text{F} = 9/5 T^{\circ}\text{C} + 32 \text{ ou } T^{\circ}\text{C} = 5/9(T^{\circ}\text{F} - 32) \quad (2.2)$$

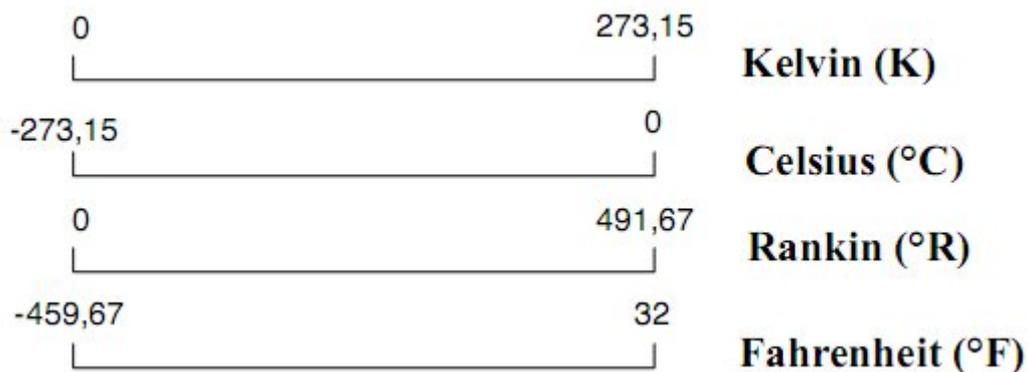


Figure 2.1 : Echelles de température

2.1 Thermocouples, thermistances, détecteurs infrarouges, pyromètres

2.1.1 Thermocouples

Les phénomènes thermo électriques dans les chaînes de conducteurs métalliques ou semi-conducteurs décrivent les conversions d'énergie qui s'opèrent en leur sein par effet de Seebeck ,

entre énergie d'agitation thermique et énergie électrique des charges en mouvement. A la jonction de deux conducteurs 1 et 2 différents. Avec une différence de température $T_2 \neq T_1$ une différence de tension apparaitre (Fig. 2).

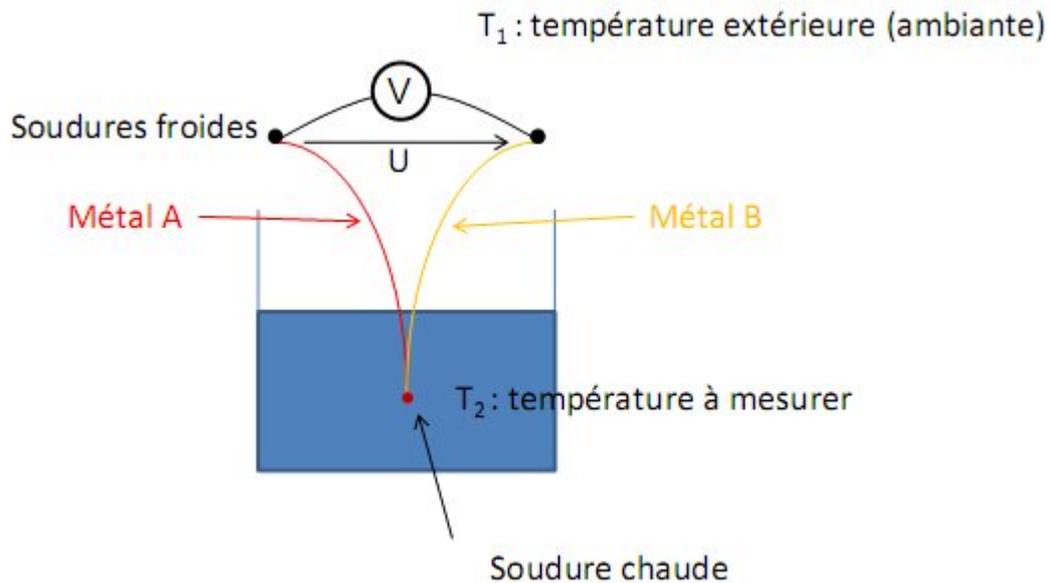


Figure 2.2 : Effet de Seebeck

On peut établir une relation bijective entre la résistance R et la température θ et ainsi mesurer θ en mesurant R . Cette relation est de la forme :

$$R = R_0(1 + a\theta + b\theta^2 + c\theta^3) \quad (2.2)$$

avec θ la température en $^{\circ}\text{C}$, R_0 la résistance à 0°C , a , b et c des coefficients positifs, spécifiques au métal, c 'est le platine qui est le matériaux le plus utilisé. La sonde Pt100 est une sonde platine qui a une résistance de 100Ω pour une température de 0°C . ($138,5 \Omega$ pour 100°C)

La relation devienne $R=R_0(1+ aT)$ avec $a = 3.85 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (petites variations de $T > 0^{\circ}\text{C}$, variation quasi linéaire entre -200 et 800°C)

Métal	Résistivité à 0°C en $\mu\Omega$	Point de fusion en $^{\circ}\text{C}$	Domaine d'emploi en $^{\circ}\text{C}$	$\frac{R(100^{\circ}\text{C})}{R(0^{\circ}\text{C})}$
Cuivre	7	1 083	-190 à 250	1,427
Nickel	6,38	1 453	-60 à 180	1,672
Platine	9,81	1 769	-250 à 1100	1,392

Tableau 1.1 : métaux utilisés

2.1.2 Thermomètres à thermistance

Une thermistance est un agglomérat d'oxydes métalliques frittés, c'est-à-dire rendus compacts par haute pression exercée à température élevée, de l'ordre de 150 bars et 1000°C .

La composition d'une thermistance est :

- ◆ Fe_2O_3 (oxyde ferrique) ;
- ◆ MgAl_2O_4 (aluminat de magnésium) ;
- ◆ Zn_2TiO_4 (titane de zinc).

La résistance électrique d'une thermistance est très sensible à l'action de la température. Il existe deux types de thermistance, les CTN à coefficient de température négatif, et les CTP à coefficient de température positif. La loi de variation est de la forme :

$$R = a \times \exp \frac{b}{\theta} \quad (2.3)$$

avec a et b coefficient du métal.

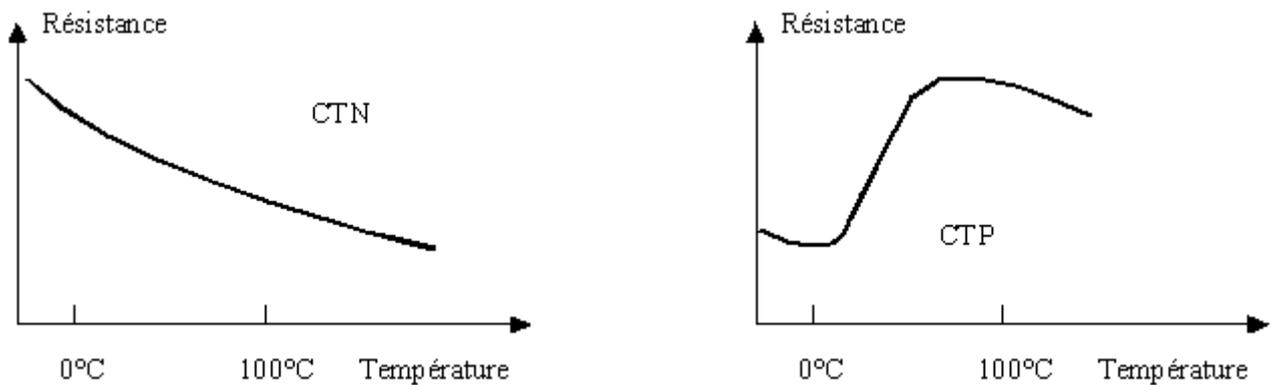


Figure 2.3 : Variation de la résistance en fonction de la température

Suivant les deux courbes ont distingué deux types de thermistance :

- ◆ Les CTN (Coefficient de Température Négatif, en anglais NTC, *Negative Temperature Coefficient*) sont des thermistances dont la résistance diminue de façon uniforme avec la température.
- ◆ Les CTP (Coefficient de Température Positif, en anglais PTC, *Positive Temperature Coefficient*) sont des thermistances dont la résistance augmente fortement avec la température dans une plage de température limitée (typiquement entre 0 °C et 100 °C), mais diminue en dehors de cette zone.

2.1.3 Détecteurs infrarouges

Chaque corps dont la température est supérieure au point zéro absolu de $-273,15^\circ\text{C}$ ($= 0$ Kelvin) émet en sa surface un rayonnement électromagnétique proportionnel à sa propre température appelé rayonnement propre. Une partie de ce rayonnement est un rayonnement infrarouge pouvant être utilisé pour la mesure thermique. Ce rayonnement traverse l'atmosphère et est focalisé à l'aide d'une lentille (optique d'entrée) sur un élément de détection qui génère un signal électrique proportionnel au rayonnement. Le signal est amplifié et transformé via traitement numérique subséquent en une grandeur de sortie proportionnelle à la température de l'objet. La valeur de mesure peut faire l'objet

d'un affichage sur écran ou être émise sous forme de signal analogique permettant un simple raccordement aux systèmes de régulation de la commande de processus (Fig. 2.3).

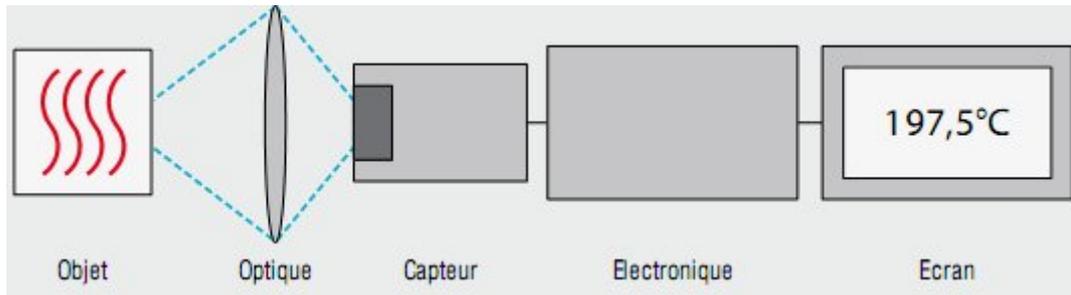


Figure 2.4 : Système infrarouge

Le rayonnement infrarouge émis par l'objet à mesurer est focalisé sur un élément de détection infrarouge à l'aide d'une optique d'entrée. L'élément de détection génère un signal électrique correspondant pouvant ensuite être amplifié et traité. A l'aide d'un traitement numérique des signaux, le signal en question est transformé en une grandeur d'émission proportionnelle à la température de l'objet, puis affiché sur un écran ou émis sous forme de signal analogique. Pour compenser les influences de la température ambiante, il est fait appel à un second détecteur qui mesure la température de l'appareil de mesure ou de son canal optique. Le calcul de la température de l'objet à mesurer s'effectue donc en trois étapes :

1. Transformation du rayonnement infrarouge reçu en signal électrique
2. Compensation du rayonnement de fond de l'appareil et de l'objet
3. Linéarisation et émission de la température.

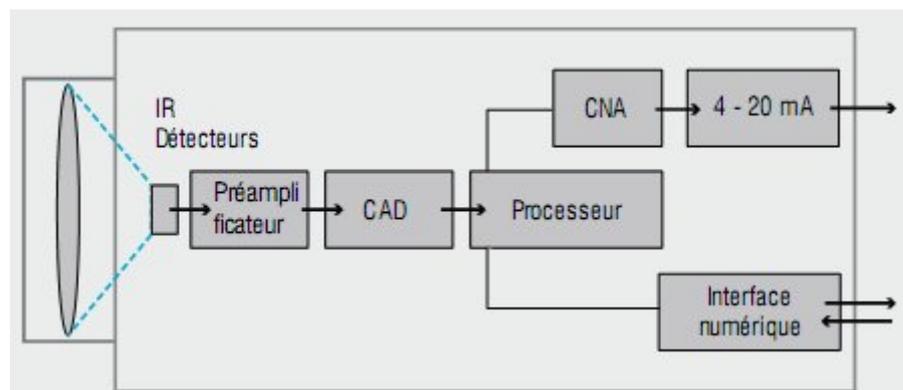


Figure 2.5 : Schéma fonctionnel d'un thermomètre infrarouge

Outre l'affichage de la température sur écran, il existe comme grandeurs de sortie des sorties standardisées sous forme de 0/4-20 mA, 0-10 V linéaires ainsi que des signaux d'éléments thermiques qui permettent un simple raccordement à des systèmes de régulation de la commande de processus. Par ailleurs, la plupart des thermomètres infrarouges utilisés à ce jour disposent, en raison du traitement numérique des valeurs de mesure en interne, également d'interfaces numériques (USB,

RS232, RS485, Ethernet, Profibus) pour l'émission des données et pour l'accès aux paramètres des appareils.

2.1.4 Pyromètre

Il existe plusieurs sortes de pyromètres. On peut distinguer :

- ◆ Les pyromètres monochromatiques
- ◆ Les pyromètres bis chromatiques
- ◆ Les pyromètres mesureurs d'énergie

2.1.4.1 Le pyromètre optique à disparition de filament

Le principe de fonctionnement du pyromètre à disparition de filament est de comparer l'émittance monochromatique à celle d'un corps de référence étalonné. C'est un pyromètre monochromatique, dont la référence est un filament de tungstène qui a une longueur d'onde $\lambda=0.65 \text{ [}\mu\text{m]}$ (Fig.2.5).

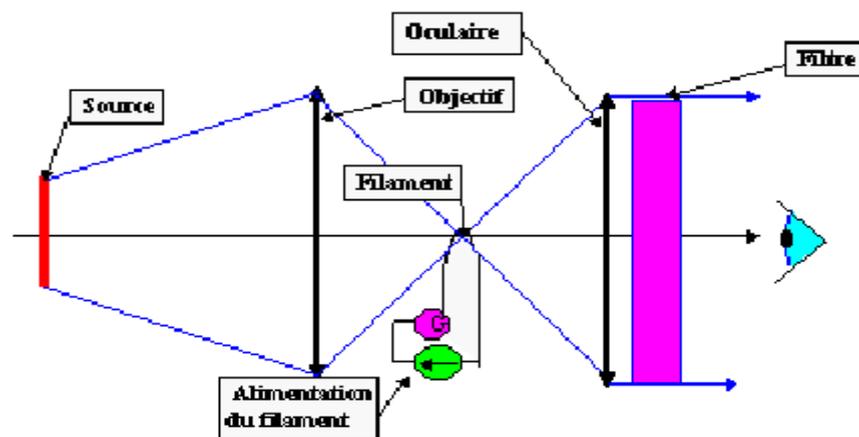


Figure 2.6 : Schéma optique pyromètre optique à filament

Le principe du mode opératoire est de régler le courant parcourant le filament pour que ce dernier se superpose à l'image de la source. Dès que nous aurons superposé les deux éléments et connaissant le comportement du filament, il sera possible de déduire la température de la source (Fig. 2.6).

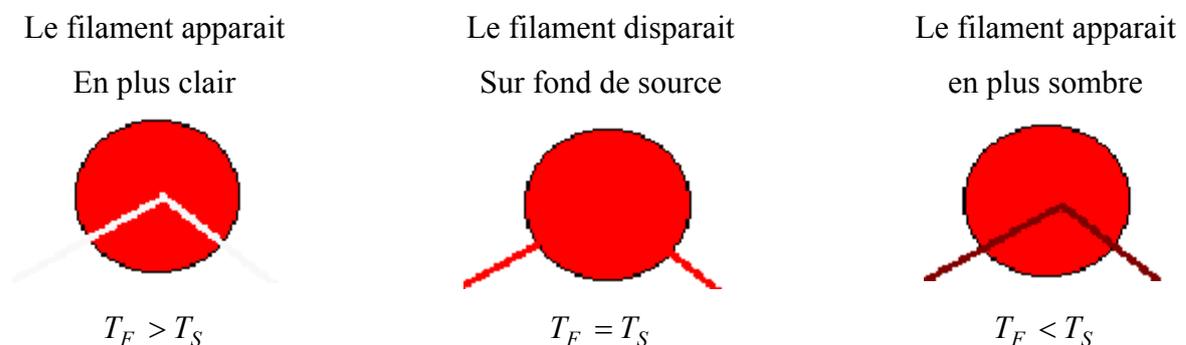


Figure 2.7 : Réglage de la température du filament

2.1.4.2 Pyromètres à radiation totale

Le principe de ce pyromètre est de comparer l'émittance du corps à étudier avec l'émittance d'un corps noir étalonné préalablement. Pour cela, le pyromètre va capter une fraction connue de puissance qu'il va diriger sur un élément photosensible. Celui-ci va dès lors s'échauffer. La différence de température entre cet élément et la température ambiante va être mesurée par des thermocouples. L'étalonnage préalable permettra de relier cette valeur à un corps noir. De là il sera possible de connaître la température du corps observé (Fig. 2.7).

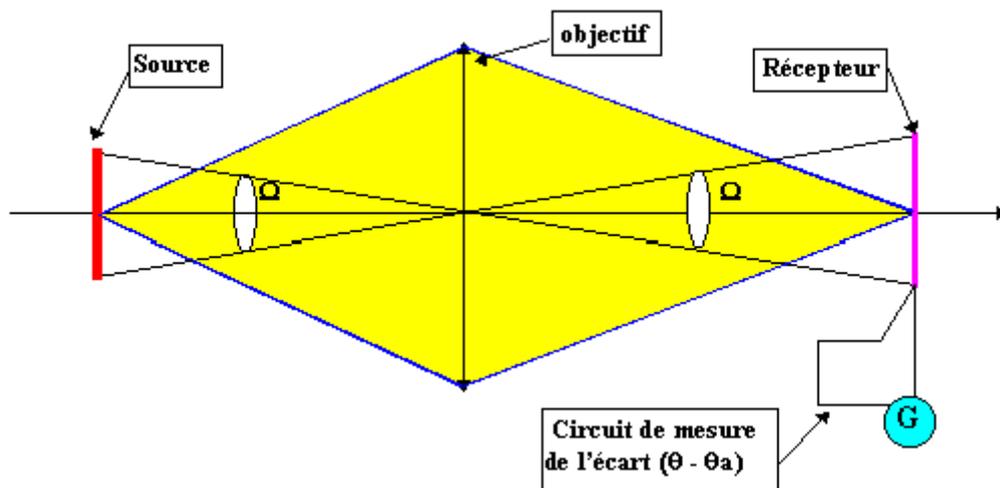


Figure 2.8 : Schéma optique pyromètre à radiation totale

2.1.4.3 Pyromètres bi chromatiques

Ce pyromètre peut être considéré comme un doublet de pyromètres monochromatiques travaillant dans deux plages voisines du rayonnement thermique. Le rapport des deux signaux ne dépendra plus de l'émissivité. Ceci est le grand intérêt de ce type de pyromètre.

2.1.4.4 Pyromètres mesureurs d'énergie

Ce pyromètre travaille avec l'ensemble du spectre de rayonnement thermique de la cible qui est reçu par un détecteur à large bande, de types thermiques. En pratique le pyromètre devra être étalonné à l'aide d'un thermocouple.

2.2 L'étalonnage des capteurs thermiques

La caractéristique statique est la courbe qui représente la réponse statique en fonction du mesurande, on l'appelle aussi courbe d'étalonnage.

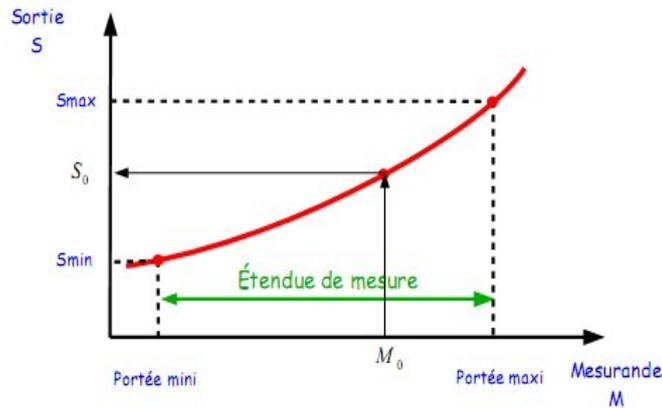


Figure2. 9 : Courbe d'étalonnage.

Elle peut être définie par un tableau représentatif de points discrets de mesure.

°C	+ 0	+ 1	+ 2	+ 3	+ 4	+ 5	+ 6	+ 7	+ 8	+ 9
0	100	100,39	100,78	101,17	101,56	101,94	102,33	102,72	103,11	103,59
+ 10	103,89	104,28	104,67	105,06	105,45	105,84	106,23	106,62	107,01	107,40
+ 20	107,79	108,18	108,57	108,95	109,34	109,73	110,12	110,51	110,89	111,28
+ 30	111,67	112,06	112,44	112,83	113,22	113,60	113,99	114,38	114,77	115,15
+ 40	115,54	115,93	116,31	116,70	117,08	117,47	117,86	118,24	118,63	119,01
+ 50	119,40	119,78	120,16	120,55	120,93	121,32	121,70	122,09	122,47	122,86
+ 60	123,24	123,62	124,00	124,39	124,77	125,15	125,54	125,92	126,30	126,69
+ 70	127,07	127,45	127,83	128,22	128,60	128,98	129,36	129,74	130,13	130,51

Tableau d'étalonnage (Pt100)

le tableau s'emploie dans le sens direct (température->signal) à un °C près , et dans le sens inverse (signal->température) il est possible d'affiner la conversion réciproque par interpolation linéaire.

Pour étalonner un tel instrument de mesure de température, on doit corriger sa courbe qui représente un palier de mesure aux valeurs lues par rapport à une chaîne étalon à l'aide d'une droite d'ajustement.

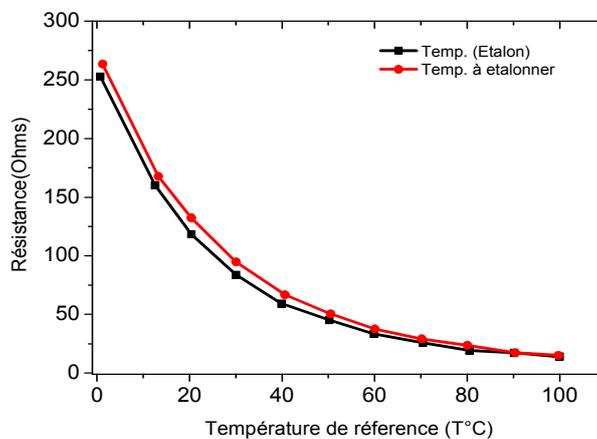


Figure 2.10 Courbe d'étalonnage d'une thermistance.

Suivant les résultats obtenus, on peut calculer l'erreur du thermocouple qui est égale à :

$$Erreur = \frac{(T_{\text{étalon}} - T_{\text{thermocouple}})}{T_{\text{étalon}}} \times 100 \quad (2.4)$$

2.3 Les erreurs liées aux capteurs thermiques. Le choix des capteurs.

2.3.1 Les erreurs

2.3.1.1 Incertitude de mesure

Le résultat d'une série de mesures est la valeur moyenne des écarts systématiques connus (qui apparaissent à chaque mesure), par rapport à un intervalle dans lequel se trouve la valeur de la grandeur de mesure. La différence entre la limite supérieure de cet intervalle et la valeur moyenne, ou bien la différence entre la valeur moyenne et la limite inférieure de cet intervalle.

2.3.1.2 Ecarts de mesure systématiques

Les incertitudes de mesure systématiques existent lorsque dans les mêmes conditions de mesure se répète, Les écarts de mesure systématiques sont prévisibles et peuvent être corrigées.

2.3.1.3 Ecart de mesure statistique

Il s'agit d'écarts de mesure aléatoires que l'on ne peut pas corriger, avec plusieurs mesures dans les mêmes conditions, on peut déterminer les écarts de mesure aléatoires d'une distribution de Gauss autour de la valeur moyenne. Avec une probabilité de 95,4% (écart de type double $K=2$) les mesures se trouvent à l'intérieur de l'écart type de la distribution de Gauss.

2.3.1.4 Erreur de dissipation de chaleur de la sonde de température

En général, la température à mesurer est inférieure ou supérieure à la température ambiante, Le gradient de température à l'intérieur du thermomètre donne naissance à un flux de chaleur qui provoque un refroidissement ou un échauffement du capteur et également un affichage incorrect. La majeure partie de la chaleur est amenée ou dissipée par les conducteurs de raccordement. L'erreur d'affichage provoquée par le flux de chaleur indésirable est l'erreur de dissipation de chaleur.

L'erreur de dissipation de chaleur dépend considérablement des propriétés de construction du thermomètre et de sa longueur utile dans le milieu de mesure. En général, si la longueur utile est inférieure à 80 mm, il faut s'attendre à une erreur de dissipation de chaleur.

2.3.2 Le choix des capteurs.

Le choix d'un capteur est liée à plusieurs paramètres la plage de mesure et le domaine d'utilisation (milieu acide, corrosif, des foures) parmi :

- ◆ Capteurs de température compacts pour application industrielles.
- ◆ Capteurs de température compacts pour application aseptiques.
- ◆ Capteurs de température, concept modulaire pour applications industrielles et aseptiques.
- ◆ Capteurs de température infrarouge pour des objets chauds.

2. 4 L'acquisition automatique des mesures et les cartes d'acquisition.

2. 4.1 L'acquisition automatique des mesures

La chaîne d'acquisition de données est l'ensemble des éléments nécessaires à la "capture" des données (analogiques ou numériques) à leur transmission jusqu'au récepteur et à l'utilisateur (homme ou machine) des données capturées. Cet utilisateur peut vouloir utiliser ces données immédiatement ou les stocker pour les utiliser ultérieurement.

Elle est constituée par un capteur qui sert à capturer les données (physiques ou pas) et à les transformer pour qu'elles soient utilisables par le "maillon" suivant de la chaîne. Puis les transmet à un conditionneur qui a comme objectif du conditionnement de signal est essentiellement l'amplification et le pré filtrage de signaux électriques issus d'un capteur. Ces signaux issus du conditionneur peuvent être convertis (analogique-numérique), transmis ou traités.

2. 4.2 Les cartes d'acquisition

C'est un circuit imprimé qui contient des composantes électroniques, et suivant la programmation des ces dernières avoir une application qui a pour objectif de réaliser un système qui gère des entrées analogiques, des entrées numériques et des sorties à travers des relais via un PC selon un schéma bien définis, par exemple une carte d'acquisition et d'interface communicante avec un PC à travers une liaison série, dont l'élément principal est un Pic 16F877 capable d'acquérir huit entrées analogiques et huit entrées numériques, ainsi que la génération des signaux de commande de huit relais. Cette carte polyvalente est capable de gérer divers application.

L'alimentation du montage est assurée par (5V-12V). La communication de cette carte avec le PC se fait à travers une liaison série (DB9), est relié au microcontrôleur par ses broches 2 et 3 (RX, TX) via un circuit MAX232 dont le rôle est l'adaptation des signaux TTL/CMOS.

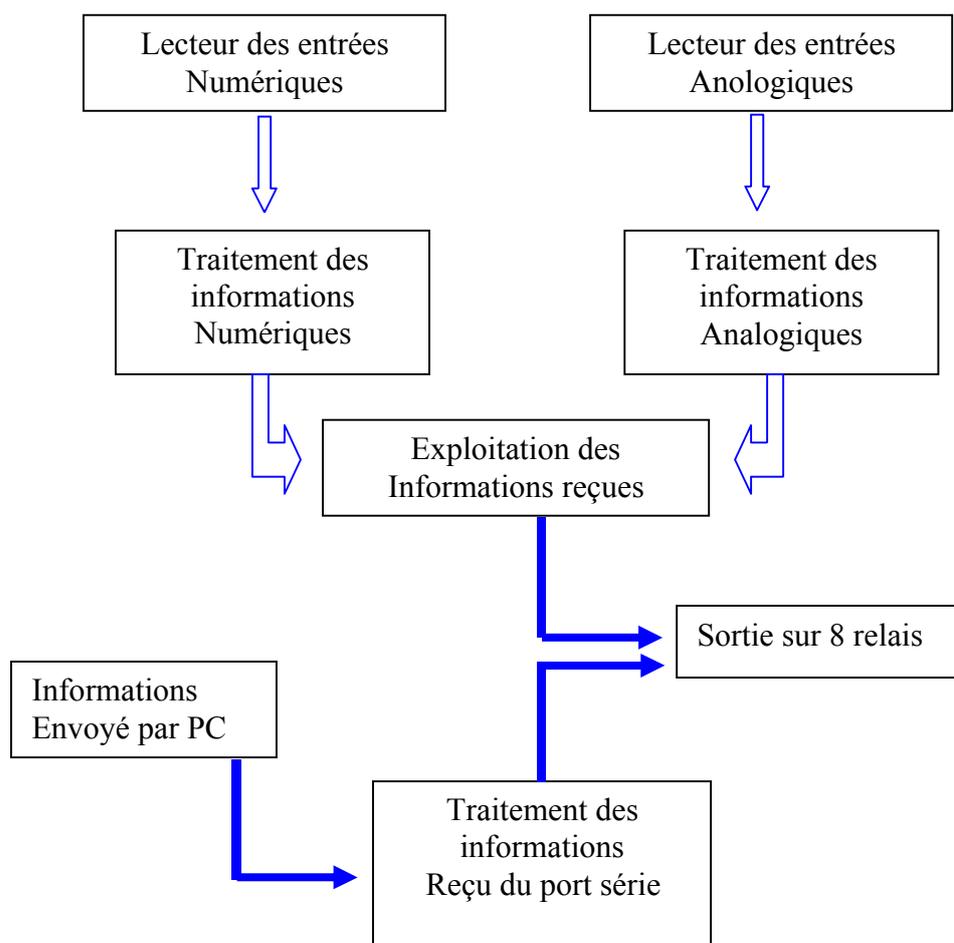


Figure 2.11 : Principe de fonctionnement de la carte

3. Mesures des débits, des vitesses et des pressions

Le transport des fluides industriels dans les conduites et les mesures de leurs débit sont nécessaires pour la plus part des opérations de la production et de la commercialisation.

Comme les fluides industriels sont corrosifs ou érosives, leur nature peut être modifiée en causant des variations dans la composition ou dans les paramètres de ces derniers (la température, la pression ou la vitesse).

Le débit est la quantité de matière ou de fluide, liquide ou gazeux, qui s'écoule par unité de temps.

En pratique on distingue deux débits :

- ◆ Débit massique Q_m qui s'exprime en kg/s
- ◆ Débit volumique Q_v qui s'exprime en m³/s

Si ρ est la masse volumique du fluide (kg/ m³) on a la relation liant le débit-masse au débit volume :

$$Q_m = \rho \cdot Q_v \quad (3 - 1)$$

Les appareils mesurant le débit s'appellent débitmètres. Les appareils mesurant le volume de fluide (quelle que soit la durée) ou la masse écoulée s'appellent des compteurs.

Les débitmètres sont classés suivant des principes très divers, certains sont des appareils de laboratoire (à fil chaud, à laser, à effet Doppler) assurent les mesures de petit débit.

La figure (3.1) présente la répartition des différents types de débitmètres dans l'industrie.

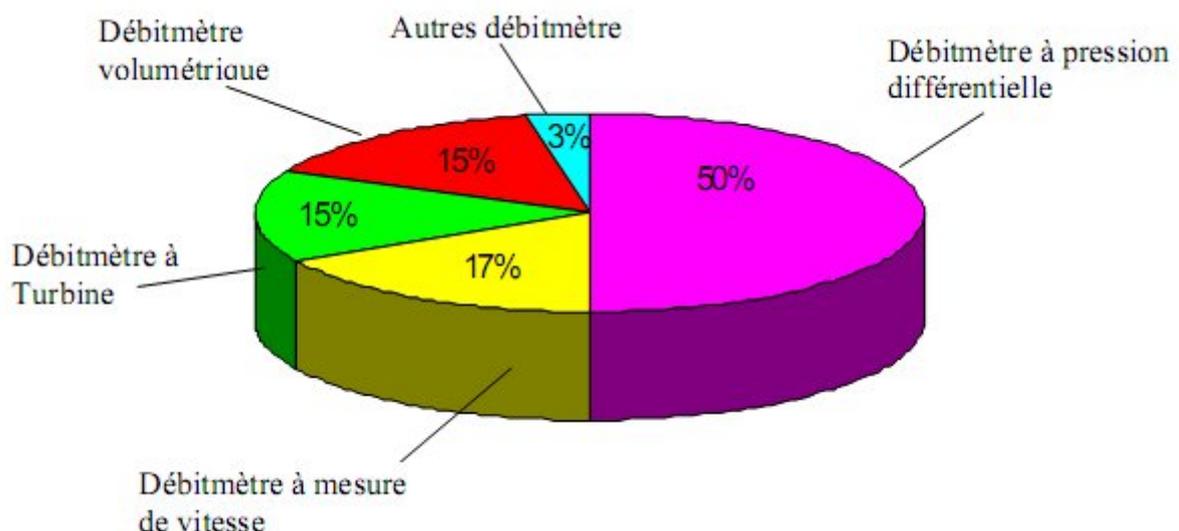


Fig. 3.1 : Répartition des débitmètres dans l'industrie (Baker 1988)

3.1 Les principaux débitmètres :

Déterminer le débit c'est mesurer le volume ou la quantité de matière qui traverse une surface donnée par unité de temps (la section de la conduite par exemple). C'est une notion très importante dont dépendent beaucoup de paramètres hydraulique.

Parmi les méthodes de mesures de débit :

- ◆ La méthode du venturi ;
- ◆ La méthode du diaphragme ;
- ◆ La chronométrage direct pour un volume déterminé.

3.1.1 Le Venturi :

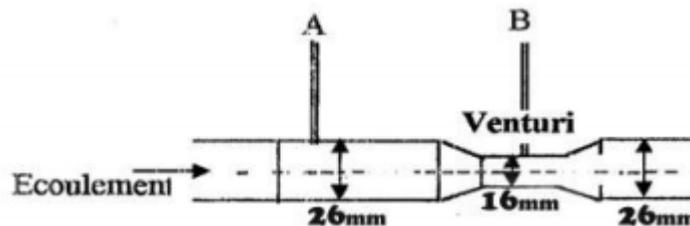


Figure 3.2 : Tube de Venturi

Le tube de venturi est constitué d'un convergent suivi d'un divergent (Fig.3.2), il est caractérisé par une faible perte de charge et ne nécessite pas de longueur droite. Il est tout particulièrement adapté aux fluides chargés. Le venturi peut être réalisé en acier ou en alliages divers. Or l'expression du débit massique est donnée par la formule :

$$Q = \rho \times S_B \times V_B \quad (3.2)$$

Par cette méthode on déterminera le débit indirectement en calculant la vitesse du fluide au point B, sachant la différence de pression qu'il y a entre les points A et B sans tenir compte des pertes de charge :

$$V_B = \sqrt{\frac{2g}{\rho g} \frac{(P_A - P_B)}{1 - \left(\frac{S_B}{S_A}\right)^2}} \quad (3.3)$$

sachant que :

$$\frac{P_A - P_B}{\rho g} = x = h_A - h_b \quad (3.4)$$

A vrai dire les pertes de charge font en sorte que la valeur réelle $V_{B'}$ est plus faible que la valeur V_B calculé théoriquement mais cela n'empêche que les 2 vitesses restent proportionnelles par un coefficient K_v Tel que :

$$V_{B'} = K_v \cdot V_B \tag{3.5}$$

(K_v coefficient de perte de charge)

3.1.2 Diaphragme (débitmètre à pression différentielle)

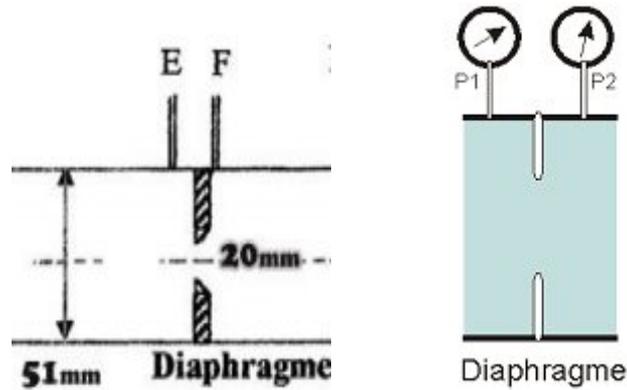


Figure 3.3 : Géométrie du diaphragme

Un resserrement de la conduite crée entre amont et aval une différence de pression Dp (Fig. 3.3) liée au débit par une relation de la forme :

$$V_F = \sqrt{\frac{2g}{\rho g} \frac{(P_E - P_F)}{1 - \left(\frac{S_F}{S_E}\right)^2}} \tag{3.4}$$

La prise en compte des pertes de charge est là aussi matérialisée par la multiplication par un coefficient K_D (Q_D , Q_T respectivement débits réelle et théorique)

$$K_D = Q_D / Q_T \tag{3.5}$$

3.1.3 Mesure de débit par un flotteur

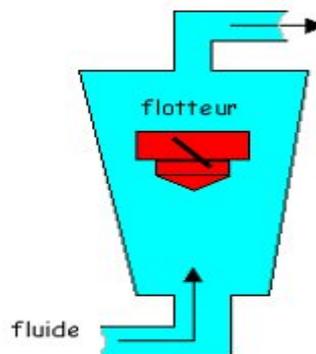


Figure 3.4 : Géométrie d'un flotteur

Le flotteur est équilibré sous l'action (Fig.3.4) :

- ◆ De la force de poussée d'Archimède
- ◆ De la traînée
- ◆ De son poids

$$\rho g V + C_x \frac{\rho S U^2}{2} = \rho_0 g V \quad (3.6)$$

V : volume du flotteur de masse volumique ρ .

U : vitesse du fluide de masse volumique ρ

C_x : coefficient de traînée et S la surface projetée sur un plan perpendiculaire à la vitesse (πr^2)

On déduit la vitesse du fluide à la position d'équilibre à partir de l'équation précédente, le diamètre du conduit varie linéairement avec la hauteur z : $D=D_0+az$

D'où le débit est :

$$Q = \sqrt{\pi} a z \sqrt{\frac{2gV}{C_x} \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)} \quad (3.7)$$

3.1.4 Le débitmètre à ultrasons

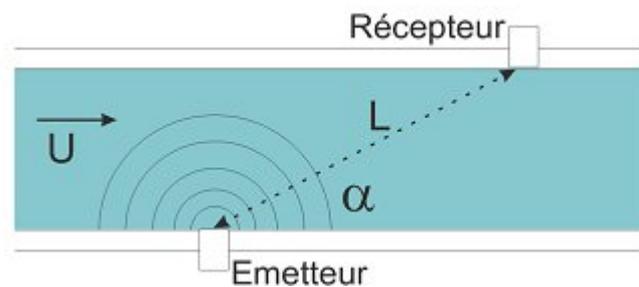


Figure 3.5 : Principe du débitmètre à ultrasons

On mesure le temps de propagation d'une onde ultrasonore dans le fluide entre émetteur et récepteur (éléments piézoélectriques) (Fig. 3.5).

Pour fluide sans particule (pour éviter la dispersion des ondes), généralement utilisé pour les diamètres importants (jusque 6m) pour une gamme de débits : 0,1 à 10^5 m³/h avec une précision de 1% environ.

$$t = \frac{L}{c + U \cos \alpha} \quad (3.8)$$

C : vitesse du son dans le fluide.

3.2 Le choix et les erreurs liées à chaque type

Les critères de choix sont très nombreux, le tableau ci dessous donne une liste des principaux éléments à considérer.

<i>Caractéristiques du fluide</i>	Nature du fluide (liquide chargé, conducteur...) Viscosité Régime d'écoulement Température Pression Agressivité Compressibilité
<i>Critères métrologiques</i>	Nature du signal de sortie (0-10 V, 4-20 mA...) Dynamique * Précision Etendue de mesure Bande passante **
<i>Caractéristiques de l'installation</i>	Diamètre de canalisation Perte de charge engendrée Encombrement Etalonnage Usure

Tableau 3.1

* Plage du débit de fonctionnement d'un appareil sur laquelle il conserve la précision de mesure annoncée (exemple : si $Q_{\min} = 1 \text{ m}^3/\text{h}$, avec une dynamique 1-4 alors $Q_{\max} = 4 \text{ m}^3/\text{h}$)

** Bande passante = plage de fréquence pour laquelle l'atténuation de la courbe de réponse en fréquence est inférieure à 3 dB de la valeur maximale.

Une première sélection peut avoir lieu en se basant sur les critères fondamentaux, c'est à dire :

- nature du fluide transporté
- type de signal de mesure
- plage de mesure
- diamètre de la canalisation

3.3 Les tubes de Pitot, Präsil et Prandtl

Un tube de Pitot-statique ou tube de Prandtl (ou antenne de Prandtl) est constitué de deux tubes coudés concentriques dont les orifices, en communication avec le fluide dont on veut mesurer la vitesse, sont disposés de façon particulière :

Il s'agit d'un dispositif extrêmement simple qui permet une mesure de la vitesse d'écoulement d'un fluide. L'objet présente une forme profilée, est creux afin d'être rempli du fluide dans lequel il est immergé, et doit être muni de deux prises de pression (tubes manométriques). Comme le montre le schéma de la figure 3.6, l'un des deux tubes manométriques est relié au front d'attaque de l'objet (point d'arrêt caractérisé par une vitesse d'écoulement nulle), alors que l'autre est en prise avec le fluide statique remplissant l'objet.

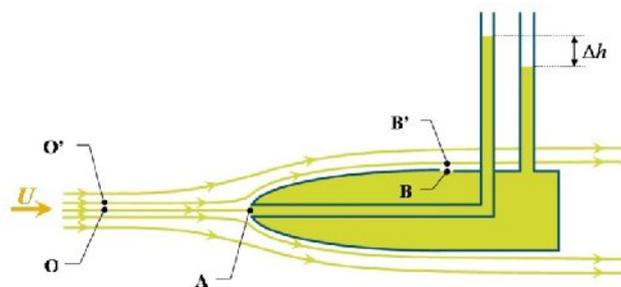


Figure 3.6 : Tube de Pitot

En supposant que le fluide est non visqueux, incompressible et que l'écoulement est stationnaire et uniforme en amont de l'objet, on va pouvoir identifier un certain nombre de lignes de courant et y appliquer l'équation de *Bernoulli*. On supposera par ailleurs que toutes ces lignes de courant sont approximativement à la même altitude.

Le long de la ligne de courant passant par le point d'arrêt A et le point O, on a :

$$p_0 + \rho g z_0 + \frac{1}{2} \rho V_0^2 = p_A + \rho g z_A + \frac{1}{2} \rho V_A^2 \quad (3.9)$$

avec $z_0 \approx z_A$, $V_0 = U$ et $V_A = 0$

Par conséquent, on obtient la pression de stagnation : $p_A = p_0 + \frac{1}{2} \rho U^2$, où p_0 et U sont respectivement la pression et la vitesse de l'écoulement uniforme (écoulement amont, non perturbé par la présence de l'objet sonde). Par application de la loi de l'hydrostatique, cette pression de stagnation est liée au niveau affiché dans le premier tube manométrique.

Le long de la ligne de courant passant par les points O' et B', on a :

$$p_{O'} + \rho g z_{O'} + \frac{1}{2} \rho V_{O'}^2 = p_{B'} + \rho g z_{B'} + \frac{1}{2} \rho V_{B'}^2 \quad (3.10)$$

avec $z_{O'} \approx z_{B'}$

Les points O et O' étant infiniment proches, on peut considérer que $p_{O'} \approx p_O$ et $v_{O'} \approx v_O = U$; d'autre part, le point B' est situé dans une zone où l'écoulement redevient uniforme (les lignes de courant redeviennent rectilignes et parallèles) : il s'ensuit que $v_{B'} \approx U$, et l'équation de Bernoulli se résume à : $p_{B'} \approx p_{O'} \approx p_O$.

Le point B est situé au niveau de l'orifice permettant au dispositif d'être rempli par le fluide. En conséquence, la pression en B est la même que celle qui règne de manière uniforme à l'intérieur et qui est mesurée par le second tube manométrique. Par ailleurs, puisqu'à l'aplomb du point B, les lignes de courant sont rectilignes et parallèles, la loi de l'hydrostatique s'applique pour donner :

$$p_{B'} + \rho g z_{B'} = p_B + \rho g z_B \quad (3.11)$$

Avec $z_{B'} \approx z_B$, ce qui conduit simplement à $p_{B'} \approx p_B$.

Pour résumer, on vient de montrer que $p_B \approx p_O$ et $p_A = p_O + \frac{1}{2} \rho U^2$. Or, la différence de niveau Δh lue grâce aux deux tubes manométriques permet d'évaluer la différence de pression entre les points A et B :

$$\left. \begin{array}{l} p_A - p_B = \rho g \Delta h \\ p_A - p_B = \frac{1}{2} \rho U^2 \end{array} \right\} \Rightarrow U = \sqrt{2g \Delta h} \quad (3.12)$$

Il en résulte que ce dispositif permet une mesure quasi directe de la vitesse d'écoulement uniforme.

3.4 Les anémomètres à fils chauds et films chauds, anémomètres laser Doppler, PIV

3.4.1 Les anémomètres à fils chauds et films chauds

L'anémométrie à fil chaud est une technique classique de mesure de la vitesse d'un fluide en un point, faiblement intrusive, de mise en œuvre relativement légère et assez bon marché.

Son point fort est son excellente résolution spatiale et temporelle, qui en fait la technique de choix pour l'étude des fluctuations turbulentes. Ses points faibles sont sa fragilité et (dans la configuration la plus simple), la limitation de la mesure à une seule composante de la vitesse en un seul point de mesure.

Les anémomètres à fils chauds usuels sont constitués d'un fin fil d'environ 1 mm de long, de 1 à 10 μm de diamètre, tendu entre deux broches (figure 1.1). Les mesures sont effectuées le plus souvent dans des souffleries (écoulement d'air de l'ordre de 0,1 m/s à plusieurs centaines de m/s), mais aussi dans des veines d'essai hydrauliques (écoulement d'eau de l'ordre de 0,01 m/s à quelques m/s).

Divers compromis entre résistivité, conductivité thermique et robustesse mécanique conduisent à privilégier pour le fil des matériaux comme le tungstène, le platine ou certains alliages. L'anémométrie à fil chaud est une technique classique de mesure de la vitesse d'un fluide en un point, faiblement intrusive, de mise en œuvre relativement légère et assez bon marché.

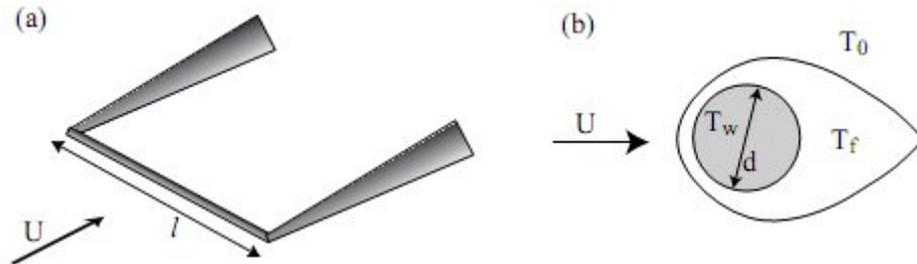


Figure 3.7 fils chauds

(a) : Fil monté sur ses broches, perpendiculaire à la vitesse.

(b) : Allure de la couche limite thermique autour du fil ; $T_f = (T_w + T_0)/2$ est la température du film fluide chaud.

On considère un fil de longueur l et de diamètre d (fig. 1.2), tel que le rapport d'aspect l/d soit très grand (typiquement $l/d \cong 200$). On fait circuler dans ce fil de résistance R_w (w pour wire) un courant d'intensité I . En notant E l'énergie stockée sous forme de chaleur dans le fil, on peut écrire le bilan de puissance :

$$\frac{dE}{dt} = \dot{W} - \dot{Q} \quad (3.13)$$

Où $\dot{W} = R_w I^2 > 0$ est la puissance apportée par effet Joule et $\dot{Q} > 0$ la chaleur transférée depuis le fil vers l'extérieur (Fig. 3.7). Le fil sera ainsi porté à une température T_w , supérieure (d'environ 100°C) à la température du fluide environnant T_0 (supposée constante).

Plusieurs effets contribuent à la dissipation de cette chaleur :

- ◆ **Conduction vers le fluide**, due à la diffusion moléculaire de la chaleur dans le fluide.
- ◆ **Convection vers le fluide**, où la chaleur est transportée par le mouvement du fluide environnant
- ◆ **Conduction vers les supports**, due à la diffusion de la chaleur le long du fil, $\approx k_w(T_w - T_0)$, où k_w est la conductivité thermique du fil.
- ◆ **Rayonnement thermique** : puissance transférée sous forme de rayonnement électromagnétique (c'est le principe de fonctionnement d'une ampoule électrique), qui peut s'écrire $\approx \sigma A(T_w^4 - T_0^4)$, où $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ est la constante de Stefan.

Nous négligerons dans un premier temps la conduction vers les supports, en prenant un rapport d'aspect $l/d \gg 1$ l/d . Nous admettrons également dans toute la suite que la puissance rayonnée est négligeable.

3.4.2 Anémomètres Laser Doppler

L'Anémométrie Laser Doppler est une technique de mesure d'écoulements gazeux. Elle est analogue à la technique de mesure de déplacements transverses d'une surface solide. Le gaz étant transparent, il faut l'ensemencer de petites particules de dimensions micrométriques ou submicrométrique qui sont entraînées par le gaz et qui donc la même vitesse que celui-ci. Les particules se comportent comme des cibles diffusant la lumière. L'instrument de mesure de vitesse ne doit pas faire obstacle à l'écoulement gazeux, il n'y a donc pas d'autre solution que de disposer les faisceaux de sonde au voisinage de la direction perpendiculaire à l'écoulement (fig. 3.8).

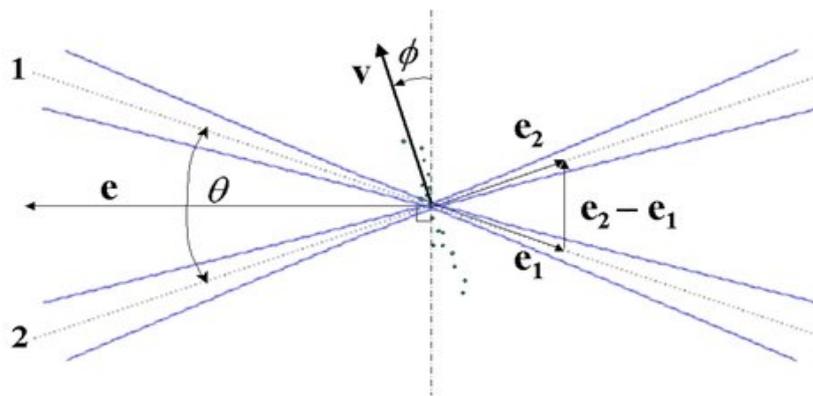


Figure 3.8 : Configuration des faisceaux utilisés en anémométrie Laser Doppler (ALD)

La configuration des faisceaux de sonde est la même que celle permettant des mesures de vitesses transverses. Les deux faisceaux sont focalisés dans une petite zone cible appelée volume de mesure (fig. 3.9).

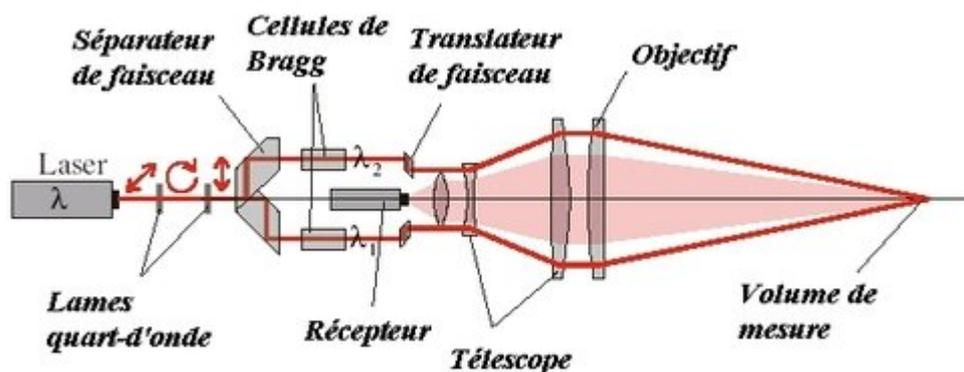


Figure 3.9 : Configuration générale d'un anémomètre laser Doppler

Le volume de mesure coïncide avec la zone de diamètre minimum des faisceaux laser.

Un faisceau laser a un profil transverse d'intensité de type gaussien :

$$I(r) = I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right) \quad (3.14)$$

où r est la distance d'un point à l'axe du faisceau et w est le rayon gaussien du faisceau, définie comme le rayon du cercle où l'éclairement est $1/e^2 \approx 0,135$ de la valeur au centre $r=0$. La valeur minimale du rayon de faisceau au foyer est le rayon de ceinture : $w_0 = (\lambda f)/(\pi w)$, où f est la distance focale de l'objectif et w est le rayon de faisceau avant l'objectif.

Les particules qui traversent le volume de mesure diffusent la lumière dans toutes les directions avec une intensité non uniforme. La lumière est observée dans la direction du vecteur unitaire e .

Avant diffusion les faisceaux ont respectivement les fréquences $\nu_1 = \nu_0 + \nu_{b1}$ et $\nu_2 = \nu_0 + \nu_{b2}$, où ν_{b1} et ν_{b2} sont les fréquences de Bragg et ν_0 est la fréquence du laser. Le faisceau diffusé 1 ayant subi le décalage Doppler $\delta\nu_{D1}$ a une fréquence $\nu_1 = \nu_0 + \delta\nu_{D1}$; il interfère avec le faisceau diffusé 2 qui a subi un décalage Doppler $\delta\nu_{D2}$ de fréquence $\nu_2 = \nu_0 + \delta\nu_{D2}$. Le signal d'interférence a une fréquence instantanée égale à la différence des deux fréquences:

$$\nu_1 - \nu_2 = (\nu_{b1} - \nu_{b2}) + (\delta\nu_{D1} - \delta\nu_{D2}) \quad (3.15)$$

Les décalages Doppler sur les faisceaux 1 et 2 sont respectivement : $\delta\nu_{D1} = V(e - e_1)/\lambda$ et $\delta\nu_{D2} = V(e - e_2)/\lambda$, où e_1 et e_2 sont les vecteurs unitaires des deux faisceaux incidents sur le volume de mesure. La différence des deux décalages Doppler est $\delta\nu_D = \delta\nu_{D1} - \delta\nu_{D2} = V(e_2 - e_1)/\lambda$.

Le signal d'interférence est un signal modulé en fréquence : $f_I = \nu_b + V(e_2 - e_1)/\lambda$ avec une fréquence porteuse $\nu_b = \nu_{b1} - \nu_{b2}$. La démodulation du signal permet d'accéder au terme $\delta\nu_D = V(e_2 - e_1)/\lambda$ qui dépend de l'angle ϕ entre la vitesse et le vecteur $e_2 - e_1$ et de l'angle θ entre les directions des deux vecteurs unitaires e_1 et e_2 . D'après la figure 9, on a :

$$\delta\nu_D = 2V \cos(\phi) \sin(\theta/2) / \lambda \quad (3.16)$$

Le principe de mesurage qui est employé dans l'Anémométrie Laser Doppler peut être transposé pour mesurer des vitesses d'écoulements de liquides. La technique de mesure analogue à l'ALD dans les liquides s'appelle la Vélocimétrie Laser Doppler (VLD). Le liquide doit entraîner de petites particules diffusant la lumière. C'est ainsi que la vitesse de l'écoulement sanguin peut être mesuré grâce à la diffusion de composants en suspension dans le sang, comme les globules et les plaquettes.

3.4.3 Vélocimétrie par Images de Particules (PIV)

Pour l'enregistrement des clichés ou d'une séquence de PIV, l'écoulement estensemencé par des micro-particules servant d'indicateurs. Dans le souci d'avoir des particules entraînées par le mouvement global à accélération non nulle, il faut garantir que leur vitesse s'approche le plus possible de celle du fluide. Le choix sera également conditionné par la faculté qu'a la particule à rediffuser (diffusion de Mie) la lumière du plan laser vers le plan de prise de vue (Fig. 3.10).

Il est aussi intéressant de noter qu'on utilise d'autres types de traceurs pour les gaz qui tiennent compte des spécificités de cette catégorie de fluides ainsi, pour l'air, on utilise généralement des fumées froides (générateurs de fumée à l'eau glycolée), de l'eau pulvérisée en micro-gouttelettes, ou des particules solides microniques.

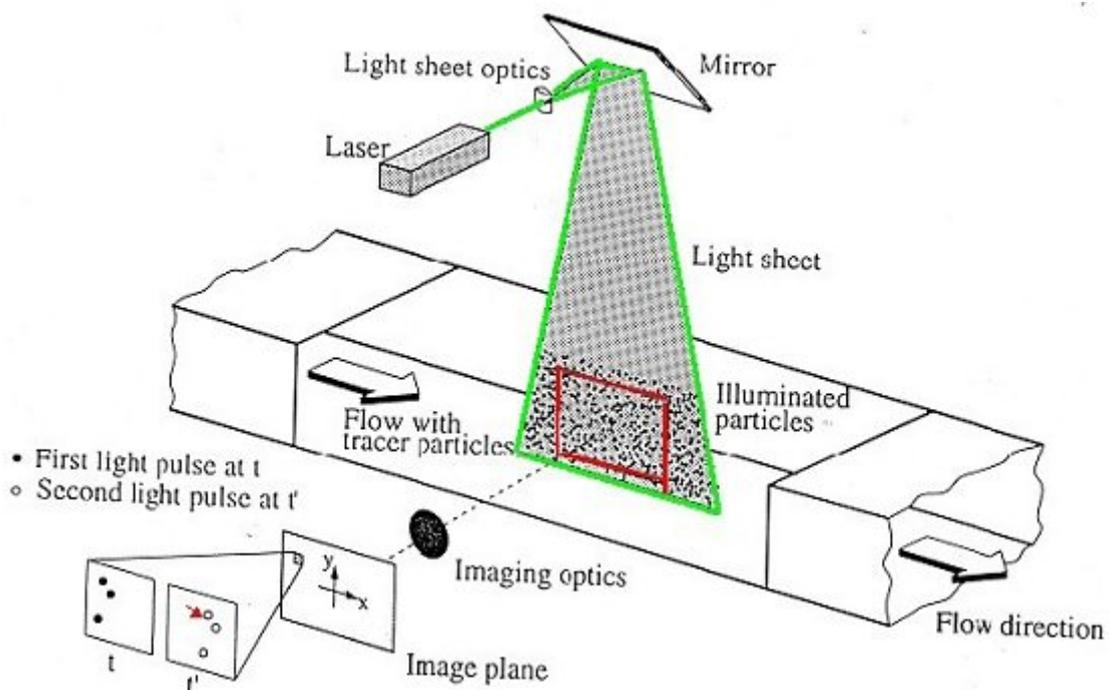


Figure 3.10 : Principe général de la méthode

Une source Laser pulsée génère sur un même axe optique deux impulsions lumineuses décalées dans le temps d'un intervalle Δt programmable et qui sera l'intervalle de capture de paires d'images soit par un appareil photo, soit par une caméra. La connaissance de ce temps d'émission et la possibilité du contrôle qu'on exerce dessus sont considérées comme un avantage de la méthode. En effet, de ce temps dépend la fréquence de la prise de vues de la caméra ou du capteur (Fig. 3.11).

Les impulsions émises par le Laser traversent un dispositif optique. C'est une lentille cylindrique qui diverge le faisceau réalisant un plan de lumière. Les particules présentes dans ce plan sont donc éclairées périodiquement et celles qui ont servi à l'ensemencement diffusent la lumière reçue, on peut choisir une zone du plan de lumière qu'on appelle fenêtre d'analyse qui va être surveillée par la

lentille du système de prise de vue. Régulièrement captée (à des intervalles de temps correspondant à la fréquence de la caméra CCD ou du capteur), cette zone est ainsi projetée sur un support d'enregistrement, en principe numérique, pour pouvoir traiter ces informations et dresser les différentes cartes sus-indiquées.

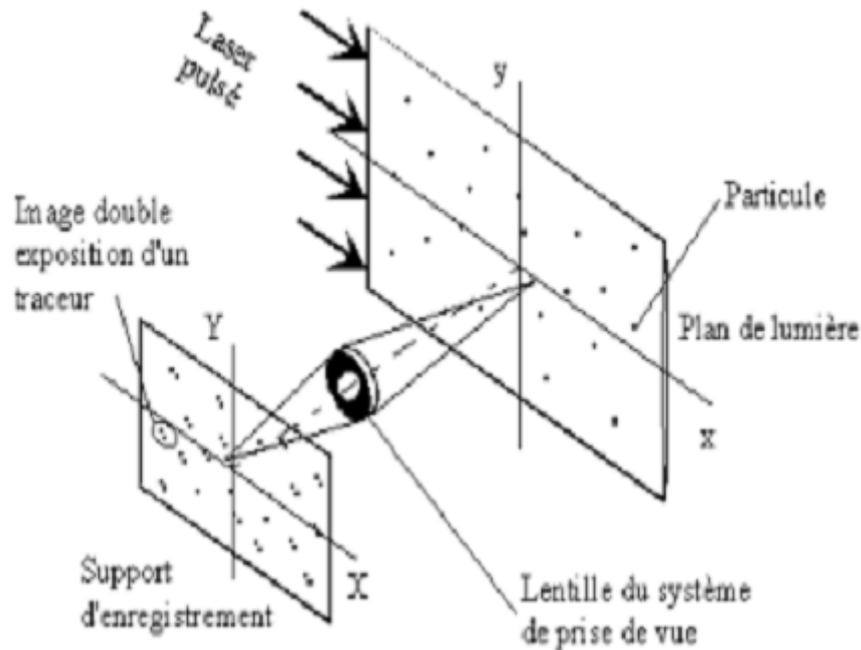


Figure 3.11 : Eclairage du fluide par une source Laser et capture de clichés

3.5 Mesures de pression : Capteurs mécaniques, capteurs piezo-électriques

Un corps liquide ou gazeux enfermé dans un récipient, qu'il remplit entièrement, exerce sur toutes les parois de celui-ci une force dite de pression. La pression est une grandeur dérivée

$$P = \frac{F_N}{S_{m^2}}$$

du système international. Elle est définie comme le quotient d'une force par une surface.

Ce quotient est indépendant de l'orientation de la surface. La pression s'exerce perpendiculairement à la surface considérée.

La relation $p = dF/ds$ définit, à la fois, la pression et l'unité de pression en tant qu'unité dérivée. Cette unité, le pascal (Pa), correspond dans le Système International (S.I.) à une pression uniforme exerçant sur une surface de un mètre carré, une force totale de un newton. La pression d'un pascal

étant relativement faible on utilise de préférence pour la mesure des pressions dans l'industrie son multiple le bar valant 10^5 pascals.

	pascal (Pa)	bar (b)	atmosphère
(1 pasca) ¹	1	10^{-5}	$9,869 \cdot 10^{-6}$
(1 bar) ²	10^5	1	0,987167
(1 kgf/cm ²) ³	98039	0,9803	0,968
(1 atmosphère) ⁴	101 325	1,0133	1
(1 cm d'eau) ⁵	98,04	$980 \cdot 10^{-6}$	$968 \cdot 10^{-6}$
(1 mm de Hg) ⁶	133	$1,333 \cdot 10^{-3}$	$1,316 \cdot 10^{-3}$
(1 mb) ⁷	102	10^{-3}	$987 \cdot 10^{-6}$
(1 inch Hg) ⁸	$3,386 \cdot 10^3$	$33,86 \cdot 10^{-3}$	$33,42 \cdot 10^{-3}$
(1 psi) ⁹	6892	$68,9 \cdot 10^{-3}$	$68 \cdot 10^{-3}$
(1 torr) ¹⁰	133	$1,33 \cdot 10^{-3}$	$1,316 \cdot 10^{-3}$

Tableau 3.2

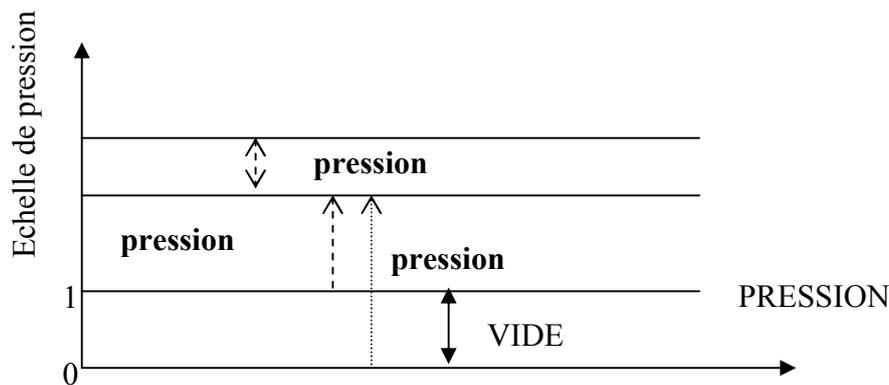


Figure 3.12 Les différentes pressions

- **La pression atmosphérique**

La pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer, à 15 °C, est de 1013 mbar. Elle peut varier, de ± 25 mbar, avec la pluie ou le beau temps. Elle est fonction de l'altitude (hydrostatique).

- **La pression relative**

C'est la différence de pression par rapport à la pression atmosphérique. C'est la plus souvent utilisée, car la plupart des capteurs, soumis à la pression atmosphérique, mesurent en relatif. Pour mesurer en

¹ Unité S.I.

² La pression d'un pascal étant relativement faible on utilise de préférence pour la mesure des pressions dans l'industrie son multiple le bar valant 10^5 pascals.

³ Ancienne unité pratique dont l'usage est à éviter.

⁴ Pression atmosphérique normale (76cm de mercure à 0°C dans un champ de pesanteur d'intensité $g = 9.8066 \text{ m/s}^2$).

⁵ 1 gramme par cm².

⁶ Pour une densité de mercure de 13,59593.

⁷ Unité de pression barométrique (millibar).

⁸ Pouce de mercure.

⁹ Unité C.G.S.

¹⁰ Dans le domaine du vide on désigne 1mmHg comme une unité spécifique le Torr.

absolu, il leur faut un vide poussé dans une chambre dite de référence. Exemple : La pression de gonflage d'un pneu de voiture.

- **La pression absolue**

C'est la pression réelle, dont on tient compte dans les calculs sur les gaz. Elle est comptée à partir de zéro.

Remarque : on peut rajouter 1 bar à la pression relative pour avoir une approximation de la pression absolue.

- **Le vide**

Le vide est une pression inférieure à la pression atmosphérique. Le vide parfait correspond théoriquement à une pression absolue nulle. Il ne peut être atteint, ni dépassé. Quand on s'en approche, on parle alors de vide poussé.

3.5.1. Capteurs mécaniques

3.5.1.1 Manomètres à déformation de solide

A - Le manomètre à tube de Bourdon

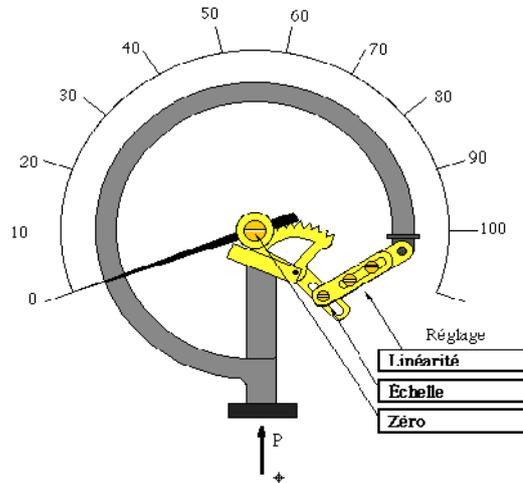
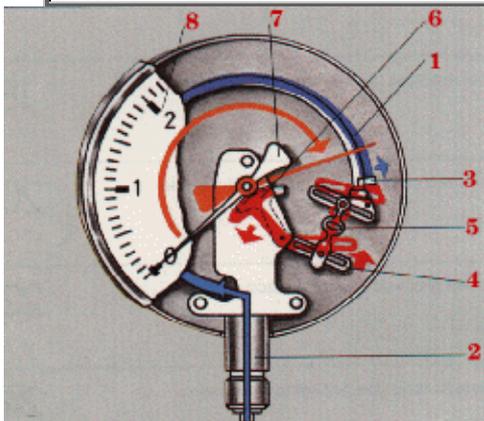


Figure 3.13 : Manomètre à tube de Bourdon

A.1 Fonctionnement



Le tube de Bourdon est brasé, soudé ou vissé avec le support de tube qui forme généralement une pièce complète avec le raccord. Par l'intermédiaire d'un trou dans le raccord, le fluide à mesurer passe à l'intérieur du tube. La partie mobile finale du tube se déplace lors de changement de pression (effet Bourdon). Ce déplacement qui est proportionnel à la pression à mesurer, est transmis par l'intermédiaire du mouvement à l'aiguille et affiché sur le cadran en tant que valeur de pression. Le système de mesure, le cadran et l'aiguille sont montés dans un boîtier.



1. Organe moteur, tube de Bourdon
2. Support de tube
3. Capuchon du tube
4. Secteur denté
5. Bielle
6. Engrenage
7. Aiguille
8. Cadran

A.2 Utilisation

Les manomètres à tube de Bourdon sont utilisés pour la mesure de pressions positives ou négatives de fluides gazeux ou liquides, à condition que ceux-ci ne soient ni hautement visqueux ni cristallisant. Les étendues de mesure s'étalent sur toutes les plages selon DIN de 0... 0,6 bar à 0... 4000 bars. La forme du tube dépend de l'étendue de mesure. Pour les étendues jusqu'à 0... 40 bars inclus on utilise normalement la forme en arc et à partir de 0... 60 bars la forme hélicoïdale. Les appareils sont fabriqués avec le raccordement vertical ou arrière. Il est conseillé de ne les utiliser qu'entre le premier quart et le dernier quart de l'échelle à cause de l'hystérésis. Il convient également de les protéger contre les risques de surpression ou de dépassement d'échelle. Le tube de Bourdon ne permet pas de mesurer les phénomènes rapides et évolutifs de pression. L'incertitude de mesure varie de 0,02 à 0,2 % pour le domaine de mesure de 0 à $3 \cdot 10^8$ Pa.

A.3 Avantages et inconvénients

Avantages :

- précision,
- domaine d'emploi.

Inconvénients :

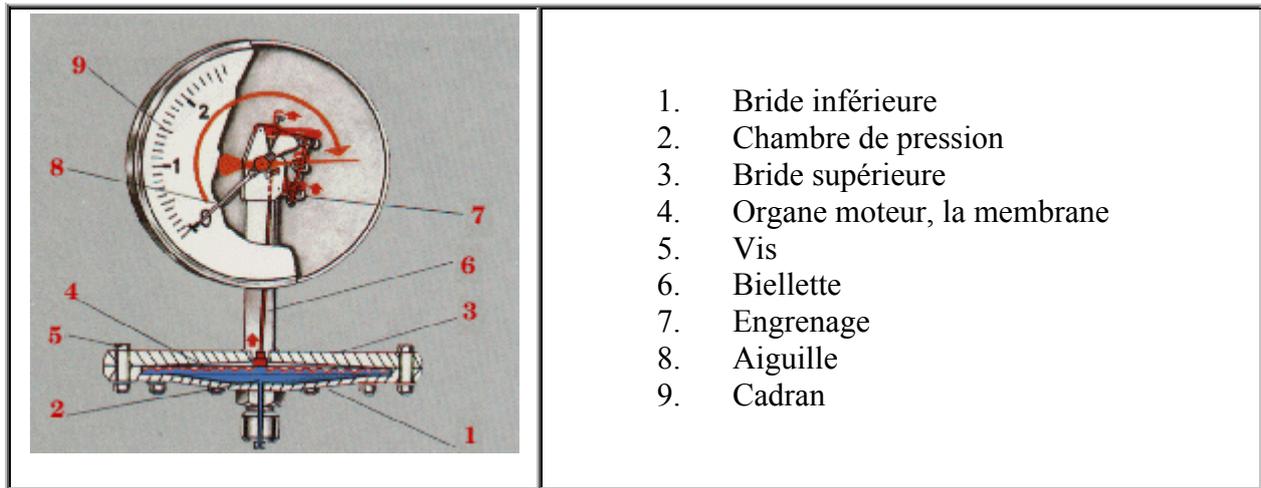
- prix,
- complexité

B- Manomètre à membrane

B.1 Fonctionnement



La membrane est tendue entre deux brides. Par un trou dans le raccord, le fluide à mesurer arrive dans la chambre de pression en dessous de la membrane. La membrane se déplace sous l'effet de la pression. Le déplacement de la membrane est proportionnel à la pression mesurée et est transmis par l'intermédiaire du mouvement à l'aiguille et affiché sur le cadran en tant que valeur de pression. Afin d'être protégés contre des détériorations, le système de mesure, le cadran et l'aiguille sont montés dans un boîtier. En cas de risque de corrosion due à des fluides agressifs, on peut protéger toutes les parties en contact avec le fluide par enduction de plastique ou par un film de protection.

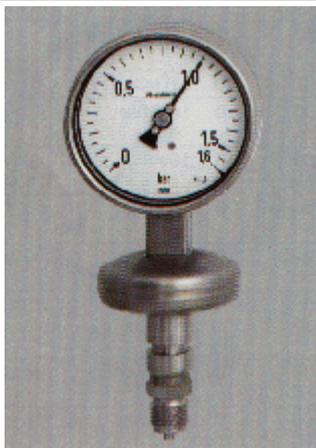


B.2 Utilisation

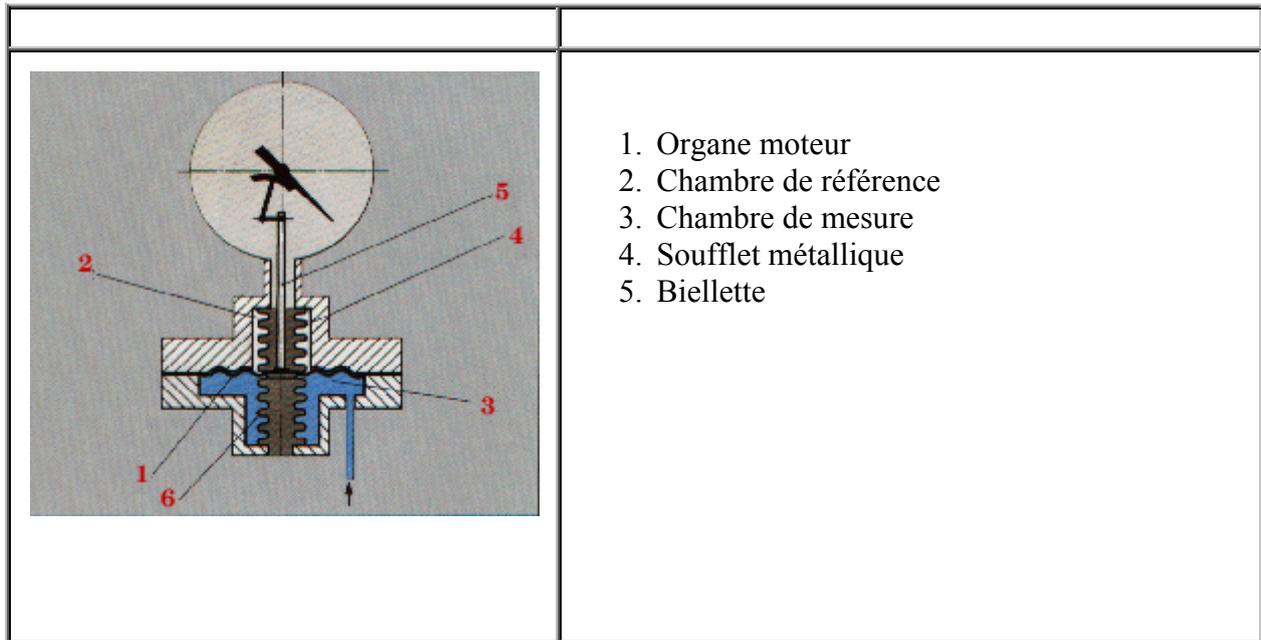
Les manomètres à membrane sont utilisés principalement pour la mesure de faibles pressions positives ou négatives de fluides gazeux ou liquides. Les étendues de mesure possibles s'étalent sur toutes les plages selon DIN de 0...16 mbars à 0... 40 bars. Les membranes de ces manomètres sont très minces et ondulées. De par leur forme, ils sont moins sensibles aux vibrations que les manomètres à tube et sont plus faciles à protéger contre les surcharges et les fluides agressifs. Pour l'utilisation avec des fluides hautement visqueux ou cristallisants il est possible de les équiper de brides ouvertes. Les appareils sont fabriqués avec un montage de membrane horizontale (à angle droit par rapport au cadran) ou verticale (parallèle par rapport au cadran). Etant donné qu'il n'y a pas de différence fondamentale de fonctionnement, la description suivante concerne l'exécution la plus courante, avec la membrane horizontale.

C Manomètre de pression absolu

Fonctionnement



Le principe de mesure de la pression absolue est indépendant de la forme de l'organe moteur. La pression du fluide à mesurer est mesurée par rapport à une pression de référence qui doit être égale à la pression absolue (vide absolu). C'est à dire le côté de l'organe moteur qui n'est pas en contact avec le fluide à mesurer doit se trouver à cette pression de référence. Selon la forme de l'organe moteur, on l'atteint en évacuant et étanchéifiant soit une chambre de référence soit le boîtier enrobant le système. La transmission du mouvement de l'organe moteur s'effectue comme pour les manomètres pour pression relative.

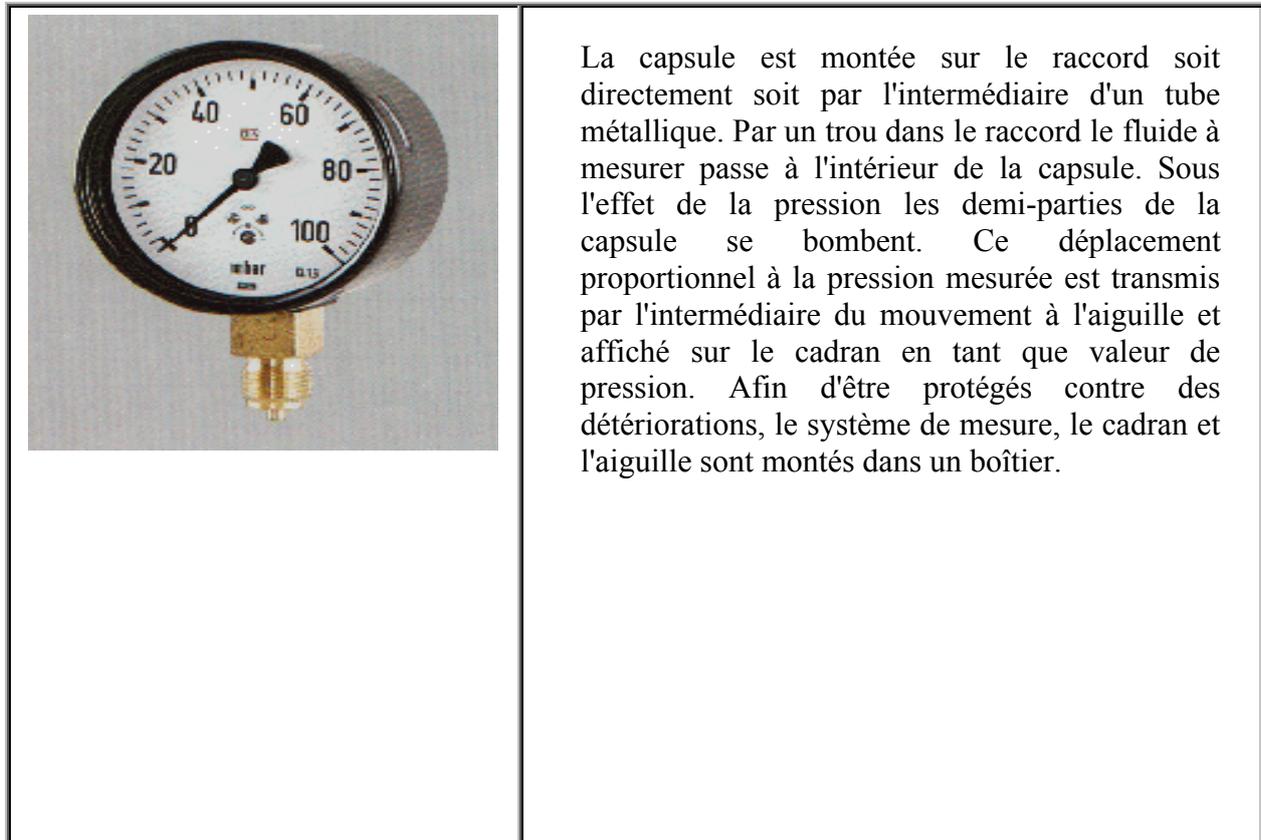


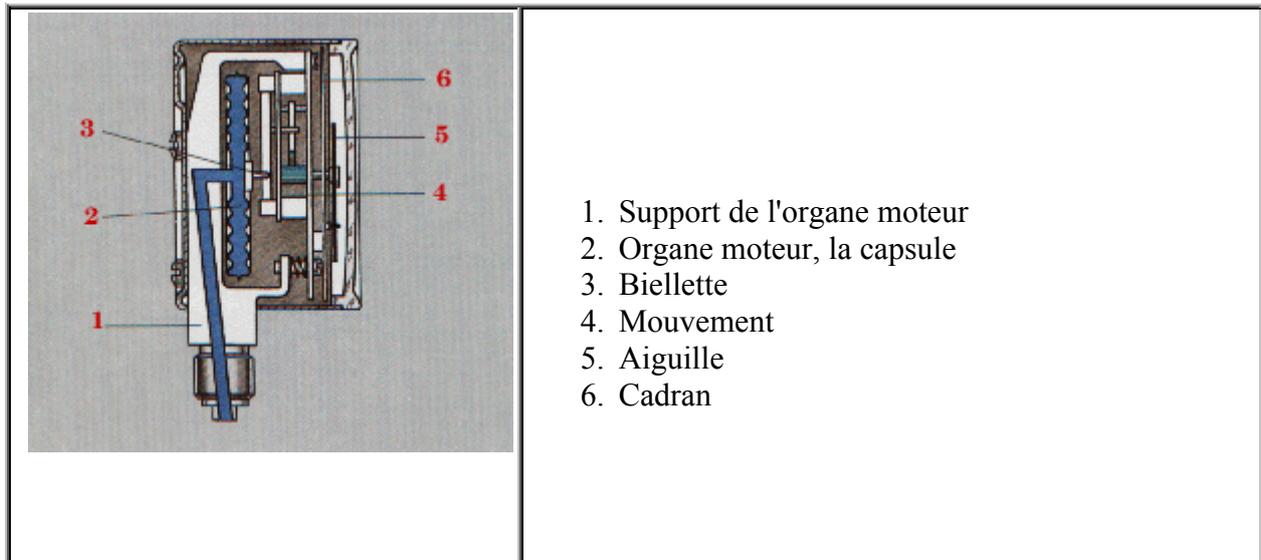
Utilisation

Les manomètres pour pression absolue sont utilisés pour la mesure de pression sans subir les variations de la pression atmosphérique environnante. Les étendues de mesure possibles s'étalent sur toutes les plages selon DIN de 0...10 mbar à 0...100 bar absolue.

3.5.2.2. Manomètre à capsule

Fonctionnement





1. Support de l'organe moteur
2. Organe moteur, la capsule
3. Bielle
4. Mouvement
5. Aiguille
6. Cadran

Utilisation

Les manomètres à capsule sont utilisés pour la mesure de faibles et très faibles pressions positives ou négatives, spécialement pour des fluides gazeux. Il y a certaines restrictions pour la mesure de liquides. Les étendues de mesure possibles s'étalent sur toutes les plages selon DIN de 0... 2,5 mbar à 0... 600 mbar. Les organes moteur à capsule sont une forme spéciale de membrane. Ils comportent deux membranes ondulées concentriquement, assemblées de façon étanche en une capsule. Pour les étendues de mesure très basses il est possible d'assembler plusieurs capsules pour en faire un genre de soufflet. Pour les appareils type de profil on utilise un soufflet conventionnel. Les appareils sont fabriqués soit avec la capsule montée verticalement (parallèle au cadran), soit horizontalement (perpendiculaire au cadran). Le raccordement se fait en dessous ou à l'arrière.

3.5.3. Capteurs piézo-électriques

La piézoélectricité (du grec *piezein* presser, appuyer) est la propriété que possèdent certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique et réciproquement de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique. Les deux effets sont indissociables. Le premier est appelé effet piézoélectrique direct ; le second effet piézoélectrique inverse. Cette propriété trouve un très grand nombre d'applications dans l'industrie et la vie quotidienne. Une application parmi les plus familières est l'allume-gaz. Dans un allume-gaz, la pression exercée produit une tension électrique qui se décharge brutalement sous forme d'étincelles : c'est une application de l'effet direct. De manière plus générale, l'effet direct peut être mis à profit dans la réalisation de capteurs (capteur de pression etc.) tandis que l'effet inverse permet de réaliser des actionneurs de précision (injecteurs à commande piézoélectrique en automobile, nano manipulateur...).

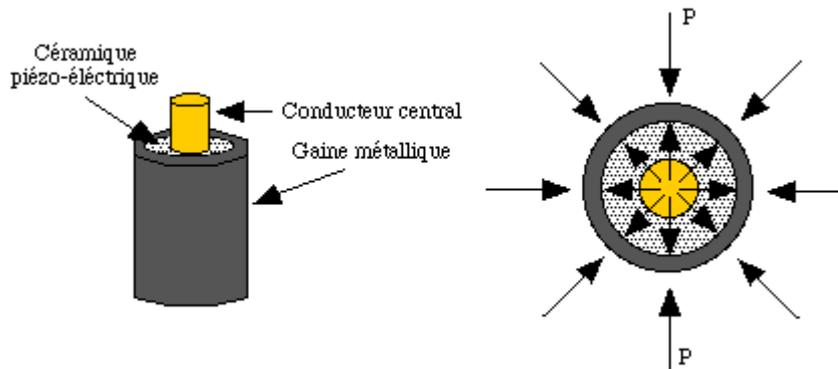


Figure 3.14 : Capteur piézo-électrique tubulaire

La structure piézo-électrique utilisée comme corps d'épreuve assurent directement la transformation de la contrainte, produite par l'application d'une force F , en une charge électrique Q . Or des structures piézo-électriques tubulaires ont été développées sous forme de câble coaxial blindé. Elles permettent la mesure de faibles variations de pressions en milieu haute pression ou pour le contrôle de trafic.

4. Mesures électriques

La mesure joue un rôle de plus en plus important dans les domaines électriques et électroniques. On mesure la vérification expérimentale d'un circuit, la modélisation, la mise au point ou la réparation d'un montage. Dans le domaine électrique et électronique, on utilise plusieurs types d'appareils de mesure, tels que les voltmètres (analogique et numérique) pour mesurer des tensions, les ampèremètres pour mesurer des intensités, les wattmètres pour mesurer des puissances et les ohmmètres pour mesurer des résistances qui se divisent en deux grandes familles :

➤ **Les méthodes directes** : elles sont généralement rapides et efficaces (les appareils utilisés sont portables et toujours prêtes pour des mesures rapides dans les installations et les circuits électriques et électroniques (exemples : ohm mètres analogique et numérique, contrôleur d'isolement).

➤ **Les méthodes indirectes** : elles se pratiquent généralement dans les laboratoires, à cause de leur caractère statique non portatif et offrent ainsi une meilleure précision (exemples : méthode volt-ampèremétrique, méthode des ponts ...)

4.1 Méthode direct

4.1.1 ohm mètre à déviation:

Le schéma de principe d'un ohmmètre analogique (à aiguille) est donné par la figure 4.1..

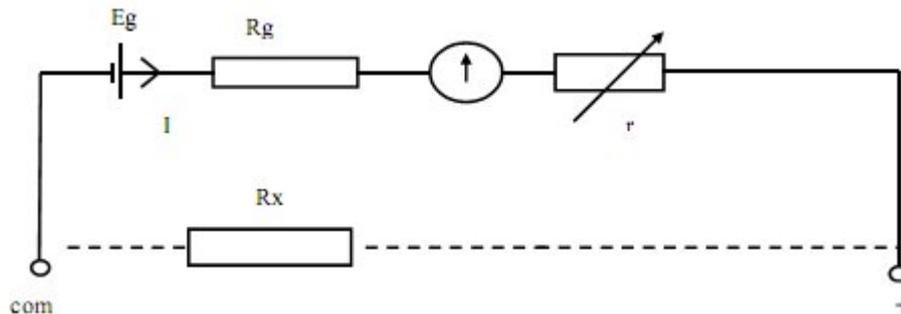


Figure 4.1 : Schéma de principe d'un ohmmètre à aiguille

L'ohmmètre à aiguille est constitué par :

- un équipage à cadre mobile (R_g),
- une résistance ajustable r (pour le réglage externe du zéro),
- une pile interne de force électromotrice E_g alimentant le circuit.

R_x : résistance à mesurer qui se branche entre les deux bornes de l'appareil.

Le principe de fonctionnement consiste à mesurer la diminution du courant dans la boucle de mesure lorsqu'on introduit la résistance à mesurer R_x . En effet, le courant I parcourant le circuit a pour expression :

$$I = \frac{E_g}{R_g + r + R_x}$$

En mode opératoire : La mesure se fait en deux étapes :

- On court-circuite les deux bornes de l'appareil et on agit sur la borne de réglage du zéro (résistance r) jusqu'à obtenir une déviation maximale c'est à dire l'aiguille se place devant la graduation zéro de l'échelle de l'ohmmètre.
- On enlève le court-circuit et on branche la résistance à mesurer aux bornes de l'ohmmètre et on lit la déviation de l'aiguille qui correspond à la valeur de la résistance à mesurée.

La précision de cette méthode dépend intrinsèquement de la précision des composants internes de l'appareil (E_g , R_g et r) qui est généralement entre 3% et 5%.

4.1.2 Ohmmètre numérique

Comme le montre la figure, l'ohmmètre numérique est constitué par un générateur électronique de courant et un voltmètre à courant continu dont l'indication est affichée d'une manière numérique (digitale) (Fig. 4.2).

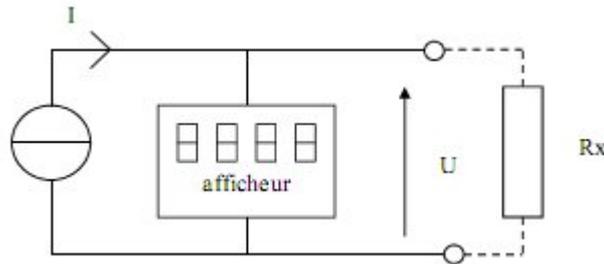


Figure 4.2 : Schéma de principe d'un ohmmètre numérique

avec
$$R_x = \frac{U}{I}$$

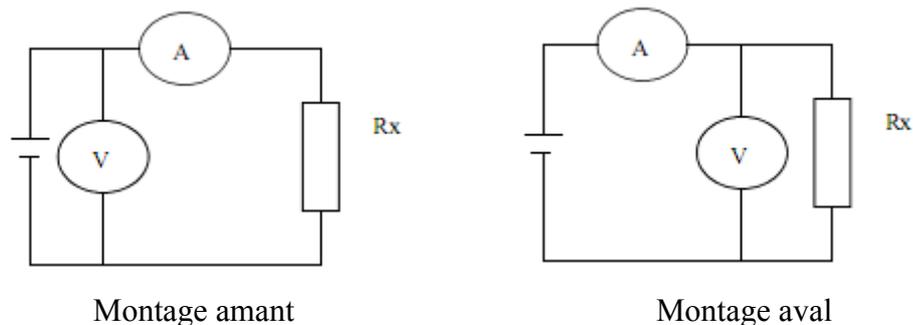
Si le courant de mesure I est constant, on voit que la résistance inconnue R_x est directement proportionnelle à la tension U entre ses bornes. Il suffit alors de convertir l'indication du voltmètre en ohms (Ω).

4.2 Méthode indirect volt-ampéremétrique :

Par l'application de la loi d'ohm on peut évaluer rapidement et avec des moyens simples la valeur des résistances passives pendant leur fonctionnement. On applique une tension constante U au borne de la résistance à mesurer puis on mesure le courant I et la tension U et on calcule la résistance :

$$R_x = \frac{U}{I}.$$

Pour appliquer cette méthode deux montages sont possibles : le montage amont et le montage aval (voir figure 4.3).



$$R_x = \frac{U_{mes}}{I_{mes}}$$

Figure 4.3 : Mesure des résistances par la méthode volt-ampéremétrique.

La précision de mesure de cette méthode dépend de la précision des appareils de mesure utilisés et du montage de mesure (erreur méthodique), en effet :

❖ Pour le montage amont :

$$\begin{cases} U_{mes} = U_x + r_a I \\ I_{mes} = I \end{cases} \Rightarrow R_{xmes} = \frac{U_x}{I} + r_a \Rightarrow R_{xmes} = R_x + r_a \Rightarrow \Delta R_x|_{méth.} = r_a$$

Avec r_a : résistance interne de l'ampèremètre utilisé.

❖ Pour le montage aval :

$$\begin{cases} U_{mes} = U_x \\ I_{mes} = I + I_V \end{cases} \Rightarrow R_{xmes} = \frac{U_x}{I + I_V} = \frac{1}{\frac{I}{U_x} + \frac{I_V}{U_{mes} V}} \Rightarrow R_{xmes} = \frac{R_x}{R_V}$$

$$\Delta R_x|_{méth.} = |R_{xmes} - R_x| = \frac{R_x^2}{R_x + R_V}$$

Avec R_V résistance interne du voltmètre utilisé.

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} \Big|_{méth.} = \frac{R_x}{R_x + R_V} \text{ est d'autant plus faible que } R_V \text{ est très grande (tend vers l'infini).}$$

5. Le traitement du signal

Le traitement du signal est un ensemble de techniques et de méthodes permettant de recueillir l'information contenue dans un signal et de la présenter à l'observateur sous une forme compréhensive après l'avoir traitée.

en physique signal = mesure d'un phénomène physique

Remarque : Il ne faut pas confondre le phénomène physique et sa mesure.

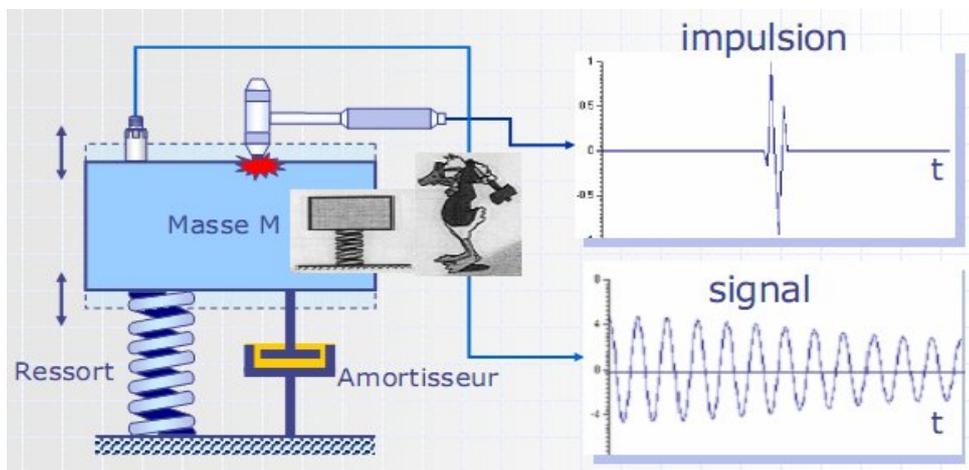


Figure 5.1 Représentation d'un Phénomène physique

On peut poser la question : qu'est-ce qu'un signal ?

Signal = représentation physique d'une information à transmettre

Ou

Signal = entité qui sert à véhiculer l'information.

Dans un contexte expérimental, on peut entendre par information:

- la mesure du temps de vol d'une onde,
- une pression acoustique,
- présence de rupture dans une image ou un signal,
- présence ou non d'une fréquence particulière dans un spectre,

Le traitement du signal se base sur la théorie du signal par :

- Echantillonnage,
- Modulation,
- Analyse spectrale,

5.1 L'échantillonnage

L'échantillonnage est une opération qui consiste à transformer un signal analogique en un signal numérique. Cette opération est fondamentale en traitement de signal car à l'issue de l'opération le signal obtenu étant numérique il est possible de le traiter au moyen d'un ordinateur. Il s'agit donc au cours de cette opération de passer d'un signal continu (t) d'une variable t quelconque à une suite de nombres ou d'échantillons $\{s(n)\}$ avec $n \in \mathbb{N}$.

Cette opération est réalisée au moyen d'un convertisseur analogique numérique (C.A.N.). Le C.A.N. prend au cours de cette opération les valeurs de $s(t)$ à intervalles réguliers T_e . L'intervalle choisi est par définition la période d'échantillonnage qui est notée T_e .

L'inverse de cette quantité est appelé fréquence d'échantillonnage f_e .

Si un signal $s(t)$ est échantillonné à la fréquence f_e sur un intervalle T alors le signal échantillonné sera de dimension finie et contiendra.

$$N = \frac{T}{T_e} \quad \text{échantillons}$$

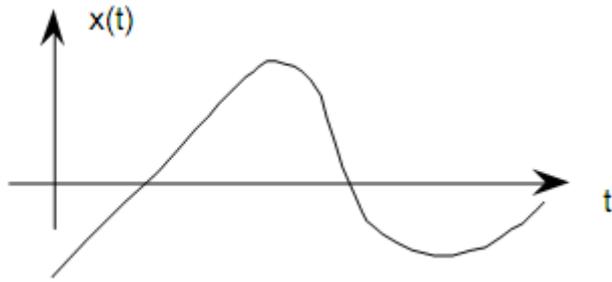


Figure 5.2 : signal continu

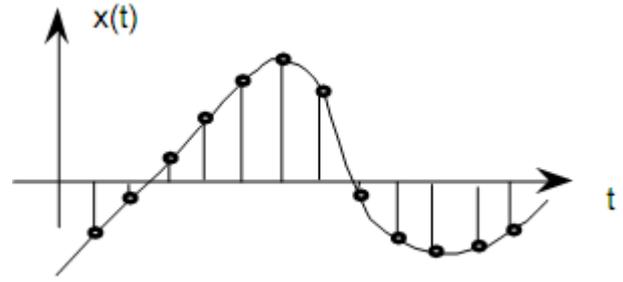


Figure 5.3 : signal continu

L'intervalle entre deux échantillons est donc

$$T_e = \frac{T}{N} \tag{5.1}$$

et l'échantillon p de la suite numérique sera déterminé par la valeur du signal $s(t)$ au temps

$$t_p = p \frac{T}{N} \text{ soit :}$$

$$s(p) = s(t_p) = s\left(p \frac{T}{N}\right) \text{ avec } p \in [1, N] \tag{5.2}$$

La période d'échantillonnage va conditionner la dimension du signal échantillonné, donc il faut comprendre comment (T_e) pour que le signal échantillonné conserve un rapport avec le signal analogique.

Théorème de Shannon ou comment choisir f_e

Nous commençons par le cas d'un signal numérique de dimension infinie. Dans ce cas, la conversion analogique numérique peut être appréhendée mathématiquement en utilisant la distribution peigne de Dirac. Il suffit d'appliquer la distribution peigne pour passer de $s(t)$ à $\{s(n)\}$

$$s(t) \mapsto s_e(t) = \uparrow\uparrow\uparrow_{T_e} s(t) = \sum s(nT_e) \tag{5.3}$$

dans l'espace de Fourier, il apparaît alors que

$$S_e(f) \mapsto S(f) * T.F. [\uparrow\uparrow\uparrow_{T_e}] = f_e S(f) * \uparrow\uparrow\uparrow_{f_e}(f) \tag{5.4}$$

Nous concluons donc que le fait d'échantillonner un signal dans l'espace temporel périodise le signal dans l'espace fréquentiel et que cette périodicité se fait à la fréquence $f = f_e$ d'échantillonnage.

Si nous supposons que le signal $s(t)$ possède un spectre borné tel que $S(f) = 0$ si $f \notin [-f_{\max}, f_{\max}]$, nous voyons que le spectre du signal échantillonné sera non recouvert, si la

condition $f_e > 2f_{\max}$, est vérifiée. Cette condition définit le critère de choix de la fréquence d'échantillonnage.

Le problème majeur de tout échantillonnage est de savoir s'il est possible de revenir après échantillonnage au signal de départ. Pour cela nous voyons que l'opération d'échantillonnage se traduit dans le spectre de Fourier par une périodisation du signal fréquentiel. Comme le spectre du signal est borné la technique de calcul est de se limiter aux fréquences contenues dans l'intervalle $[-f_2/2, f_2/2]$ pour décrire le spectre total.

Cela revient en clair à fenêtrer le spectre du signal échantillonné et à ne considérer dans le spectre du signal échantillonné que le spectre de base $S_{e0}(f)$. Cette opération peut être décrite à l'aide d'une porte de largeur f_e et conduit à

$$S_{e0}(f) = S_e(f) \cdot \cap_{f_e}(f) \quad (5.6)$$

Si l'on repasse dans le domaine temporel et si l'on utilise le théorème de Plancherel, il vient :

$$s_{e0}(t) = s_e(t) * f_e \sin c(\pi f_e t) \quad (5.7)$$

Soit

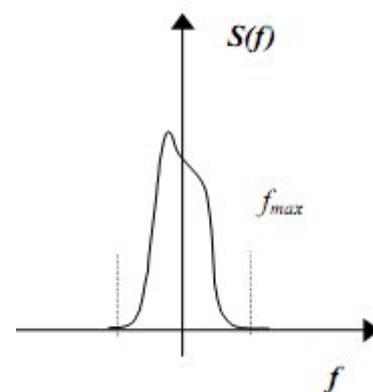
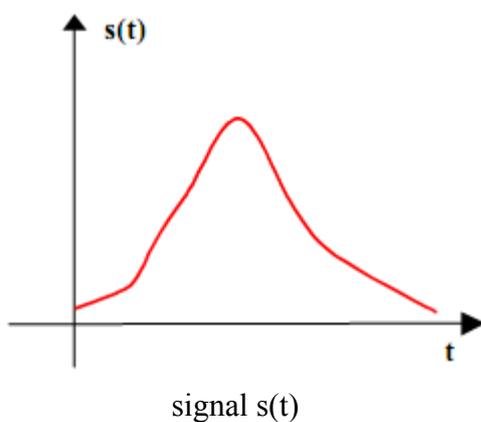
$$s_{e0}(t) = \sum s(nT_e) * f_e \sin c(\pi f_e t) = \left\{ \sum [s(t) \cdot \delta(t - nT_e)] \right\} * f_e \sin c(\pi f_e t) \quad (5.8)$$

L'équation (8) peut s'écrire également

$$s_{e0}(t) = f_e \sum s(nT_e) \sin c(\pi f_e (t - nT_e)) \quad (5.9)$$

On peut vérifier que ce signal diffère du signal $s(t)$ par une constante égale à f_e . Le signal analogique $s(t)$ peut donc être entièrement reconstruit comme suit

$$s(t) = \sum s(nT_e) \sin c(\pi f_e (t - nT_e)) \quad (5.10)$$



Transformé de Fourier d'un signal s(t)

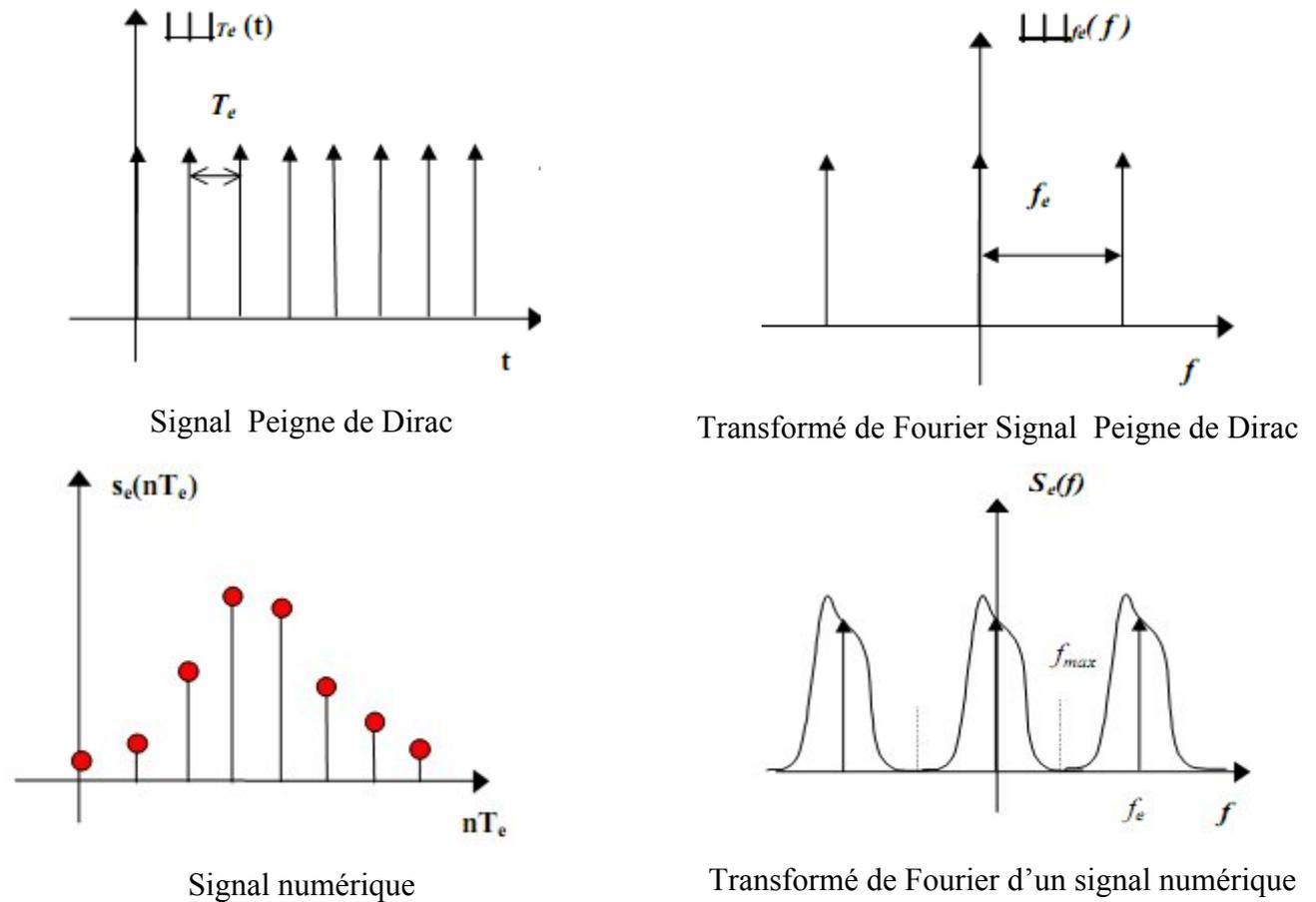


Figure 5.4 : Transformé de Fourier de différents signaux

5.2 Modulation :

Elle a pour fonction de transposer l'information sur une porteuse, afin d'occuper un espace fréquentiel plus réduit et que l'on a choisi. On module une porteuse dont la fréquence est beaucoup plus élevée que le message à transmettre. Cette nouvelle fréquence est plus favorable à la transmission. La modulation consiste à faire varier les caractéristiques de la porteuse (amplitude, fréquence, phase) en fonction du message à transmettre.

5.2.1 Principe de la modulation :

Un récepteur capable de capter un signal provenant d'un émetteur rayonnant une onde électromagnétique d'amplitude, de phase et de pulsation constantes, ne recevrait comme information que la fréquence du signal émis.

5.2.2 Intérêt de la modulation :

Supposons que l'on veuille transmettre un signal sonore audible. Il encombrerait une plage de fréquences s'étendant de 50 Hz à 20 kHz. La transmission directe de ce signal, par ondes hertziennes, est impossible car :

❖ il serait impossible, à la réception, de distinguer ce signal de tous les autres occupant la même plage de fréquences.

❖ Les dimensions des antennes sont grandes d'environ une longueur d'onde du signal. Celle-ci atteindrait alors des dimensions prohibitives. Pour un signal de fréquence 20 kHz: la longueur de l'antenne serait d'au moins

$$\lambda = c * T = \frac{c}{f} = \frac{(3 * 10^8)}{(10^4)} = 30Km \quad (5.11)$$

où c est la vitesse de la lumière – célérité

T, f, sont respectivement la période, la fréquence et la longueur d'onde.

L'intérêt de la modulation réside donc dans la possibilité d'avoir un signal aisément discernable et qui se propage correctement.

Le signal émis par l'émetteur est de la forme:

$$s = S.\cos(\varphi) \quad (5.12)$$

Tel que : $\varphi = \int \omega dt$ où S est l'amplitude du signal et φ sa pulsation.

Le signal est dit modulé quand une de ces trois grandeurs varie suivant une loi imposée par le signal modulant dont la fréquence est plus faible.

Dans la mesure où un signal $s(t)$ est décomposable en série de Fourier:

$$s(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos(n.\alpha.t + \varphi_n) \quad (5.13)$$

ou en intégrale de Fourier s'il n'est pas périodique:

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \cos(n.\alpha.t + \varphi_n(\alpha)) dt \quad (5.14)$$

C'est à dire que pour transmettre un signal périodique basse fréquences, il suffit de savoir transmettre ses premières harmoniques sinusoïdales de façon à avoir un signal transmis peu distordu.

5.3 L'analyse spectrale

L'analyse spectrale recouvre plusieurs techniques de description des signaux dans le domaine des fréquences. Elle permet en particulier d'obtenir les caractéristiques de la réponse d'un système linéaire en utilisant une fonction de transfert. En mathématiques, l'analyse harmonique correspond à une partie de ces techniques.

Soit un signal $s(t)$ qui s'écrit :

$$s(t) = A_p.\cos(\omega_p.t + \beta.\sin(\omega_m.t)) \quad (5.15)$$

On peut décomposer cette expression en série de Fourier tel que :

$$s(t) = A_P \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} J_k(\beta) \cdot \cos(\omega_P + k \cdot \omega_m) \tag{5.16}$$

Où $J_k(\beta)$ désigne la fonction de Bessel de 1^{ère} espèce et d'ordre k, et est une fonction paramétrée définissant l'amplitude des composantes de Fourier du signal.

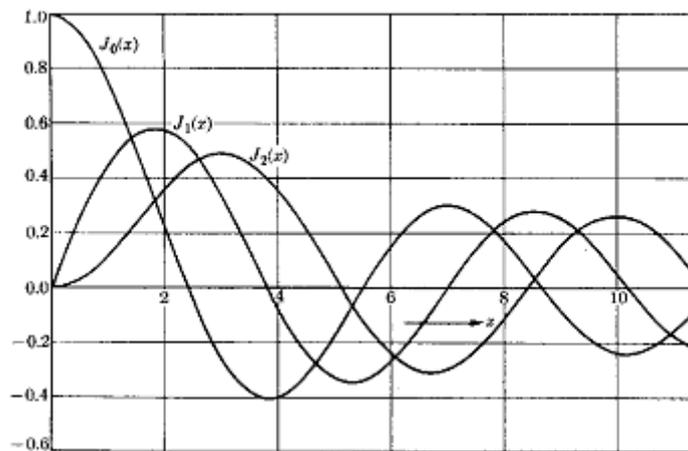


Figure : Graphique des fonctions de Bessel

Le spectre du signal $s(t)$ comporte une porteuse à la fréquence f_p et une infinité de raies aux fréquences $f_p \pm k \cdot f_m$ cependant l'amplitude $J_k(\beta)$ diminuant avec l'indice k, et les limites des composants électroniques font que l'on considère le spectre comme fini.

Si $\beta \ll 1$, le spectre se réduit à 3 raies, une à la fréquence f_p et de deux raies latérales respectivement à $f_p + f_m$ et à $f_p - f_m$.

Spectres en fonction de β :
 pour $\beta = 0,2$, $\beta = 1$ et $\beta = 5$.

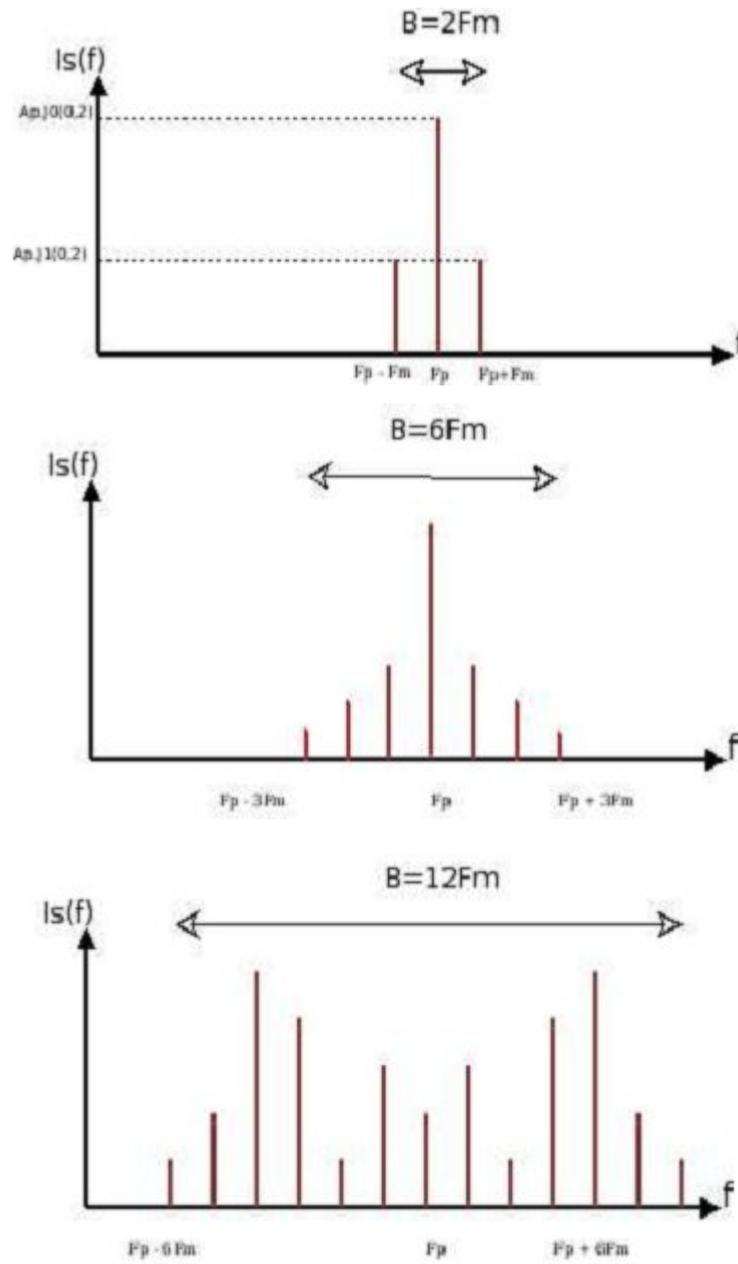


Figure 5: représentation de spectres (avec B largeur de la bande)

6. Interprétation des résultats et mise au point des expériences

Une fois qu'on a réussi à mettre en mouvement un système oscillant, comment cette oscillation se transmet au milieu environnant. Comment peut-on la capturer pour la mesurer ; Que devient le signal capturé, comment peut-on le transmettre, le décrire ? Ces questions nous amènent à aborder la question la construction d'une chaîne de mesure.

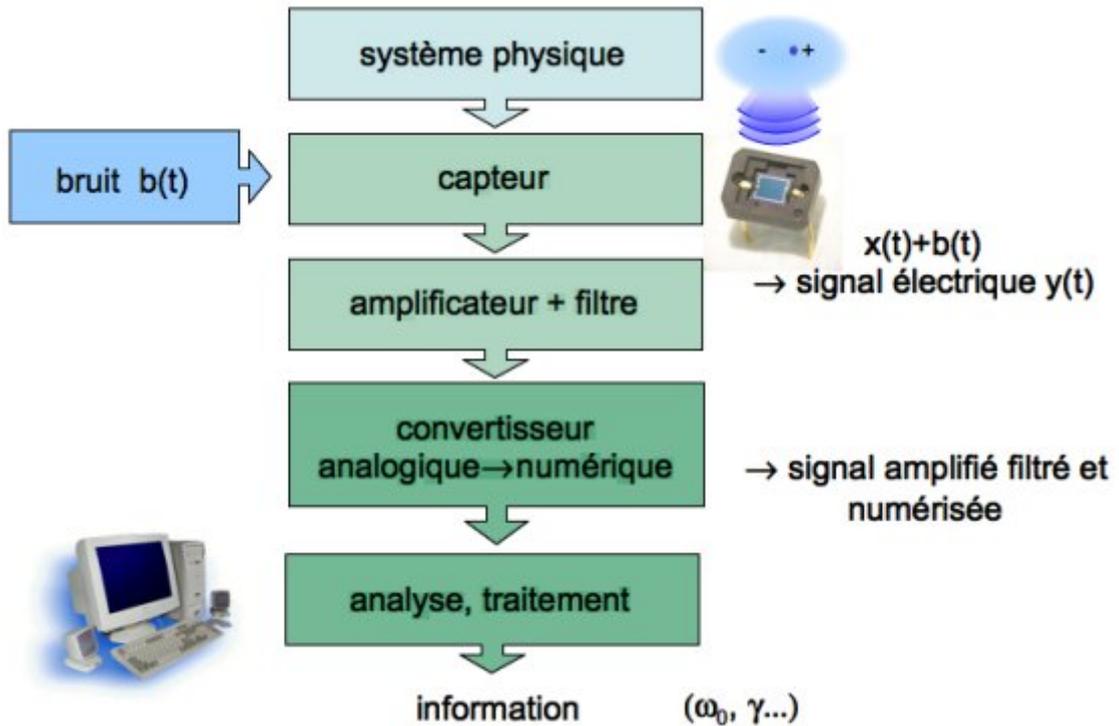


Figure 6.1 : La chaîne de mesure.

❖ Le signal physique :

On appelle signal physique la grandeur qu'on souhaite mesurer et qui contient de l'information utile, le plus souvent c'est une grandeur variable au cours du temps.

❖ Le capteur :

Le capteur est un instrument possédant une caractéristique mesurable qui est sensible à la grandeur physique qu'on veut mesurer.

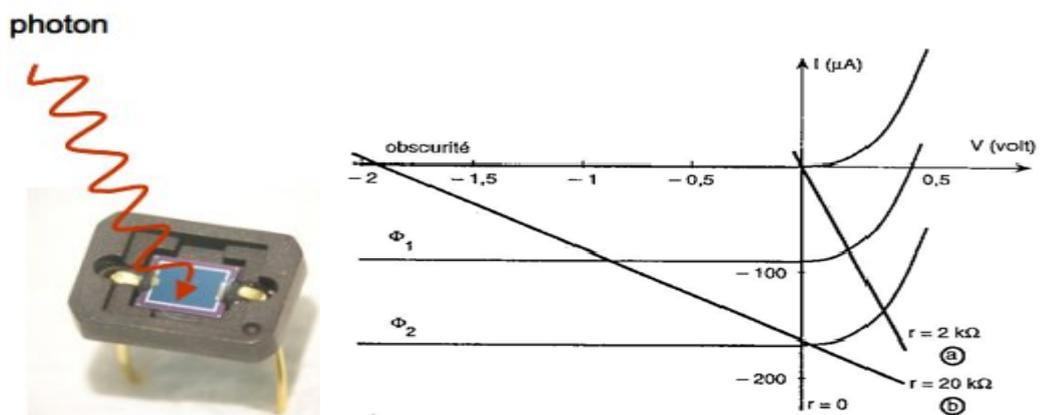


Figure 6.2 : Photodiode et ses caractéristiques courant-tension.

❖ Bruit

L'opération de conversion en signal électrique n'est pas parfaite. La génération d'un signal électrique est toujours soumise à des fluctuations aléatoires, d'origines diverses, comme par exemple l'agitation thermique des charges électriques dans les conducteurs (bruit "Johnson").

Lors d'une mesure, le signal intéressant $x(t)$ est mélangé à du bruit, qu'on indiquera par $b(t)$. Dans beaucoup de cas, mais pas toujours, le bruit est additif, c'est-à-dire qu'il se somme simplement au signal d'intérêt. A l'issue de la mesure on obtient un signal

$$y(t) = x(t) + b(t) \quad (6.1)$$

La question se pose donc de comment "séparer" le signal intéressant du bruit. Selon le type de bruit, des méthodes différentes peuvent être utilisées afin de réduire la part de bruit ou, en d'autres mots, d'améliorer le rapport signal sur bruit. Typiquement, ce qu'on cherche à faire est une opération de filtrage.

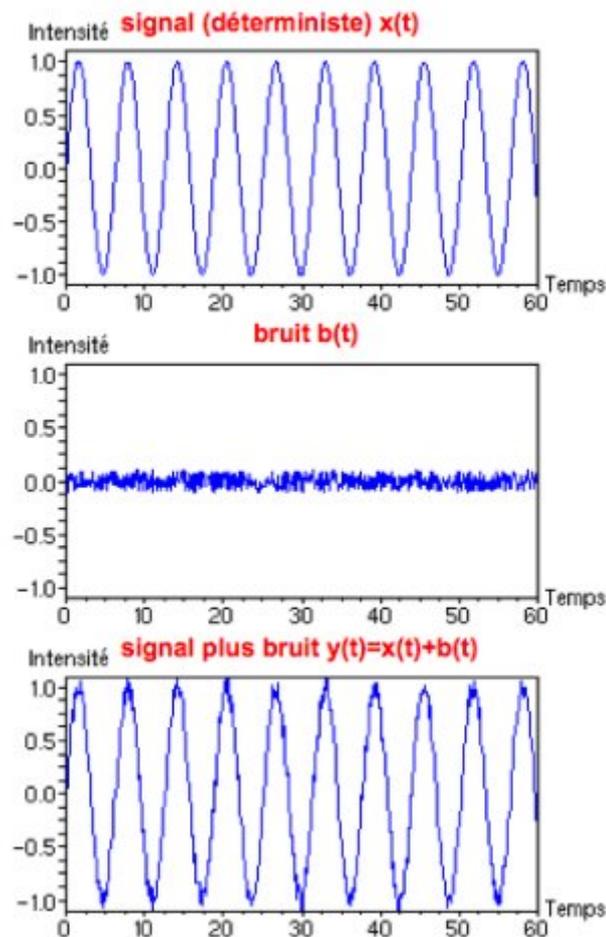


Figure 6.3 : Un exemple de signal plus bruit.

❖ Filtre et Amplificateur

Dans le cas d'un signal électrique bruité $y(t)$, un filtre est en général un circuit électrique qui reçoit le signal $y(t)$ en entrée et donne en sortie un signal modifié $s(t)$, pour lequel on espère avoir un meilleur rapport signal sur bruit. Pour cela, on cherche à amplifier la partie intéressante du signal, que nous avons appelé $x(t)$, et à atténuer le bruit $b(t)$.

❖ Conversion analogique-numérique

Imaginons que nous avons conçu un filtre permettant l'extraction du signal physique d'intérêt (signal analogique) c'est-à-dire qu'il varie dans le temps de manière continue dans un intervalle de valeurs. Pour pouvoir le traiter avec un ordinateur, il faut cependant le rendre numérique (digital) : générer à partir de sa valeur analogique, une valeur numérique (codée sur plusieurs bits), proportionnelle à la valeur analogique entrée. En effet, l'ordinateur travaille seulement sur des nombres binaires, et peut donc représenter seulement un nombre fini de valeurs discrètes (avec N bits on peut représenter 2^N valeurs entre une valeur minimum et une maximum). La conversion analogique numérique consiste à la fois à discrétiser le signal, c'est-à-dire recueillir la valeur du signal à des temps donnés, espacés d'un intervalle de temps fini, et à le quantiser, c'est-à-dire approcher son amplitude, point par point, en la représentant sur un ensemble fini de valeurs possibles. Le signal est alors numérisé ("digitalisé").

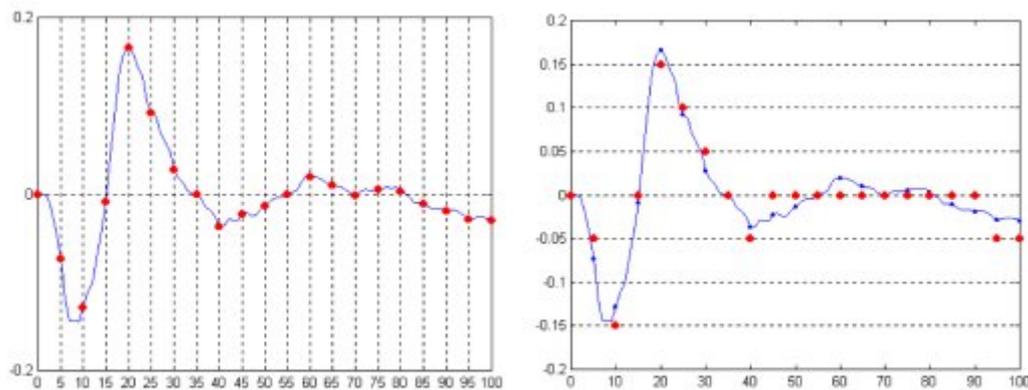


Figure 6.4 : Discretisation puis quantisation d'un signal analogique.

❖ Analyse et traitement du signal

Pour un système linéaire la réponse à un signal sinusoïdal en entrée est un signal sinusoïdal de même fréquence en sortie. Nous nous sommes contentées de mesurer son amplitude et sa

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Larbi Ben M'Hidi Oum El Bouaghi

Faculté des Sciences et Science Appliquées

Département de Génie Mécanique

Support de Cours

Matière : Mesure et Instrumentation

Pour les étudiants de 3^{ème} année Energétique

Filières : Génie Mécanique

Dr. Amar HADEF

Le présent document consiste à donner un aperçu sur les différents instruments de mesure. Il s'agit d'un support de cours de la matière " Mesure et Instrumentation " destiné aux étudiants de la 3^{ème} année de Licence (S5), Filière de Génie Mécanique du domaine des Sciences et Technologie (ST). Le cours est structuré selon le programme des enseignements du socle commun, 5ème semestre, défini par l'arrêté 562 du 23 Juillet 2014.

Le contenu de ce document est largement inspiré des documents et sources cités dans la liste des références bibliographiques. Dans cette matière l'étudiant(e) apprendra à choisir les bons instruments et les bons capteurs pour monter ses propres expériences. Être capable d'apprécier les erreurs.

Références

- R.J. Goldstein, Fluid Mechanics Measurements, 1983
- J.O. Hinze, Turbulence, Mc Graw-Hill Book Cie, Inc, 1975
- C.G. Lomas, Fundamentals of hot wire anemometry, Cambridge Univ. Press. 1986
- E. Guyon, J.P. Hulin et L. Petit, Hydrodynamique physique, CNRS Ed. 2001