



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES - TLEMCEN (ESSAT)

INSTRUMENTATION

(Cours)

Réalisé par

M^{lle} Sanaa NAIT TAHAR

Année Universitaire 2018-2019

Avant-Propos

Ce cours est destiné aux étudiants de troisième année licence en génie de procédés organiques. Il traite diverses questions relatives à l'instrumentation notamment :

- La thermométrie (mesure de température)
- La manométrie (mesure de pression)
- Limnimétrie (mesure du niveau)

En outre, il permet aux étudiants de :

- Avoir un premier contact avec l'instrumentation industrielle ;
- Acquérir les notions fondamentales ;
- Découvrir les principales techniques de mesure des grandeurs fondamentales ;
- Comprendre le fonctionnement des instruments industriels.

SOMMAIRE

Généralités	1
1. La mesure	2
2. Qu'est-ce qu'un appareil ?	2
3. Qualités d'un appareil de mesure	2
4. Fonction d'un appareil de mesure	3
5. Composition d'un instrument de mesure	3
6. Evaluation de la précision des mesures	3
7. Comment se fait la mesure ?	4
Mesure de Pression (Manométrie)	6
1. Qu'est-ce que la pression	7
2. Unités de pression	7
3. Différents types de pression	7
4. Instruments de mesure de pression	9
4-1. Manomètres hydrostatiques	9
4-2. Manomètres à déformation du solide	10
4-3. Appareils de mesure du vide (Jauges)	12
Mesure de Température (Thermométrie)	15
1. Introduction	16
2. Unités de mesure	16
3. Instruments de mesure de température	16
3-1. Thermomètres à dilatation	16
3-2. Thermomètres électriques	20
Mesure de Niveau (Limnimétrie)	27
1. Introduction	28
2. Rappel théorique	28
3. Instruments de mesure et de détection du niveau	29
2-1. Méthodes hydrostatiques	29
2-2. Méthodes électriques	32
2-3. Méthodes acoustiques	34
Références Bibliographiques	36

GENERALITES

1. LA MESURE

Par abus de langage, on confond souvent le terme mesurage (action) et mesure (résultat de l'action).

- **Mesure** : C'est la valeur représentative de la mesurande. *Exemples*: 3bar, 100°C, 5 m³/s, ...
- **Mesurande** : c'est la grandeur physique (P, T, ...).
- **Mesurage** : Il englobe toutes les opérations permettant l'obtention de la représentation de la valeur d'une grandeur physique.

2. QU'EST-CE QU'UN APPAREIL

Un appareil de mesure est un instrument qui est conçu pour obtenir expérimentalement des valeurs qu'on puisse attribuer à une grandeur.

Exemples :

- Un débitmètre sert pour mesurer un débit.
- Un thermomètre mesure une température.

3. QUALITES D'UN APPAREIL DE MESURE

Elles sont relatives à leurs modes de fabrication. On distingue :

- a. **Fidélité** : C'est la principale qualité exigée à un appareil de mesure. Elle repose sur la reproductibilité des résultats à des temps très courts. Elle peut être détériorée par :
 - La température
 - L'humidité
 - Les frottements
 - Durée de vie de l'appareil (vieillesse de l'appareil).
- b. **Justesse** : On dit qu'un appareil est juste lorsque les indications qu'il donne correspondent à la valeur réelle de la grandeur à mesurer sans avoir recours à des courbes d'étalonnage.
- c. **Sensibilité** : Un appareil est sensible lorsqu'une toute petite variation de la variable donne un changement appréciable de l'indication.
- d. Rapidité d'indication du résultat de la mesure
- e. **Robustesse** : Un appareil est dit robuste lorsqu'il n'est pas détérioré par les secousses ou autres.
- f. Consommation de l'appareil
- g. **Commodité d'emploi** : lecture aisée, facilité d'emploi, faible encombrement,...
- h. **Coût**

4. FONCTION D'UN APPAREIL DE MESURE

- a. **Indication:** Dans un appareil de mesure, la mesure est indiquée soit à l'aide d'une aiguille ; soit par un spot lumineux.
- b. **Signalisation:** Lorsque la mesurande atteint une valeur critique (consigne), l'appareil donne un signal sonore, lumineux ou autres.
- c. **Intégration:** L'instrument de mesure peut réaliser une opération mathématique concernant la mesure
- d. **Enregistrement:** Il est effectué par inscription sur un ruban en papier qui se déroule en fonction du temps (diagramme).
- e. **Régulation:** La mesure est utilisée pour commander un cerveau-mécanisme effectuant les corrections nécessaires pour maintenir la variable à une valeur stable choisie à l'avance (consigne).

5. COMPOSITION D'UN INSTRUMENT DE MESURE

- a. **Élément de mesure :** Cet élément est sensible. Il est capable de recueillir une énergie
- b. **Élément secondaire :** Il transforme l'énergie recueillie en travail mécanique.
- c. **Élément final :** Il transforme, en général, la mesure en indication exploitable.

6. EVALUATION DE LA PRECISION DES MESURES (classification d'erreur)

6-1. Erreur systématique

Avant d'effectuer la mesure, il faut prendre garde que l'utilisation des instruments ne modifie pas trop le phénomène étudié.

Exemple : Mesure de vitesse

L'introduction d'une sonde dans un fluide en mouvement risque de perturber son écoulement et, par conséquent, avoir des mesures de vitesse erronées.

6-2. Erreur instrumentale

Elle représente la différence entre la grandeur indiquée par l'appareil et la celle qui lui est appliquée. On distingue :

- Erreur de fidélité qui est due au frottement,...
- Erreur de justesse qui résulte du mauvais étalonnage de l'appareil.

L'erreur globale n'est pas connue mais on peut avoir sa limite supérieure que le constructeur donne en indiquant la classe de l'appareil.

$$\text{Classe de l'appareil (\%)} = \frac{\text{Erreurs instrumentales expérimentales maximales tolérées}}{\text{Calibre de l'appareil}}$$

Exemples

A. Soit un ampèremètre de classe 0,15 utilisé avec le calibre 5,5 A. Trouver l'erreur instrumentale maximale tolérée (Δx_{inst}).

$$\Delta x_{inst} = \text{classe} \times \text{calibre} \rightarrow \Delta x_{inst} = 0,15/100 \times 5,5 = 8,25 \text{ mA}$$

B. Un instrument de mesure possède une classe de l'ordre de 0,35. Son cadran comporte 180 divisions. Déterminer l'erreur instrumentale maximale tolérée (Δx_{inst}) par cet instrument.

$$\Delta x_{inst} = 180 \times 0,35/100 = 0,63 \text{ divisions.}$$

6-3. Erreur causée par l'expérimentateur**6-3-1. Erreur de parallaxe**

Elle est due à la position de l'expérimentateur par rapport à l'aiguille et/ou à la graduation. Elle est supprimée lorsque l'appareil est muni d'un miroir. L'observateur effectue sa lecture lorsque l'aiguille est confondue avec son image dans le miroir.

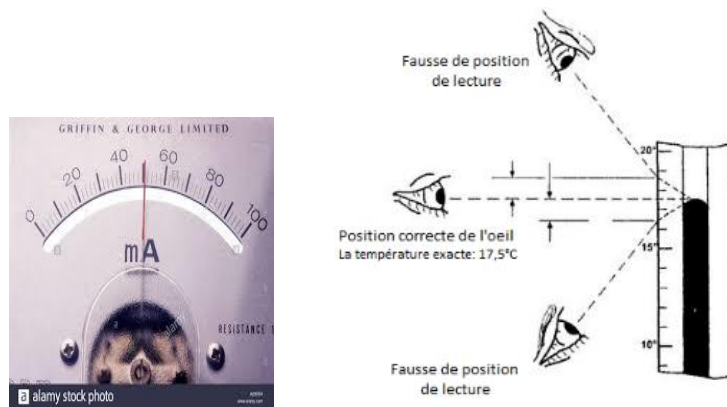


Figure 1 : Erreur de parallaxe

6-3-2. Erreur d'appréciation : acuité visuelle, ...**7. COMMENT SE FAIT LA MESURE ?****a. Méthode directe**

La grandeur inconnue est déterminée par lecture directe de la déviation de l'appareil de mesure considéré. La précision de cette méthode dépend de la précision de l'appareil de mesure.

Exemple :

- Le thermomètre donne la valeur directe de la température ;
- Le voltmètre fournit la valeur directe de la différence de potentiel (ddp).

b. Méthode indirecte

Elle consiste à utiliser deux ou plusieurs appareils de mesure. La déviation conjuguée des appareils des mesures utilisées, permettent la détermination de la grandeur inconnue par l'intermédiaire d'une expression mathématique qui fait intervenir les grandeurs mesurées.

La précision de cette méthode dépend de la précision des appareils de mesure utilisés et de leur mode de branchement.

Exemple :

Pour déterminer une puissance P , on mesure la tension U par un voltmètre et l'intensité du courant I par un ampèremètre puis on calcule P en appliquant la relation $P = U.I$

c. Méthode d'opposition

La grandeur inconnue est remplacée par une grandeur étalon. L'égalité des indications d'un appareil de mesure (généralement un micro-ampèremètre) dans les deux cas permet de déterminer la valeur inconnue.

Exemple : Mesure de la force électromotrice (f.e.m)

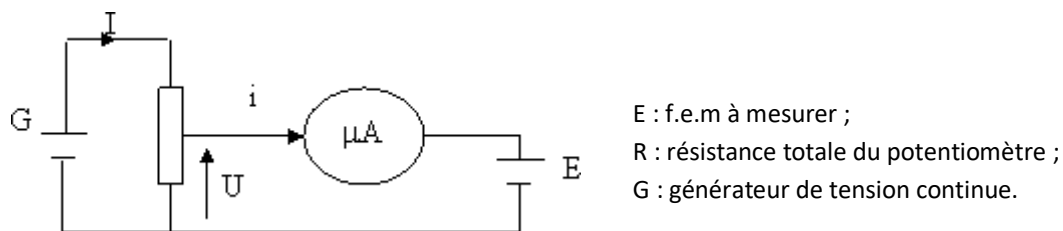


Figure 2 : Mesure de force électromotrice.

On place la f.e.m à mesurer (E), et on agit sur le potentiomètre jusqu'à obtenir l'équilibre (c'est à dire $i = 0$) et on établit la relation suivante: $E = U = R'.I$

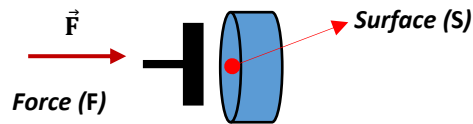
On remplace la fe.m à mesurer (E) par une f.e.m étalon E_0 , et on agit de nouveau sur le potentiomètre jusqu'à obtenir $i=0$. On a donc $E_0 = U = R*.I$

La valeur de E est obtenue par $E = E_0. (R'/R*)$

MESURE DE PRESSION (MANOMETRIE)

1. QU'EST-CE QUE LA PRESSION

La pression P est une grandeur physique qui résulte de l'application d'une force F d'un fluide (liquide ou gaz) ou bien d'un solide sur une unité de surface S . Elle est définie par l'expression : $P = \frac{F}{S}$.



Elle est mesurée à l'aide d'un manomètre ou d'un capteur de pression.

2. UNITES DE PRESSION

- $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ (Pa : Pascal est l'unité de pression dans le système international (SI))
- $1 \text{ atm} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ (atm : atmosphère)
- $1 \text{ atm} = 1,01325 \text{ bar}$
- $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$
- $1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg}$ (mmHg : millimètre de mercure)
- $1 \text{ atm} = 760 \text{ torr}$ (torr : torricelli)
- $1 \text{ torr} = 1 \text{ mmHg}$
- $1 \text{ atm} = 10,33 \text{ mCE}$ (mCE : mètre colonne d'eau, mCE = mH₂O)
- $1 \text{ atm} = 14,696 \text{ PSI}$ (PSi : pound per square inch est une unité anglo-saxonne)
- $1 \text{ Ba} = 1 \text{ dyne/cm}^2$: (Ba : Barye est une unité dans le système CGS)
- $1 \text{ atm} = 1,013 \cdot 10^6 \text{ Ba} = 1,013 \cdot 10^6 \text{ dyne/cm}^2$
- $1 \text{ atm} = 101,325 \text{ pz}$ (pz : pièze est l'unité de pression dans le système mètre-tonne-seconde (MTS))

3. DIFFERENTS TYPES DE PRESSION

a. Pression atmosphérique ou pression barométrique P_{atm}

Elle reflète la pression ressentie en chaque point de la surface terrestre. Elle est due au poids des couches d'air environnant le globe. Elle varie avec la température, la latitude (position d'un point sur terre) et l'altitude (élévation verticale d'un point par rapport au niveau de la mer).

La pression moyenne au niveau de la mer, à 0° C, est de 1,013 bar. Soit 760 mm Hg.

- b. **Pression absolue** : Elle est mesurée par rapport au vide absolu. C'est une pression positive.
- c. **Vide** : Le vide parfait correspond théoriquement à une pression absolue nulle. Il ne peut être ni atteint, ni dépassé. Quand on s'en approche, on parle alors de vide poussé.

d. Pression relative ou pression effective P_r

C'est une pression, positive ou négative, exprimée par rapport à la pression atmosphérique. Elle représente l'écart entre la pression réelle absolue et la pression atmosphérique $P_r = P_{abs} - P_{atm}$.

Remarques :

- Si $P_r < 0$, on est donc face à une **dépression**. L'appareil enregistre une pression inférieure à la pression atmosphérique. *Exemple : dépression d'un ventilateur à l'aspiration.*
- Si $P_r > 0$, la **surpression** règne. L'appareil indique une valeur supérieure à la pression atmosphérique. *Exemple : pression d'une chambre à air de pneu.*
- Les mots surpression et dépression doivent être complétés par : statique, dynamique ou totale.

e. Pressions statique, dynamique et totale

- **Pression statique**

A l'intérieur d'un récipient contenant un fluide en repos se crée une pression due au poids de la masse du fluide sur la surface considérée. Cette pression est donnée par : $P_s = \rho \cdot g \cdot H$

P_s : Pression statique ou hydrostatique au point A, exprimée en Pa
 ρ : Masse volumique du liquide contenu dans le réservoir exprimée en kg/m^3
 g : Accélérateur de pesanteur en m/s^2
 H : Profondeur du point A en m

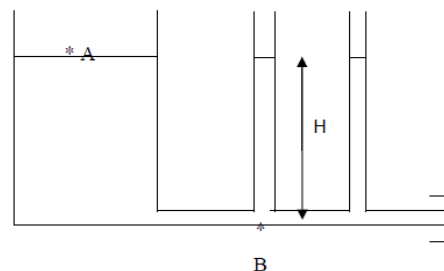


Figure 1 : Mesure de la pression statique

- **Pression dynamique**

Lorsqu'un fluide entre en mouvement, une pression supplémentaire (P_d) dite pression dynamique ou hydrodynamique se crée au point B. Elle est définie par : $P_d = \frac{1}{2} \rho V^2$ où V représente la vitesse d'écoulement du fluide.

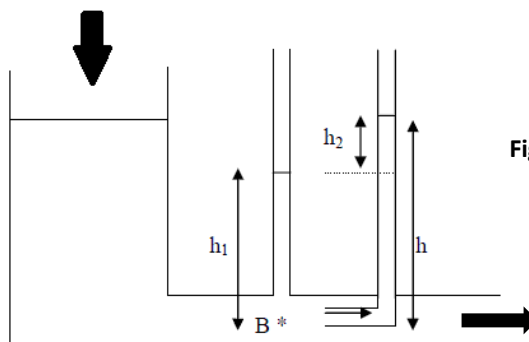


Figure 2 : Dispositif de mesure de pression dynamique.

4. INSTRUMENTS DE MESURE DE PRESSION

4-1. Manomètres hydrostatiques

a. Manomètre tube en U

C'est un manomètre à liquide. Il permet la mesure facile des pressions de 10^2 à 10^5 Pa avec une précision de l'ordre de quelques %. Le tube possède une forme de U dont une branche est liée à la chambre où règne la pression à mesurer et l'autre est ouverte à l'air libre. La pression relative est mesurée par la hauteur H qui sépare les niveaux du liquide (mercure Hg, alcool, ...) dans les deux branches.

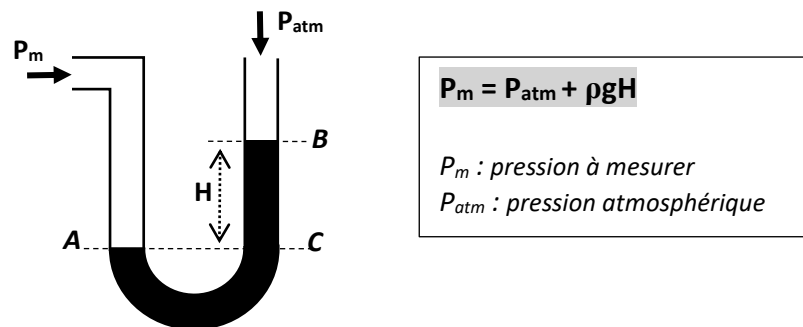


Figure 3 : Baromètre (tube en U).

Inconvénients de cet appareil

- L'appareil est fragile.
- L'étendue de mesure est limitée par la hauteur des branches.
- Le liquide est en général le mercure (Hg) qui a une forte densité mais qui diminue la sensibilité.
- L'erreur de lecture est multipliée par deux (à cause des deux niveaux A et B).

b. Manomètre colonne à réservoir

Lorsque la pression à mesurer P agit dans la branche gauche donc sur le réservoir, le niveau du liquide descend dans le réservoir et monte dans le tube. La lecture se fait en repérant la hauteur correspondant au niveau supérieur dans le tube.

Avantage : ce manomètre n'a pas besoin d'étalonnage.

Inconvénients :

- Appareil fragile et encombrant ;
- Son échelle est limitée. Elle dépend de la hauteur du tube ;
- Erreur de parallaxe est multipliée par deux (deux lectures).

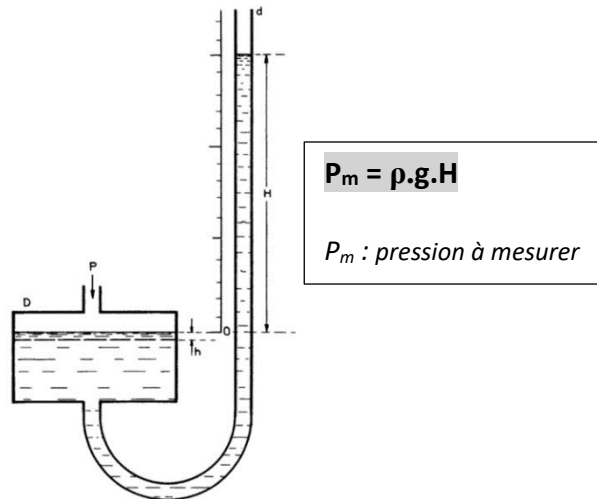


Figure 4 : Schéma simplifié d'un manomètre colonne à réservoir.

4-2. Manomètres à déformation de solide

a. Manomètre à spire métallique de Bourdon

Sous l'effet de la pression du fluide, la section de spire se déforme et le bout libre se déplace. Son déplacement entraîne le mouvement de l'aiguille qui affiche sur le cadran la mesure. Le système de mesure, le cadran et l'aiguille sont montés dans un boîtier.

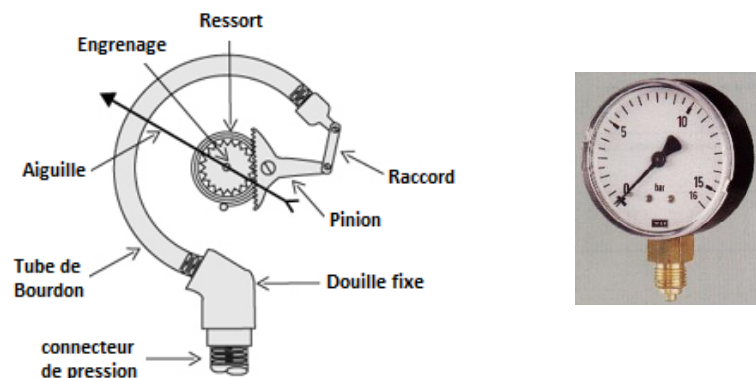


Figure 5 : Composition d'un manomètre à spire de Bourdon.

a-1. Avantages

- Il mesure de pressions (positives ou négatives) de fluides gazeux ou liquides ;
- L'étendue de mesure s'étend de 0,6 à 4 kbar ;
- L'incertitude de mesure varie de 0,02 à 0,2 % pour le domaine de mesure de 0 à 3 kbar.

a-2. Désavantages

- Son utilisation est limitée aux fluides qui doivent être ni trop visqueux ni cristallisant ;
- Déformation de la spire par surpression ou dépression ;

- Les appareils sont fabriqués avec le raccordement vertical ou arrière. Il convient de les protéger contre les risques de surpression ou de dépassement d'échelle.

b. Manomètre à soufflet de type Bourdon

On envoie une pression P au soufflet métallique. Ce dernier va être gonflé. Il va comprimer le ressort qui va à son tour déplacer l'aiguille. Les ondulations du soufflet permettent une déformation d'allongement ou d'écrasement suivant l'axe du tube. Sa précision est de 2%.

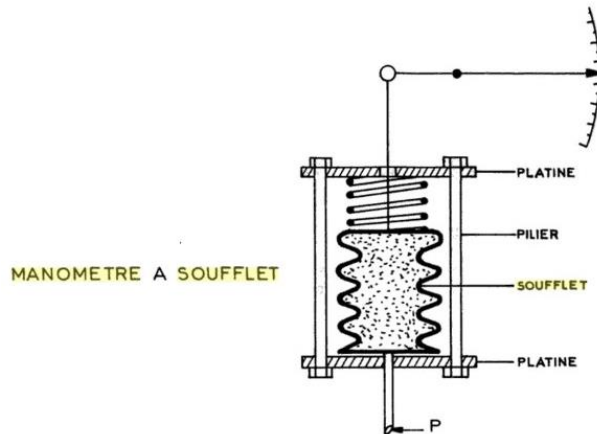


Figure 6 : Principe d'un manomètre à soufflet.

Il existe deux modèles de soufflets (voir figure ci-après):

- Soufflet interne ;
- Soufflet externe.

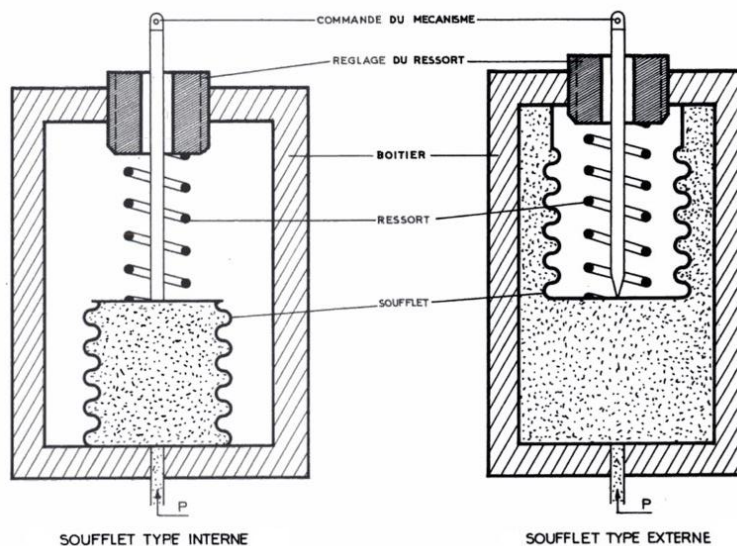


Figure 7 : Soufflets de Bourdon : interne et externe.

c. Manomètre à membrane

Il possède une membrane circulaire qui peut être soit en cuir, toile à téflon, caoutchouc, métal,... Cette membrane est fixée sur une chambre dans laquelle arrive la pression P à mesurer. Son échelle est linéaire. Elle donne directement la pression.

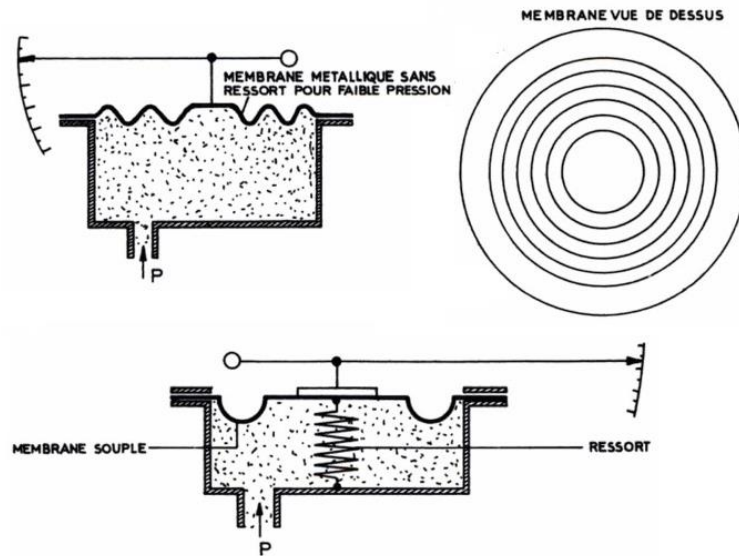


Figure 8 : Différents types de membranes

d. Manomètre à capsule

Les manomètres à capsule sont utilisés pour la mesure de faibles et très faibles pressions positives ou négatives des fluides gazeux. Les étendues de mesure possibles s'étalent sur toutes les plages de 2,5 mbar à 600 mbar. La capsule est constituée de deux membranes ondulées concentriquement, assemblées de façon étanche. 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.

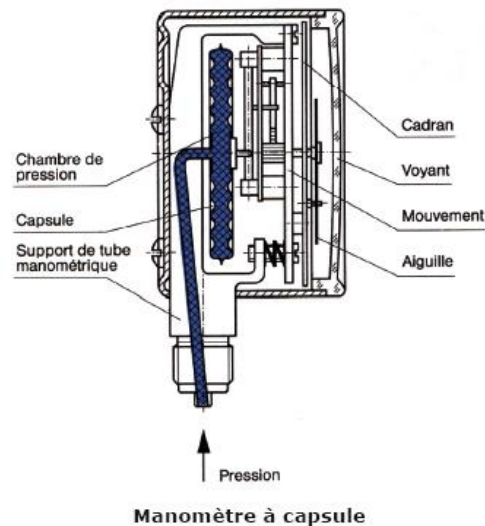


Figure 9 : Composition d'un manomètre à capsule

4-3. Appareils de mesure du vide (jauges)

Le vide est utilisé dans différents secteurs de la vie. On distingue, par convention, quatre classes de vide (figure suivante). Il est mesuré à l'aide de manomètres qu'on nomme *jauges*.

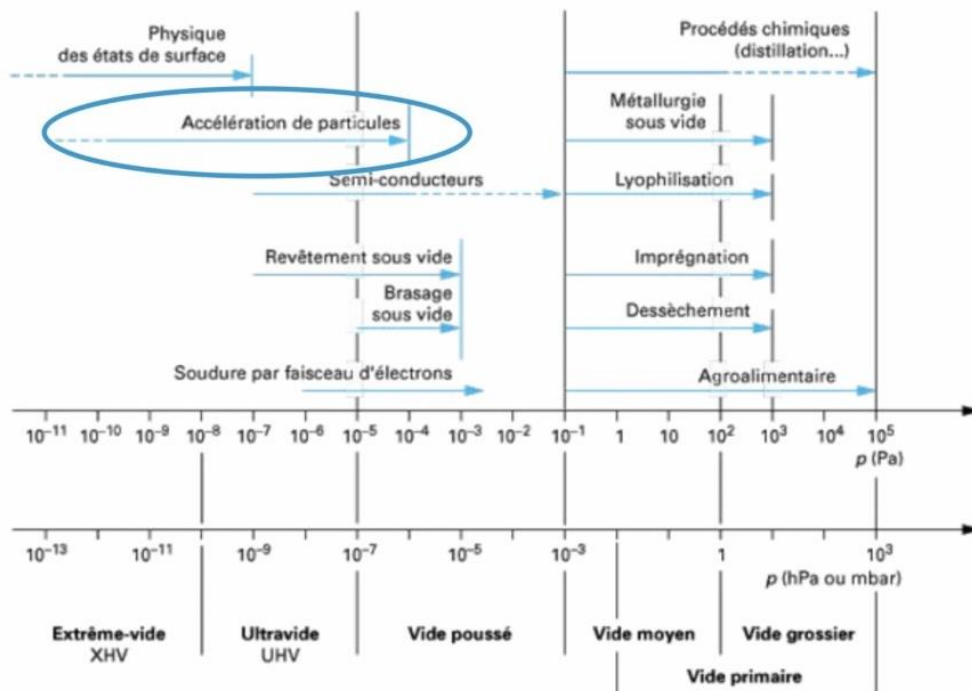


Figure 10 : Différents domaines du vide et leurs applications.

4-3-1. Jauges mécaniques

Elles sont utilisées pour la mesure du vide grossier (de 50 à 1000 hectopascals). Elles mesurent le déplacement d'une membrane, qui se déforme proportionnellement à la différence de pression avec le milieu à mesurer. Certains dispositifs électroniques permettent aujourd'hui de mesurer des déplacements très faibles, et donc des pressions de l'ordre de 10^{-3} hPa.

Remarque : certains manomètres à déformation peuvent être utilisés comme jauges

4-3-2. Jauges thermiques

Elles mesurent les pressions entre 50 et 10^{-4} hPa. Elles reposent sur une autre propriété des gaz qui est la conductivité thermique. En effet, un filament est chauffé par un courant électrique. Les molécules de l'air vont se condenser sur le fil, avant de s'évaporer à nouveau. Lors de cette évaporation, il y a un refroidissement du filament, que l'on peut mesurer et qui nous renseigne sur la quantité de molécules présentes dans l'air

Remarque : - Plus la pression est forte et plus le refroidissement est important.
 - La *jauge de Pirani* est la plus répandue en technique du vide. Elle mesure depuis la pression atmosphérique jusqu'à 10^{-3} mbar.

4-3-3. Jauges ioniques

Elles sont employées dans le domaine de l'ultravide (inférieur à 10^{-7} hPa), lorsqu'il ne reste plus assez de molécules pour que les autres dispositifs soient efficaces.

Leur principe repose sur l'ionisation, par décharge électrique, des molécules présentes dans l'air. Les cations (ions chargés positivement) vont se diriger vers la cathode (pôle négatif), et induire un courant électrique. C'est en mesurant ce courant que l'on peut estimer la quantité d'ions, donc la pression du gaz.

MESURE DE LA TEMPERATURE (THERMOMETRIE)

1. INTRODUCTION

La température est grandeur physique intensive. Elle reflète de degré d'agitation des particules (atomes ou molécules) : plus les molécules d'un objet sont agitées, plus la température est élevée alors que moine elles bougent, plus la température est basse.

2. UNITES DE MESURE

Une échelle de température est une échelle de références permettant de repérer quantitativement la température d'un corps matériel (solide, liquide ou gaz). Les échelles les plus utilisées et le passage d'une unité à l'autre sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Echelles de température.

À partir de :	Kelvin	Celsius	Fahrenheit	Rankine	Réaumur
$T_{\text{Kelvin}} =$	T_K	$T_C + 273,15$	$\frac{5}{9} (T_F + 459,67)$	$\frac{5}{9} T_{\text{Ra}}$	$\frac{5}{4} T_{\text{Re}} + 273,15$
$T_{\text{Celsius}} =$	$T_K - 273,15$	T_C	$\frac{5}{9} (T_F - 32)$	$\frac{5}{9} (T_{\text{Ra}} - 491,67)$	$\frac{5}{4} T_{\text{Re}}$
$T_{\text{Fahrenheit}} =$	$\frac{9}{5} T_K - 459,67$	$\frac{9}{5} T_C + 32$	T_F	$T_{\text{Ra}} - 459,67$	$\frac{9}{4} T_{\text{Re}} + 32$
$T_{\text{Rankine}} =$	$\frac{9}{5} T_K$	$\frac{9}{5} T_C + 491,67$	$T_F + 459,67$	T_{Ra}	$\frac{9}{4} T_{\text{Re}} + 491,67$
$T_{\text{Réaumur}} =$	$\frac{4}{5} (T_K - 273,15)$	$\frac{4}{5} T_C$	$\frac{4}{9} (T_F - 32)$	$\frac{4}{9} (T_{\text{Ra}} - 491,67)$	T_{Re}

3. INSTRUMENTS DE MESURE DE TEMPERATURE

Les différentes méthodes de mesure de température découlent des phénomènes physiques sensibles à celle-ci. On note :

- Cas d'un gaz : La variation de la température d'un gaz, à volume constant, s'accompagne d'une variation de sa pression
- Cas d'un liquide : la variation de la température d'un liquide s'accompagne d'une variation de son volume,
- Cas d'un métal : la variation de la température d'un métal s'accompagne d'une variation de sa luminance, de sa longueur, de sa résistance électrique ou de sa force électromotrice,

Par ailleurs, les instruments de mesure de température peuvent être classés en trois catégories :

- Thermomètre à dilatation ;
- Thermomètre à résistance ;
- Pyromètre.

3-1. Thermomètres à dilatation

3-1-1. Thermomètre à dilatation du liquide

a. Composition du thermomètre

Il est constitué d'un réservoir rempli d'un liquide appelé liquide thermométrique, surmonté d'un canal capillaire de section faible et régulière (diamètre de l'ordre de 0,2 mm) se terminant par une ampoule de sécurité. Cette dernière sert lors d'un dépassement de la température admissible.

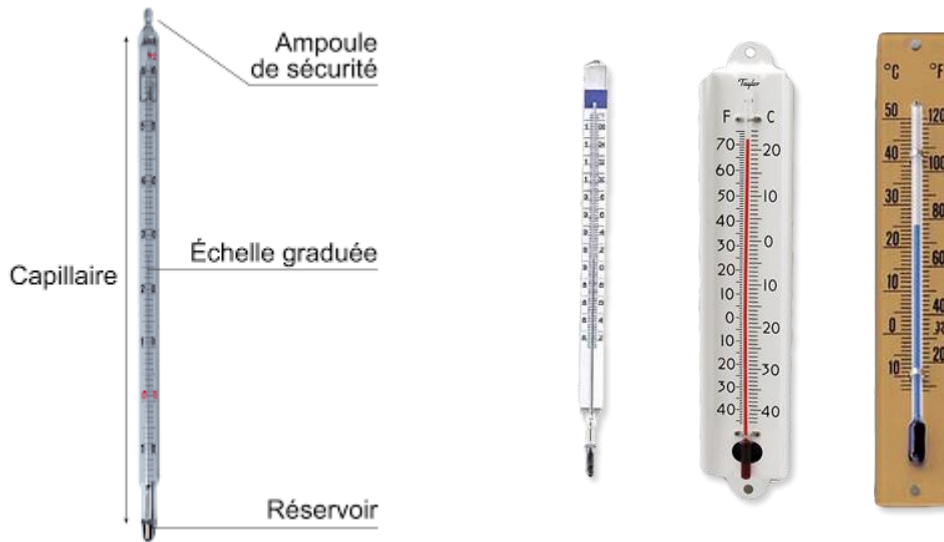


Figure 1 : Exemples de thermomètres à réservoirs.

Remarques

- **Ensemble réservoir et capillaire**

L'ensemble réservoir et capillaire sont réalisés en verre ou silice, la nature du matériau dépend de la température à mesurer. Si pour la fabrication du thermomètre, on utilise une enveloppe en quartz, au lieu d'une enveloppe en verre, on peut alors utiliser le thermomètre jusqu'à des températures de +750°C.

Exemples :

- Verre d'Iena jusqu'à 450°C ;
- Verre Supremax jusqu'à 630°C ;
- Silice pure fondue jusqu'à 1 000°C.

- **Liquide thermométrique**

Tableau 2 : Liquides thermométriques et leurs étendues de mesure.

Liquide thermométrique	Etendue d'échelle (°C)
Mercure (Hg)	-38 à 650
Mercure – Gallium (Hg - Ga)	0 à 1000
Mercure – Thallium (Hg - Tl)	-58 à 650
Ethanol – Créosote	-10 à 200

b. Principe de fonctionnement

Il se base sur le phénomène de dilatation des corps par effet du chauffage. La dilatation étant réversible, elle fournit un mode pratique de repérage des températures grâce à la variation du volume du liquide thermométrique.

Ainsi, le changement du volume est régi par la relation $V = V_0(1 + \alpha t)$ avec :

- V : volume du liquide à température t ;
- V_0 : volume du liquide à température à 0°C ;
- α : coefficient de dilatation du liquide thermométrique (exprimé en $^\circ\text{C}^{-1}$) ;
- t : température du corps à mesurer.

La sensibilité du thermomètre est proportionnelle au volume V_0 , au coefficient de dilatation α du liquide et inversement proportionnel à la section S du capillaire $\Delta h = \Delta V/S$.

3-1-2. Thermomètre à dilatation du solide

a. Principe de fonctionnement

Il repose sur le phénomène de dilatation des solides par effet de l'élévation de la température. Comme le montre l'exemple suivant (figure ci-dessous), l'extrémité de la tige métallique exposée à la vapeur d'eau s'échauffe et après un certain temps, tout le métal chauffe par conduction et par conséquent, il s'allonge. Cet allongement se transmet à un micro-ordinateur dotant d'un logiciel spécial qui convertit la dilatation du métal en température correspondante.

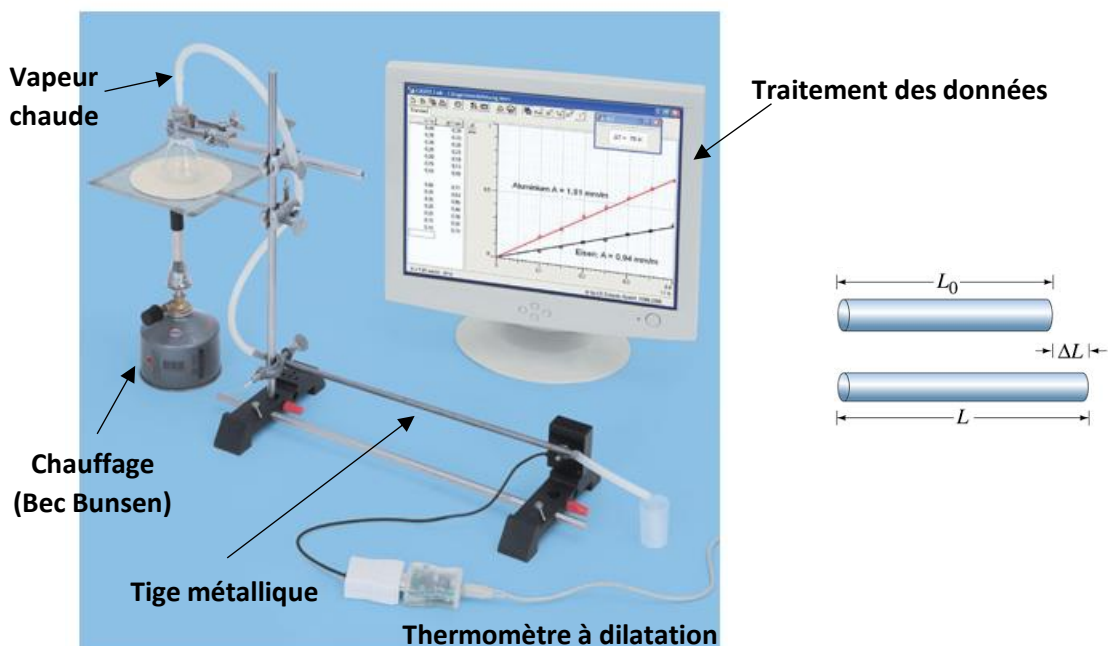


Figure 2 : Mesure de température par un thermomètre à dilatation assistée par un micro-ordinateur.

La dilatation étant réversible, elle fournit un mode pratique de repérage des températures grâce à la variation de la longueur du solide. Ainsi, le changement de la longueur linéaire est régi par la relation

$$L = L_0 (1 + \lambda \theta)$$

avec :

- L : longueur de la tige métallique à température θ ;
- L_0 : longueur de la tige métallique à température à $\theta=0^\circ\text{C}$;
- λ : coefficient de dilatation linéaire du métal (exprimé en $^\circ\text{C}^{-1}$)
 - $\lambda = 9 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ pour le platine ;
 - $\lambda = 12 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ pour l'acier ;
 - $\lambda = 30 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ pour le zinc.
- θ : température du corps à mesurer.

La mesure de l'allongement ou du rétrécissement de la tige ($|\Delta L| = |L - L_0|$) permet de déterminer la température qui est supposée égale à la température du milieu environnant.

b. Thermomètres à dilatation du solide les plus utilisés

b-1. Bilame thermique

Le fonctionnement de ces thermomètres repose sur les coefficients de dilatation très différents de deux métaux. Le bilame est constitué de deux lames de métal accolées l'une contre l'autre. Une lame peut-être en Invar, acier au nickel de coefficient de dilatation faible, et l'autre peut-être en aluminium ou cuivre, métal à coefficient de dilatation élevé. Si la température augmente, l'aluminium ou le cuivre se dilate et la longueur augmente.

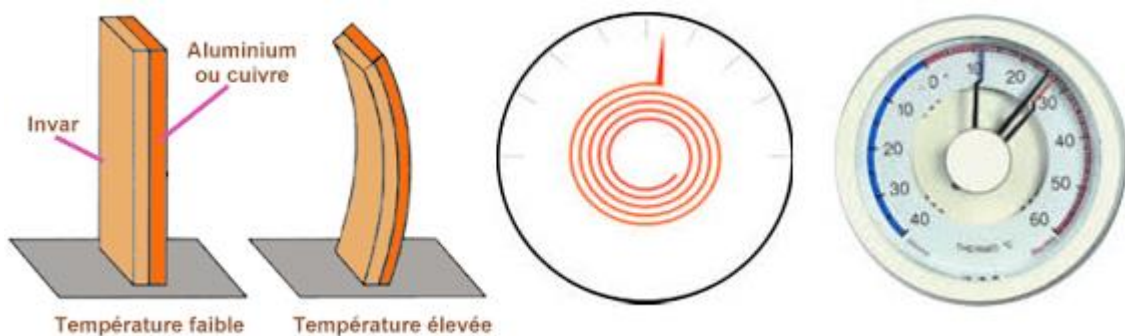


Figure 3 : Bilame thermique.

Ainsi un thermomètre à bilame comprend une spirale qui est constituée de deux lames de métaux dissemblables liées entre elles. Une extrémité est fixe et l'autre est reliée à une aiguille se déplaçant sur un cadran. Le changement de température entraîne le resserrement ou le déroulement de la spirale qui provoque le déplacement de l'aiguille en fonction de la température.

b-2. Pyromètre linéaire

La sonde est formée d'une gaine de silice dans laquelle est placé un barreau métallique dilatable. Une tige transmet la dilatation du barreau à un système d'amplification permettant la lecture de la température.



Figure 4 : Schéma descriptif d'un pyromètre linéaire.

3-2. THERMOMETRES ELECTRIQUES

3-2-1. Thermomètres à résistance

a. Principe

La résistance (R) d'un matériau dépend de la température (T) par la relation générale :

$$R(T) = R_0 F(T - T_0)$$

avec :

- $R(0)$: résistance à la température T_0 ;
- T_0 : température de références ;
- F : est une fonction caractéristique du matériau. Elle est égale à 1 quand $T = T_0$.

Si le matériau est une résistance métallique, la variation de cette dernière vis-à-vis la température s'écrit de la manière suivante : $R = R_0 (1 + AT + BT^2 + CT^3)$ où :

- A , B et C : sont des coefficients positifs caractéristiques du métal ;
- $R(0)$: résistance du métal à la température à 0°C ;
- T : température exprimée en $^\circ\text{C}$.

b. Métaux utilisés

Ce type de thermomètre peut être fabriqué à partir du platine (Pt), du nickel (Ni), de l'indium (In) et rarement à partir du cuivre (Cu) ou du tungstène (W) à cause de leur forte sensibilité à la corrosion.

c. Thermomètre à résistance en platine (sonde platine)

La sonde platine appelée également sonde à résistance ou sonde thermoélectrique, est constituée d'un élément sensible en platine comme il est représenté sur la figure ci-dessous. Le platine employé possède une très grande pureté (99,999%). Ce qui lui permet, par conséquent, de répondre le mieux à l'ensemble des propriétés (sensibilité, fidélité, linéarité,...).

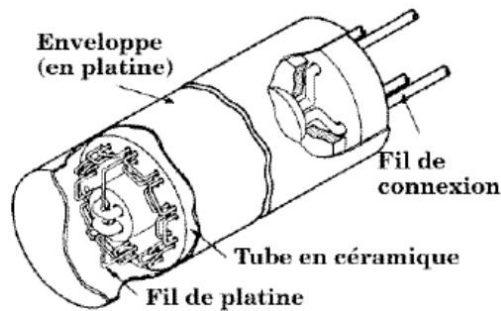


Figure 5 : Composition d'une sonde platine.

Dans un tel système, la variation de la résistance en fonction de la température est décrite par la relation de Calendar-Van où T est en $^{\circ}\text{C}$ et β est un coefficient qui s'annule ($\beta = 0$) lorsque $T > 0$.

$$\frac{R(T)}{R(0)} = \left[1 + \alpha \left[T - \delta \left(\frac{T-100}{100} \right) - \beta \left(\frac{T-100}{100} \right) \left(\frac{T}{100} \right)^3 \right] \right]$$

Cette relation peut être écrite sous une autre forme équivalente :

$$\frac{R(T)}{R(0)} = 1 + AT + BT^2 + C(T-100)T^3$$

Avec $A = \alpha \left(1 + \frac{\delta}{100} \right)$; $B = -\alpha \delta 10^{-4}$ et $C = -\alpha \beta 10^{-8}$ pour $T < 0^{\circ}\text{C}$.

Remarques :

- La résistance platine la plus utilisée est la sonde PT 100. Elle se caractérise par une valeur ohmique de 100 Ω à 0 $^{\circ}\text{C}$ avec un coefficient de température de 0,00385 Ω par degré Celsius.
- À un coût supérieur, il est également possible de se procurer des sondes en platine à 250, 500 ou 100 Ω (Pt 1000).

→ Un inconvénient de la sonde à résistance est la résistance électrique introduite dans le système par le câble de connexion. Cette résistance empêche l'utilisation de câbles standards à double fil pour des longueurs supérieures à quelques mètres puisque cela influence la précision de la mesure.

3-2-2. Thermistance

a. Introduction

Une thermistance est un agglomérat d'oxydes métalliques frittés et compactés à température élevée et sous haute pression (environ 150 bars et 1000 °C). Ces oxydes peuvent être : Mn_2O_3 , MgO , Fe_3O_4 , $MgAl_2O_4$,... Elles sont commercialisées sous différentes formes : disques, anneaux, perles,...

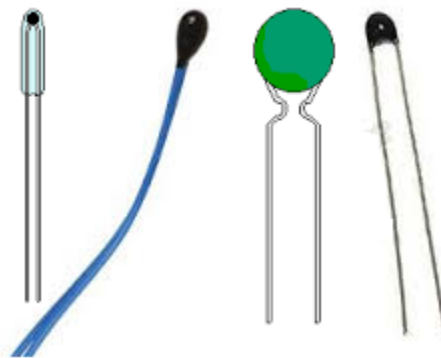


Figure 6 : différentes formes de thermistances.

b. Caractéristiques des thermistances

- Sensibilité thermique : elles possèdent une très grande sensibilité thermique. Elle est généralement 10 fois supérieure à celle des résistances métalliques. Cette caractéristique les rend susceptibles à détecter et mesurer les très faibles variations de température (10^{-4} à 10^{-3} K).
- Coefficient de température (α_R) : Dans la plupart des cas, il est négatif. On note alors **CTN** (coefficient de température négatif) toute thermistance ayant $\alpha_R < 0$ et **CTP** (coefficient de température positif) celle possédant un $\alpha_R > 0$.
- Stabilité : Elle dépend de son mode de construction (nature de l'oxyde métallique utilisé) et des conditions d'emploi.
- Résistivité : leur grande résistivité permet d'obtenir des dimensions réduites (quelques mm) et de réaliser des mesures quasi ponctuelles de la température.
- Capacité calorifique : elle est réduite à cause de leurs faibles dimensions donc faible encombrement ce qui leur accorde des temps de réponse très courts.
- Plage de mesure : -80°C à 700°C.

c. Relation température – Résistance

La résistance s'exprime généralement sous la forme suivante :

$$R(T) = R(0) \cdot \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$$

où

- **R(0)** : résistance à la température T_0 ;
- **T** : température absolue en Kelvin ;
- **B** : est un paramètre de sensibilité en température caractéristique du matériau constituant la thermistance.

Par ailleurs, il en résulte que le coefficient de température qui est défini par $\alpha_R = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT}$ devient égal à $\alpha_R = -\frac{B}{T^2}$.

Remarque : La loi de variation de température n'est pas linéaire.

3-2-3. Thermocouples

a. Construction d'un thermocouple

Un thermocouple est constitué de 2 conducteurs (fils) métalliques de nature différente, soudés en un point, la soudure chaude (S_c). Les autres extrémités des fils sont branchées sur l'appareil de mesure. Cela constitue la soudure froide (le point de référence), qui sert de référence à la mesure. Elle doit être maintenue à température constante.

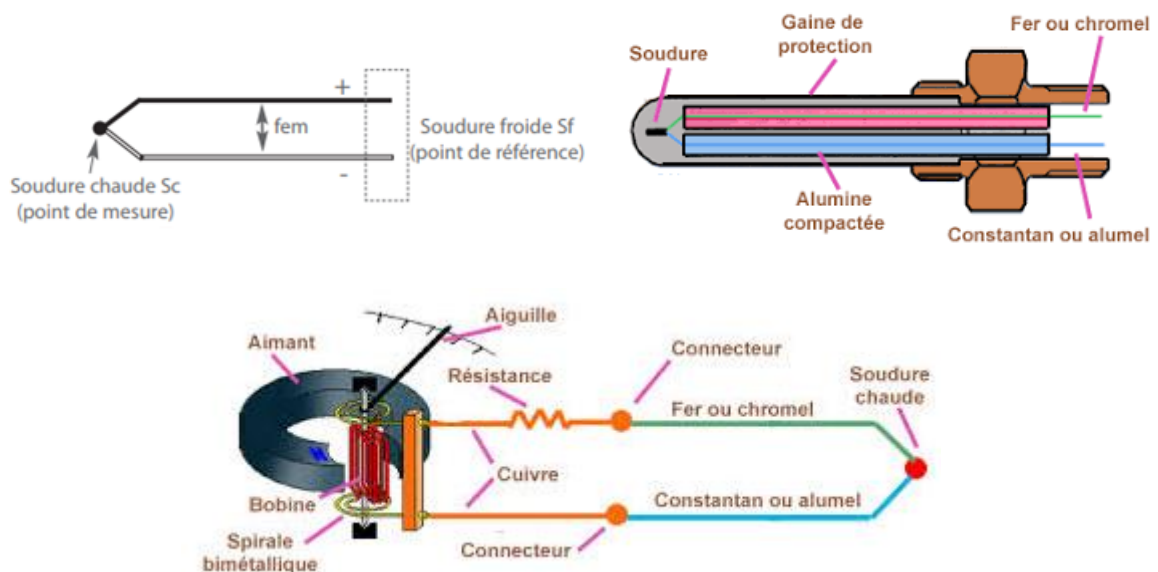


Figure 7 : Composition d'un thermocouple.

b. Conducteurs métalliques

Ces conducteurs sont sous forme de fils composés d'un seul métal ou d'alliages métalliques. Selon la norme française NF et la norme européenne EN et d'après la commission internationale d'électrotechnique IEC, les thermocouples sont classés en trois types : **T**, **J**, **K** et **S**. Les caractéristiques de chaque type sont mentionnées dans le tableau suivant :

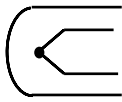
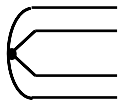
Tableau 3 : Modèles de thermocouples.

Modèles de thermocouples				
Type	Pôle positif	Pôle négatif	Etendue de mesure théorique	Couleur ⁽¹⁾ +/-
I	cuivre	cuivre-nickel	-200 à +350°C	brun-blanc
J	fer	cuivre-nickel	-200 à +750°C	noir-blanc
K	nickel-chrome	nickel- aluminium	-200 à +1000°C	vert-blanc
S	platine-rhodium	platine	0 à +1550°C	orange-blanc

(1) : suivant les normes NF EN 60 584-1 et 2, IEC 584-1 et 2

c. Soudure des fils métalliques

On distingue deux types des soudures chaudes :

Soudure chaude	Schéma descriptif	Caractéristiques
Isolée		<ul style="list-style-type: none"> - La soudure est protégée de la gaine par l'isolant. - Pas de perturbation de la fem, mais le temps de réponse sera ralenti.
Non isolée		<ul style="list-style-type: none"> - La soudure chaude est mise à la masse, sur la gaine. - Faible temps de réponse

d. Isolation des fils (gaine)

Lors de l'utilisation du thermocouple, il faut faire attention à la température maximale tolérée et estimée par le constructeur car elle affecte la stabilité thermique du l'isolant composant le thermomètre.

Le tableau ci-après donne quelques exemples d'agents isolants et leurs T_{max} correspondantes.

Tableau 4 : Exemples d'agents isolants.

Nature de l'isolant	PVC	Silicone	Kapton	Soie de verre	Fibre de verre
T_{max} (°C)	105	180	300	400	600

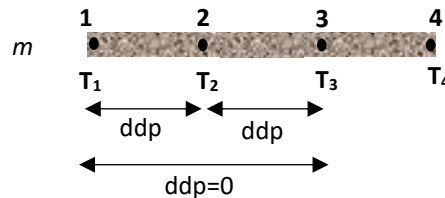
- PVC : polychlorure de vinyle

- Kapton : film de polyimide.

e. Principe du thermocouple

e-1. Effet Thompson

Si on prend un conducteur m unique et homogène, sur la longueur du fils apparaît une ddp entre deux points. Ces derniers sont à des températures différentes.



Si le courant i circule dans le sens des températures décroissantes et qu'il n'y a dégageement de chaleur, l'effet Thompson est positif ($n_A > 0$). Dans le cas contraire, on dit que l'effet Thompson est négatif ($n_A < 0$).

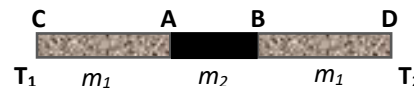
Remarque : n_A est exprimé en $\mu\text{volt}/\text{degré}$.



e-2. Loi des températures intermédiaires

La différence de potentiel (d.d.p) entre deux points **A** et **B** ne dépend que de la différence de température entre **A** et **B**. les températures intermédiaires interviennent pas.

e-3. Loi des métaux intermédiaires



Soient deux métaux distincts m_1 et m_2

- La ddp entre **C** et **D** ne dépend que des températures de **C** et de **D**.
- Si les contacts **A** et **B** de m_1 et m_2 sont à la même température, le circuit se comporte comme si m_2 n'existe pas. On peut donc intercaler dans le circuit un appareil de mesure qui permet de mesurer la ddp fournie sans erreur.

e-4. Thermocouples

Soient deux métaux m_1 et m_2 différents et homogènes reliés par soudure de leurs extrémités aux points **A** et **B**.



- Si $T_1 \neq T_2$, i prend naissance dans le circuit et par conséquent, il y a création d'une ddp.
- La force électromotrice mesurée dans le circuit est égale à la différence entre la f.e.m de la source chaude (T_2) et la f.e.m de la source froide (T_1).

$$(f.e.m)_{\text{mesurée}} = f.e.m(T_2) - f.e.m(T_1)$$

f. Avantages et inconvénients des thermocouples**• Avantages**

En plus de sa capacité à mesurer des températures de l'ordre de -300 à 2700°C, le thermocouple délivre une f.e.m dont la mesure ne nécessite pas la circulation d'un courant électrique au contraire des résistances. Il en résulte qu'il n'y a pas d'auto-échauffement (pas de consommation d'énergie) qui peut altérer les mesures aux basses températures.

• Inconvénients

- Contamination chimique : oxydation des fils. Ces derniers doivent être protégés de l'extérieur.
- Création de f.e.m parasites à cause du volume du point de soudure. Il doit être très réduit.
- Déformation mécanique des fils sous forme de pliure, torsion,...
- Transmutation dans certains alliages thermocouples tel que : platine-rhodium.

MESURE DE NIVEAU (LIMNIMETRIE)

1. INTRODUCTION

→ Le niveau représente une hauteur, une distance séparant deux plans (figure 1) :

- un plan de référence.
- un plan de séparation (interface).

→ L'interface peut exister entre :

- Liquide et gaz \Rightarrow surface libre du liquide ;
- Solide et gaz ;
- Deux liquides : non miscibles et de densité différente.

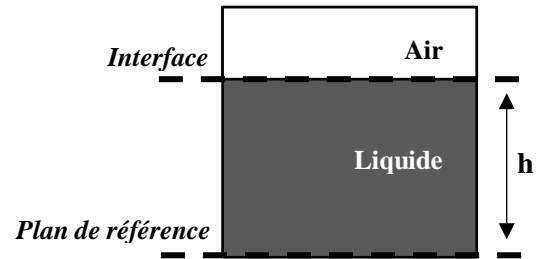


Figure 1 : Interface/plan de référence

→ La mesure du niveau s'exprime à priori en mètre (m) mais en réalité et en industrie, elle est donnée en pourcentage (%).

2. RAPPEL THEORIQUE

2-1. Pression hydrostatique (P)

C'est la pression qu'exerce l'eau sur la surface d'un corps immergé. Elle est :

- la même en tout point d'un plan horizontal.
- indépendante de l'orientation de la surface pressée.
- Elle croît progressivement avec la profondeur. Elle augmente d'environ une atmosphère par 10 mètres de profondeur.

La pression hydrostatique dans un liquide de masse volumique ρ_{liq} et à profondeur h est donnée par la relation : $P = \rho_{\text{liq}} \cdot g \cdot h$

2-2. Poussée d'Archimède (π_A)

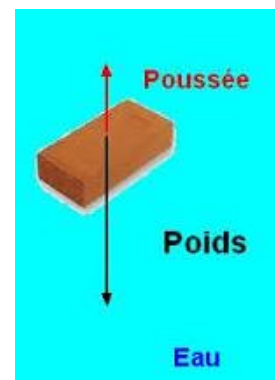
Tout corps plongé dans un liquide reçoit de la part de celui-ci une force (poussée) verticale dirigée du bas vers le haut, égale au poids du volume de liquide déplacé. Elle est définie par la relation suivante :

$\pi_A = V \cdot m \cdot g$ où :

- V : volume du liquide déplacé par le corps ;
- m : masse du liquide ;
- g : gravité terrestre (9,81 m/s²)

Remarques

- Si $\rho_{\text{liq}} > \rho_{\text{corps}} \Rightarrow$ le corps plonge vers le bas \rightarrow 1^{er} cas
- Si $\rho_{\text{liq}} < \rho_{\text{corps}} \Rightarrow$ le corps monte à la surface du liquide \rightarrow 2^{ème} cas
- Si $\rho_{\text{liq}} = \rho_{\text{corps}} \Rightarrow$ le corps flotte \rightarrow 3^{ème} cas



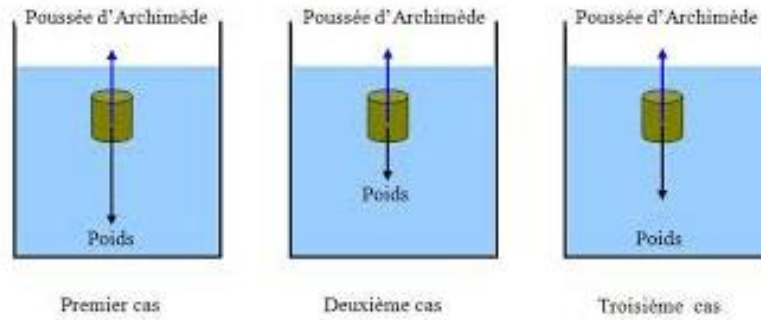


Figure 2 : Influence de la poussée d'Archimède.

3. INSTRUMENTS DE MESURE ET DE DETECTION DU NIVEAU

Les méthodes les plus employées peuvent être classées en trois familles :

- Méthodes hydrostatiques ;
- Méthodes optiques ;
- Méthodes électriques ;
- Méthodes acoustiques.

3-1. Méthodes hydrostatiques

Elles reposent sur les propriétés hydrostatiques des liquides (pression hydrostatique, poussée d'Archimède). On distingue :

3-1-1. Flotteur

a. Principe

Il se maintient à la surface du liquide, il est rendu solidaire d'un capteur de position qui délivre le signal électrique correspondant au niveau. La mesure s'apparente ensuite à la mesure d'un déplacement ou la détection d'une position.

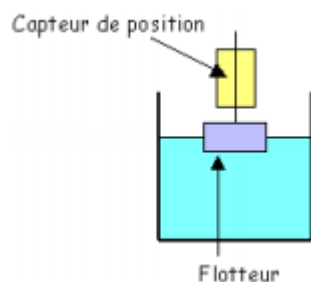


Figure 3 : Schéma simplifié de fonctionnement de flotteur.

b. Différents types de flotteurs

b-1. Flotteur à contre poids

Dans cette catégorie, le système le plus simple est constitué d'un flotteur et d'un contre poids, raccordés à un câble passant par des poulies. Le contre poids supporte un index et coulisse le long d'une règle graduée à l'extérieur du réservoir.

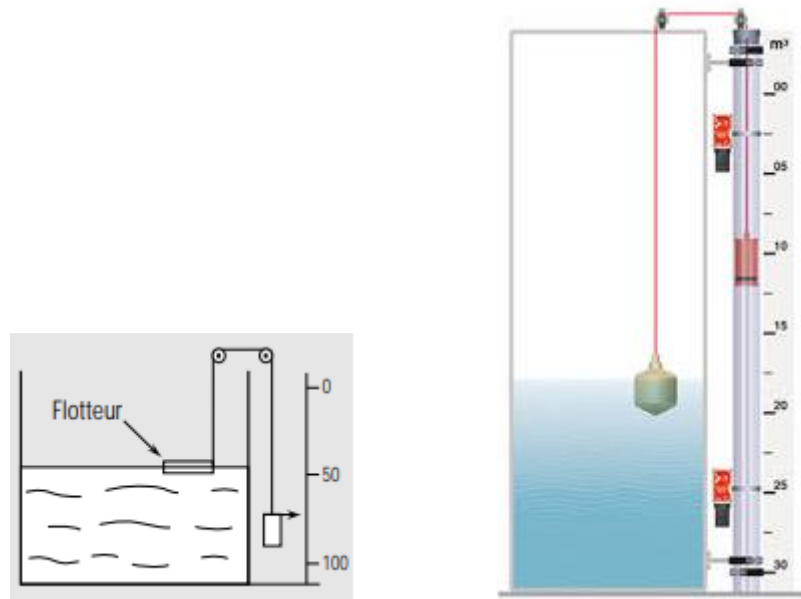


Figure 4 : Flotteur à contre-poids.

Remarques

- Notons que plus le flotteur est volumineux et moins le système est sensible aux effets (variables) du poids du câble sur l'enfoncement du flotteur dans le liquide.
- Ce genre de dispositif est très utilisé pour les bacs de stockage

b-2. Flotteur fixe

Le flotteur est en général une sphère creuse métallique. Il est soumis à la poussée d'Archimède π_A exercée par le liquide, laquelle se traduit par un déplacement du flotteur dont l'amplitude est limitée mécaniquement.



Figure 5 : Flotteur fixe.

b-3. Flotteur magnétique

Un aimant est placé dans le flotteur. Celui-ci suit les mouvements de l'interface liquide-air et coulisse à l'intérieur d'un tube ou d'une colonne de tranquillisation ou le long d'un guide.

L'aimant permanent est solidaire du flotteur ou même contenu dans celui-ci. La position du contact est généralement réglable.



Figure 6 : Flotteur magnétique.

Remarque : pour un montage vertical, le flotteur est guidé par un tube.

c. Avantages

- Ils sont utilisables aussi bien dans les réservoirs ouverts, fermés, sous pression qu'en extérieur sur les puits, canaux...
- Etendue de mesure : 10 mm à plusieurs mètres (30 m) ;
- Précision : 0,5 à 5% de l'étendue de mesure.

d. Inconvénients

- C'est une technologie qui convient mal aux liquides très visqueux susceptibles d'adhérer aux parois du flotteur, modifiant ainsi son poids et par conséquent sa profondeur d'immersion.
- La mesure peut être faussée lorsque la densité du fluide varie.

3-1-2. Plongeur

a. Principe

C'est un cylindre immergé dont la hauteur est au moins égale à la hauteur maximale du liquide dans le réservoir. Le plongeur est suspendu à un capteur dynamométrique qui se trouve soumis à une force F (poids apparent), qui est fonction de la hauteur h du liquide.



Figure 7 : Exemple d'un plongeur et son emplacement dans un réservoir.

Cet appareil se base sur le principe d'Archimède. Il subit, de la part du liquide, une force qui est dépendante du niveau d'immersion.

Remarque

Le plongeur de forme cylindrique est peu sensible aux oscillations de niveaux autour d'un point d'équilibre. Il convient aux liquides très visqueux.

b. Avantages

- Etendue de mesure : 30 cm à 6 mètres maximum
- Précision : de l'ordre de 0,5 %

3-2. Méthodes électriques

Elles utilisent les propriétés électriques des liquides dont on veut mesurer ou contrôler leur niveau.

→ Si le liquide est conducteur, on mesure un courant qui circule entre deux électrodes ;

→ Si le liquide est isolant, on mesure la capacité entre ces électrodes.

L'amplitude du courant ou la valeur de la capacité varient avec la hauteur d'électrode immergée.

Remarque :

Lorsque le réservoir est métallique, il peut lui-même jouer le rôle d'une des électrodes.

3-3-1. Niveaux conductimétrique

La sonde est formée de deux électrodes cylindriques. Elle est alimentée par une faible tension alternative de l'ordre de 10 V. L'emploi de courant alternatif permet d'éviter la polarisation des électrodes.

a. Mode de fonctionnement

La mesure de niveau se fait au moyen d'électrodes plongées verticalement dans le liquide. On mesure le courant électrique que l'on fait passer entre elles. Il est proportionnel à la hauteur d'électrode immergée. On distingue deux montages possibles :

- 1^{er} montage qui se base sur l'utilisation de deux électrodes verticales ;
- 2^{ème} montage qui repose sur l'utilisation d'une seule électrode verticale.

Par ailleurs et concernant la détection du niveau, l'opération s'effectue en plaçant une électrode au fond du réservoir (h_{\min}) et dès que le liquide arrive au niveau de l'autre électrode (h_{\max}), le courant passe.

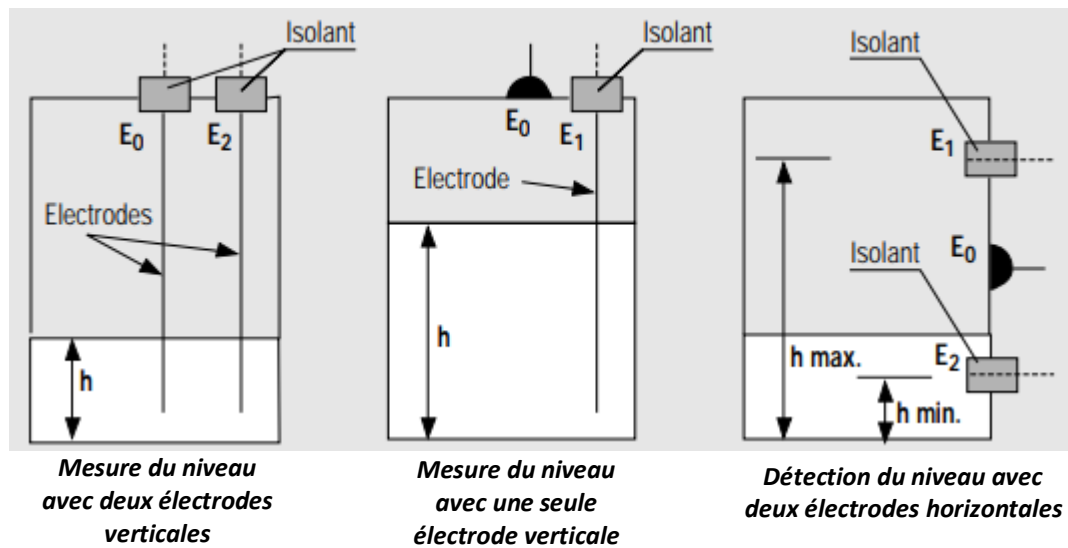


Figure 8 : Montage et fonctionnement des sondes conductimétriques.

b. Limites d'utilisation

- Ce type de niveaux est utilisable uniquement avec des liquides conducteurs. La conductance minimale est de l'ordre de 50 S ;
- Les liquides ne doivent pas être corrosifs et n'ayant pas en suspension une phase isolante (huile par exemple).
- La pression est comprise entre le vide et 160 bar et une température comprise entre -200°C et 250°C.

3-3-2. Niveaux capacitifs

Les détecteurs de niveau capacitifs sont une solution éprouvée et économique pour la mesure de niveau et la détection de niveau dans les liquides et les solides en vrac. Si le liquide est isolant, on mesure les variations de capacités entre les deux électrodes.



Figure 9 : Exemples de détecteurs de niveau capacitifs.

- **Mode de fonctionnement**

Le fonctionnement d'un capteur capacitif repose sur la variation du champ électrique dans les alentours de sa zone active. Si la plaque de condensateur située derrière la face avant est alimentée en électricité, un champ électrostatique est généré. Celui-ci réagit aux variations de capacité causées par l'apparition d'un objet. Ce principe permet de transmettre à la commande des grandeurs de mesure intéressantes pour la production, telles que des distances ou des niveaux de remplissage.

3-4. Méthodes acoustiques

3-4-1. Niveaux à ondes acoustiques

a. Principe

On place un transducteur, au sommet du réservoir, fonctionnant successivement en émetteur et en récepteur. Ce transducteur émet, dans un cône de faible ouverture, des ondes acoustiques qui après réflexion sur la surface du liquide retournent vers le transducteur qui les convertit en signal électrique.

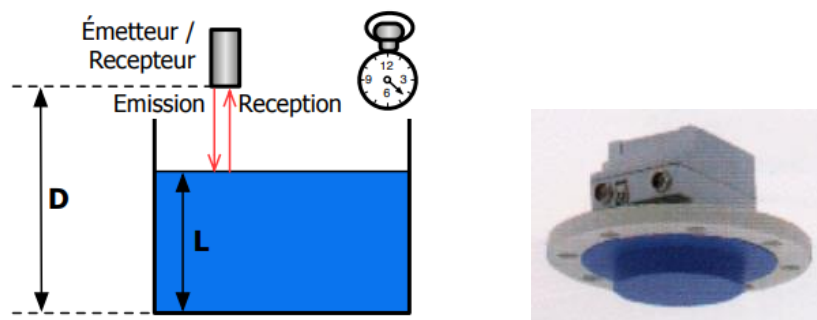


Figure 10 : Emetteur / récepteur d'ondes acoustiques.

b. Relation niveau-onde

L'intervalle de temps Δt séparant l'émission de la réception des d'ondes réfléchies est proportionnel à la distance du transducteur à la surface du liquide ($D-L$). En d'autres termes, Δt dépend de la distance L qui représente le niveau du liquide dans le réservoir (la distance D étant constante (transducteur fixe)). Ce qui nous mène à déduire que Δt est *inversement proportionnel à la célérité du son*.

Remarques :

- L'intervalle de temps Δt dépend de la température. Elle doit être mesurée afin d'effectuer les corrections nécessaires sur la valeur du niveau L .
- *Le transducteur*
 - Il est une céramique piézo-électrique pour les ondes ultrasonores.
 - Il est de type électrodynamique pour les infrasonores.

- Les ondes infrasonores sont moins atténuées par la propagation. Elles trouvent application dans la mesure de distances importantes (de 10 à 30 m).
- Les ondes ultrasonores procurent aux distances plus courtes une meilleure précision.

3-4-2. Niveaux de type Radar

Ils possèdent le même principe de fonctionnement que celui des ondes acoustiques. Ces dernières sont remplacées par des ondes électromagnétiques dont la vitesse de ces ondes est indépendante de :

- la composition du gaz ;
- la température ;
- la pression ;
- la densité.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Techniques de l'Ingénieur, Traité Mesures et Contrôle (R 2 012)
2. Michel Grout, Patrick Salaun, Instrumentation industrielle, Edition Dunod, 4^{ème} édition, Paris, 2015.
3. Sakir Amiroudine, Jean-luc Battaglia, Mécaniques des fluides, Edition Dunod, Paris, 2011.
4. M. Capot, Les principes des mesures : pressions, débits, niveaux, températures, Editions Technip, Paris, 1971.