

*Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene  
Faculté de Génie Mécanique et Génie des Procédés.*



# *Cours* Instrumentations – Capteurs.

*3<sup>ème</sup> Année Raffinage et pétrochimie - Génie des Procédés.*

**Année universitaire : 2016-2017.**

# Plan de cours

Cours →

***Instrumentations.***

- Mesures des Pressions.
- Mesures des Débits.
- Mesures de Niveau.
- Mesures de Températures

**Capteurs.**

- Physique des capteurs .
- Capteurs simples.
- Dispositifs capteurs à transductions multiples.
- Applications aux mesures à effets thermiques et électromagnétiques.

**Instrumentations.**

# Chapitre 1 : Généralités sur les appareils de mesure

## 1-1 But

Les appareils de mesure permettent de connaître certains points d'une fabrication. Ils donnent la possibilité d'agir sur le procédé de fabrication de manière à obtenir la qualité et la quantité de produits finis conformément à certaines spécifications dans les meilleures conditions de sécurité et de rendement avec un prix de revient minimum.

Pour cela les appareils donnent **une information** permettant d'effectuer des contrôles. En partant de ces contrôles on agira sur le procédé pour obtenir **la qualité** et la **quantité** escomptées. On en tirera des **bilans** et des **rendements** permettant de calculer et de corriger le prix de revient et la rentabilité du procédé.

Dans certains cas on utilise les appareils de mesure pour agir sur des servo-mécanismes , corrigeant automatiquement la marche du procédé de fabrication en fonction de certains critères établis à l'avance.

Ces dispositifs automatiques portent le nom général de [Régulation automatique ]

Nous allons traiter le domaine des mesures.

### Qu'est-ce que la mesure?

On entend par mesure l'expression d'une grandeur quelconque, elle s'exprime généralement par un nombre suivi d'un symbole : le nombre donne la valeur de la grandeur mesurée, le symbole sa nature.

Par exemple    10 kg/cm<sup>2</sup>        15 m        18 m<sup>3</sup>/h

## 1-2 Principe d'une mesure

Un appareil de mesure (de contrôle), peut être basé sur plusieurs méthodes .

Les méthodes sont :

☐ directe.

☐ Indirecte.

☐ d'opposition.

**Une** mesure est à **méthode directe** lorsque la quantité à mesurer (la variable), est évaluée par comparaison avec une grandeur connue de même valeur.

Exemple mesure d'une longueur avec un mètre étalon, un pied à coulisse .....

**Une** mesure est à **méthode indirecte** lorsque la variable est évaluée par comparaison avec une grandeur connue de nature différente, et que par l'intermédiaire d'une loi connue en revient à la valeur de la variable.

Exemple mesure de la température d'un corps par l'intermédiaire de la dilatation d'un corps donnée en fonction de la température.

Dans le cas d'une méthode d'opposition, on oppose à la variable une grandeur connue telle que leur différence soit nulle.

Exemple balance a double plateau.

**Remarque** : une mesure par opposition peut être en même temps directe ou indirecte.

### **1-3 Fonction d'un appareil de mesure**

L'appareil peut remplir une ou plusieurs fonctions qui sont:

- Indication.
- Enregistrement.
- Intégrations.
- Signalisation.
- Régulation.



## Indicateur

L'appareil est un indicateur lorsqu' il donne la mesure par l'intermédiaire d'une aiguille se déplaçant sur un cadran gradué, ou l'inverse (cadran mobile et index fixe).

## Enregistreur

Cet appareil donne la mesure par inscription sur papier (Diagramme) portant les graduation et se déroulant en fonction d'une deuxième variable (généralement le temps).

## Intégrateur

Cet appareil donne la somme des mesures instantanées.  
(les compteurs à gaz, à eau, à électrique).

Signalisation ; Ce type d'appareil donne un signal sonore, lumineux ou autre.... lorsque la variable atteint une valeur critique déterminée à l'avance.

Régulateur ; La mesure est utilisée pour commander un servo-mécanisme effectuant les corrections nécessaires pour maintenir la variable à une valeur stable choisie à l'avance.

### Remarque

Un appareil de control peut remplir une seul ou plusieurs des fonctions citées ci-dessus.

## 1-4 constitution globale d'un appareil de mesure

En générale il se compose de trois élément principaux :

- Élément primaire.
- Élément secondaire.
- Élément final.

### Élément primaire

C'est l'élément sensible capable de recueillir une énergie au sein de la variable à mesurée.

### Élément secondaire

Transforme en général l'énergie prise par l'élément primaire en un travail mécanique, ou un déplaçant.

### Élément final

Transforme en général la mesure en une indication exploitable.

[Cette constitution n'est que schématique , parfois l'ordre ci-dessus est modifié, on peut trouver un ou plusieurs éléments intermédiaires placés avant ou après l'élément secondaire pour rendre la mesure linaire.]

## 1-5 Qualités d'un appareil de mesure

La qualité d'un appareil de mesure est l'ensemble des données qui caractérisent la qualité de la mesure effectuée par l'appareil considéré.

Un appareil de mesure doit présenter les qualités suivantes :

- Étendue de mesure.

- La résolution.

- La sensibilité.

- L'exactitude.

- La justesse.

- La fidélité.

- La précision.

Étendue de mesure La gamme de mesure, c'est l'ensemble des valeurs du mesurande pour lesquelles un instrument de mesure est supposée fournir une mesure correcte. L'étendue de mesure correspond à la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale de la gamme de mesure.

La résolution C'est la plus petite variation de la grandeur mesurée qui produit une variation perceptible de l'indication délivrée par l'instrument. Elle peut être exprimée en points, qui sont alors le nombre de valeurs différentes que l'instrument peut afficher. Par exemple un multimètre de 2000 points pour une étendue de 2 V peut afficher toutes les valeurs comprises entre 0,000 V et 1,999 V, sa résolution est donc de 1 mV.

La sensibilité La sensibilité est un paramètre exprimant la variation du signal de sortie d'un appareil de mesure en fonction de la variation du signal d'entrée.

Un appareil est d'autant plus sensible qu'une petite variation de la grandeur à mesurer provoquera un changement plus grand de l'indication donnée par l'appareil de mesure.

## La justesse l'exactitude et la fidélité.

On peut représenter symboliquement la fidélité, la justesse et l'exactitude de la manière suivante :



Dans le **premier** cas, les mesures sont proches les unes des autres (bonne fidélité) mais en dehors de la zone de probabilité de la valeur vraie (mauvaise justesse).

Dans le **deuxième** cas, les mesures sont au contraire bien dans la zone où se trouve la valeur vraie (bonne justesse) mais bien que bonnes, les mesures sont dispersées entre elles (mauvaise fidélité). Le **dernier** cas présente des mesures justes (dans la zone de la valeur vraie) et fidèles (proches les unes des autres). C'est le cas d'un bon appareil de mesure.

## La précision.

Un appareil de mesure est précis quand il indique avec le minimum d'erreur la valeur vraie de la variable.

## 1-6 Caractéristiques d'étalonnage

L'étalonnage statique d'un appareil est déterminé par trois critères principaux :

- Le zéro.
- L' échelle.
- La linéarité.

Le zéro : On appelle zéro d'un appareil de mesure la valeur de l'indication qui correspond à une valeur nulle ou minimal de la variable.

L' échelle: Si un appareil est gradué d'un minimum  $m$  à un maximum  $M$  l' échelle va de  $m$  à  $M$ .

Linéarité: Un appareil de mesure est linéaire lorsque, étant juste à zéro et en étendue, la variable prend les valeurs de 25 %, 50 % et 75% de l' étendue, l'indication prend les mêmes valeurs de 25 %, 50 % et 75% de l' étendue.



## **Métrologie**

La métrologie est la sciences de la mesure qui définit les principes et les méthodes permettant de garantir et maintenir la confiance envers tout processus de mesure.

Elle permet d'attribuer à une propriété particulière des objets, matériaux ou phénomènes, une valeur exprimée en nombre.

### **La grandeur physique (X)**

C'est le paramètre qui doit être contrôlé lors de l'élaboration d' un produit ou son transfert. Exemple : Pression, Température.....

**Le mesurage** C'est l' ensemble des opérations ayants pour but de déterminer la valeur d' une grandeur physique.

## La mesure (x)

C' est l'évaluation d'une grandeur par comparaison avec une autre grandeur de même nature prise par unité.

Exemple: une longueur de 3 m, une masse de 150g.

## L'incertitude (dx)

Le résultat de mesure (x) est entaché d'erreur. Pour exprimer correctement ce résultat, il faut évaluer cette erreur.

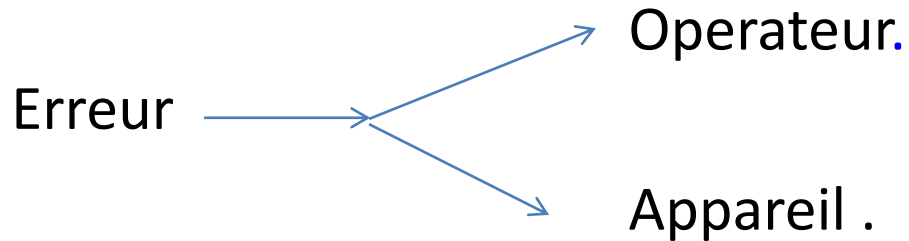
$$x - d x \leq X \leq x + d x$$

valeur vraie

On peut définir l'incertitude relative :

$$[In (x)] (\%) = (d x / x ) * 100$$

## Origine d'erreur



## Systeme d'unités internationales et ses symboles.

Grandeurs physiques fondamentales. (7)

Tableau 1 : Unités de base

Grandeur		Unité	
Nom	Symbole	Nom	Symbole
Longueur	L	mètre	m
Masse	M	kilogramme	kg
Temps	t	seconde	s
Courant électrique	i	ampère	A
Température	T	kelvin	K
Quantité de matière	n	mole	mol
Intensité lumineuse	J	candela	cd

## Grandeurs dérivées

Sont fonction des grandeurs fondamentales.

Vitesse = Distance / Temps.

Exemples:

Force  $\longrightarrow$  Newton =  $\text{kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2$ .

Pression  $\longrightarrow$  Pascal =  $\text{N} / \text{m}^2 = \text{kg} / (\text{m} \cdot \text{s}^2)$ .

Énergie  $\longrightarrow$  Joule =  $\text{N} \cdot \text{m}^2$

Puissance  $\longrightarrow$  Watt =  $\text{J} / \text{s}$

### Autres systèmes d'unités.

Le système SI est le seul système d'unité légal à travers le monde, cependant d'autres systèmes d'unités existent.

Exp : Sys (CGS)  $\longrightarrow$  Centimètre, Gramme, Seconde.

### **Système anglais :**

Longueur : Foot (ft) = 0,305 m.

Masse : livre (lb) = 0,454 kg.

Température : Rankin ( $^{\circ}\text{R}$ ) =  $- 491,67^{\circ} \text{C}$ .

Temps : seconde.

Mesures des Pressions.

## Définition

La pression est une grandeur dérivée du SI. Elle est définie comme le quotient d'une force par une surface.

$$P_{(pa)} = F_{(N)} / S_{(m^2)}$$

## Différentes unités de pression

L'unité légale du SI est le pascal (N/m<sup>2</sup>). Les autres unités sont

0	100 000	pascal
0	1	bar
0	10,194	m d'eau
0	751,9	mm de Hg (Torr)
0	14,5	psi

# Différentes pressions

## Pression atmosphérique

Est la force exercée par l'atmosphère sur une unité de surface de la Terre. À un endroit précis, la force de pression est égale à la force exercée par une colonne d'air, de surface unitaire, partant du sol et allant jusqu'au sommet de l'atmosphère.

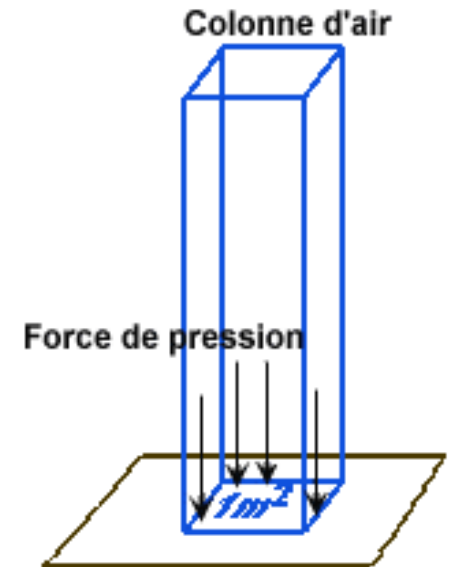
La pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer, à 15 °C, est d'environ 1013 mbar.

Elle peut varier avec la pluie ou le beau temps.

Elle est fonction de l'altitude (hydrostatique).

## Pression relative

Est la différence de pression par rapport à la pression atmosphérique. Elle est le plus souvent utilisée, car la plupart des capteurs, sont soumis à la pression atmosphérique.



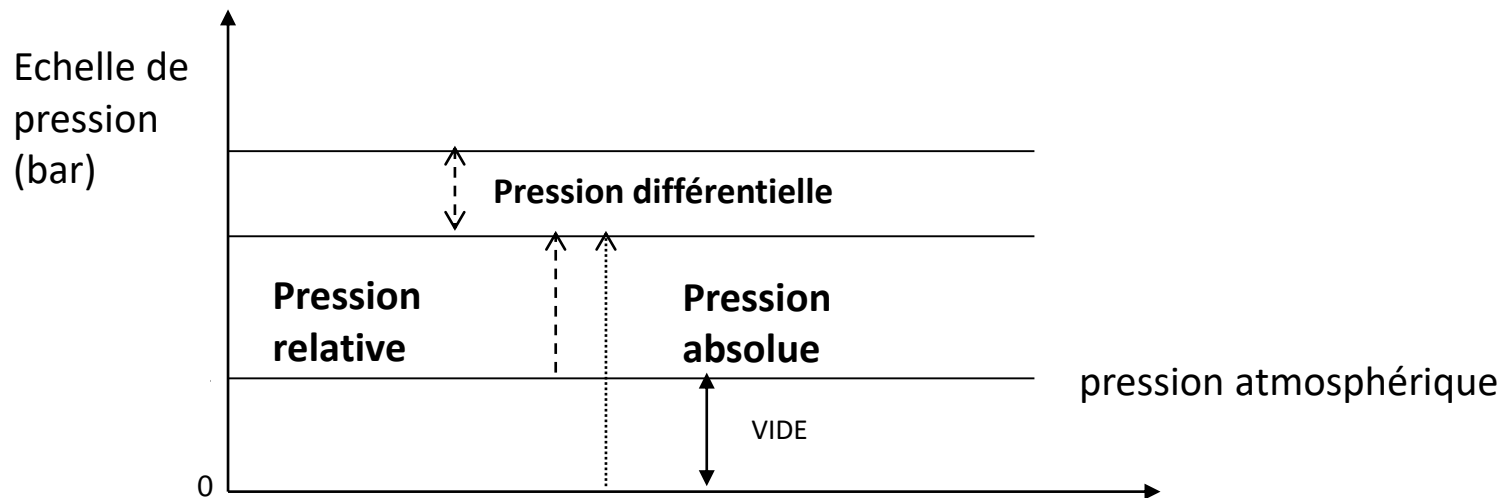


## Pression différentielle

Est la différence entre deux pressions, dont l'une sert de référence. Une pression différentielle peut prendre une valeur négative.

## Pression absolue

Est la pression mesurée par rapport au vide parfait. Le vide : Il 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.



# Instrument de mesure.

La mesure de la pression est basée sur deux principes :

Statique des fluides.

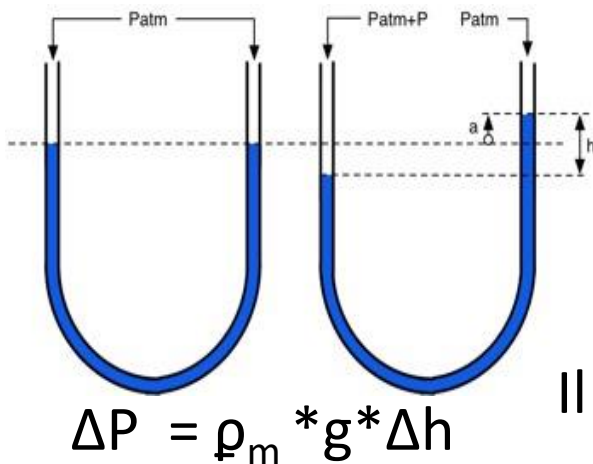
Déformation de solides.

## Manomètre basé sur la statique des fluides

- Manomètre à tube en U

La différence d'altitude  $h$  du liquide manométrique, entre les deux cotés d'un même tube en U, donne une mesure de la  $\Delta P$  entre les deux extrémités du tube.

**Rq:** un diamètre de 8 (5) mm peut être considéré comme un minimum (pour éviter le phénomène de capillarité).



### La sensibilité

$$S = \Delta h / \Delta P$$

Si  $\Delta P$  varie faiblement.

Il faut changer le liquide.

Aucun  $\Delta h$  n'est observée.

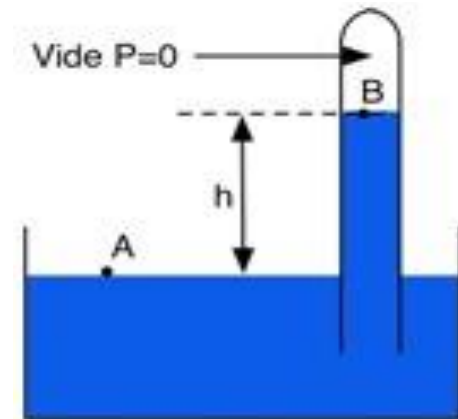
Manomètre insensible.

Pour augmenter la sensibilité des manomètres à tube en U, on peut:

- ❑ Changer le liquide manométrique (moins dense).
- ❑ Incliner une des branches.  $\rightarrow S = 1/\rho_m * g * \sin \alpha$
- ❑ On utilise un manomètres à réservoir (à branche de section différente).
- ❑ On utilise les deux propositions.

## *Mesure de la pression atmosphérique*

**Baromètre de Torricelli** : C'est un tube en verre d'environ 90 cm de longueur, rempli de mercure, clos à une extrémité : la hauteur  $h$  fournie une mesure de la pression atmosphérique. Pour une pression atmosphérique de 1013 mbar,  $h = 0,7993$  m.



# *Avantages et inconvénient des manomètres à tubes*

## *Avantages :*

- ☐ Bonne précision et bonne stabilité.
- ☐ Construction simple et peu coûteuse.

## *Inconvénients :*

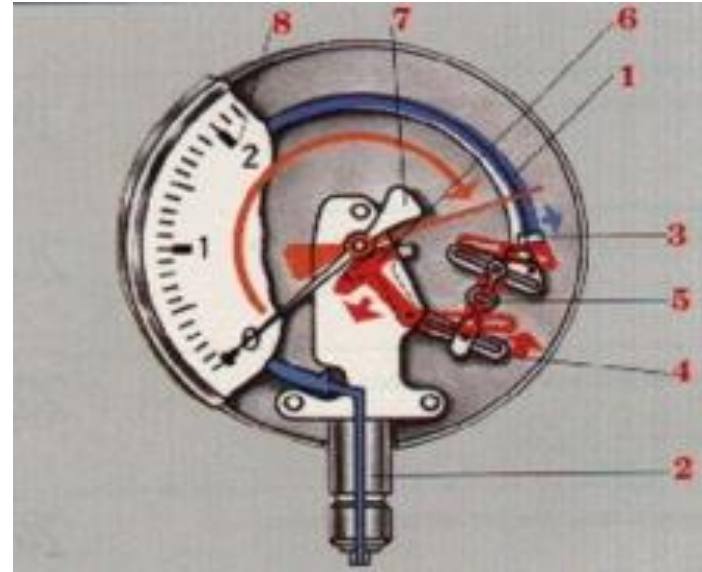
- ☐ Encombrant et fragile.
- ☐ Ils sont sensibles à la température et aux vibrations.
- ☐ Les tubes doivent être parfaitement calibrés.
- ☐ Les liquides visqueux, malpropres, les tubes gras, sont des causes d'erreurs.
- ☐ Ne traduisent pas la pression mesurée en un signal analogique exploitable en régulation industrielle.

## *Domaine d'utilisation*

- ☐ Mesure des pressions absolues, relatives ou différentielles jusqu'à deux bars.
- ☐ Réservé plutôt pour des usages en laboratoire ou comme appareils étalons.

# *Manomètres à déformation de solide*

## *Manomètre à tube de Bourdon*



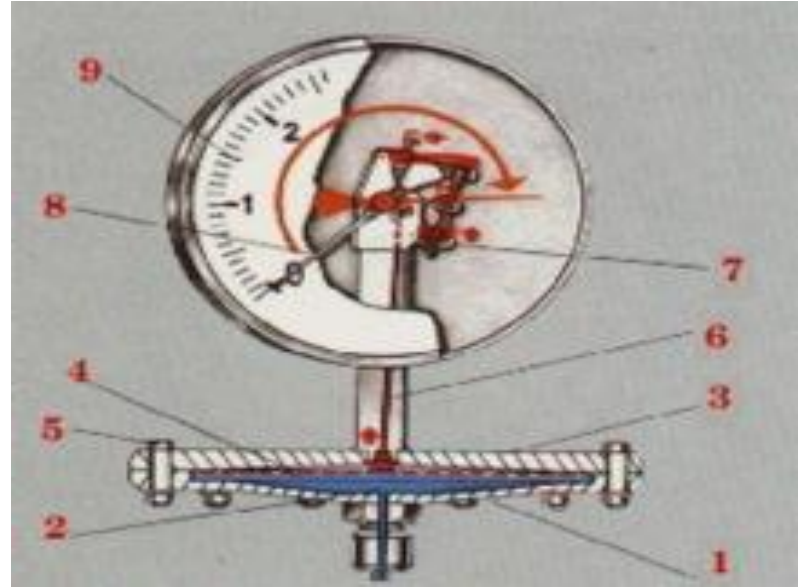
1. Organe moteur, tube de Bourdon.
2. Support de tube.
3. Capuchon du tube.
4. Secteur denté.
5. Bielle.
6. Engrenage.
7. Aiguille.
8. Cadran.

# *Utilisation*

Les manomètres à tube de Bourdon sont utilisés pour la mesure de pressions de fluides gazeux ou liquides, à condition que ceux-ci ne soient ni hautement visqueux ni cristallisant. La gamme de mesure s'étale sur la plage de 0,6 bar à 4 kbar.

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. Le tube de Bourdon ne permet pas de mesurer les phénomènes rapides de pression. L'incertitude de mesure varie de 0,02 à 0,2 pour le domaine de mesure de 0 à 3 kbar.

# Manomètre à membrane



1. Bride inférieure.
2. Chambre de pression.
3. Bride supérieure.
4. La membrane.
5. Vis.
6. Engrenage.
7. Aiguille.
8. Cadran.

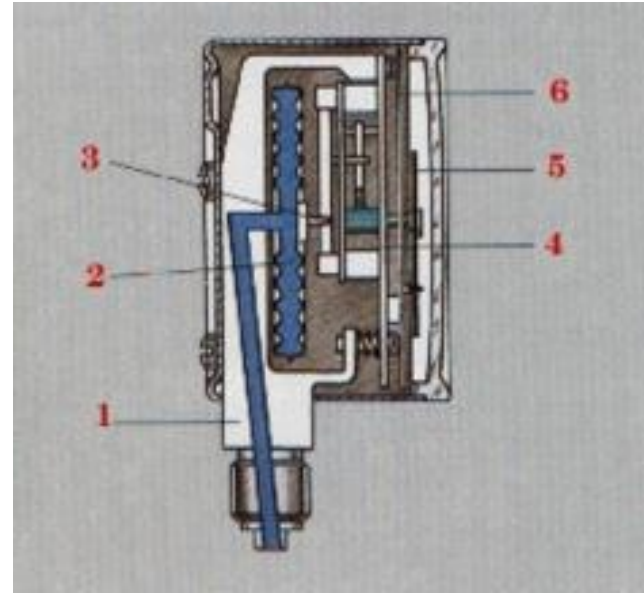
## *Utilisation*

Les manomètres à membrane sont utilisés principalement pour la mesure de faibles pressions de fluides gazeux ou liquides. La gamme de mesure possible s'étale sur la plage de 16 mbar à 40 bar. 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.

Les appareils sont fabriqués avec un montage de membrane horizontal (à angle droit par rapport au cadran) ou vertical (parallèle par rapport au cadran).



## *Manomètre à capsule*

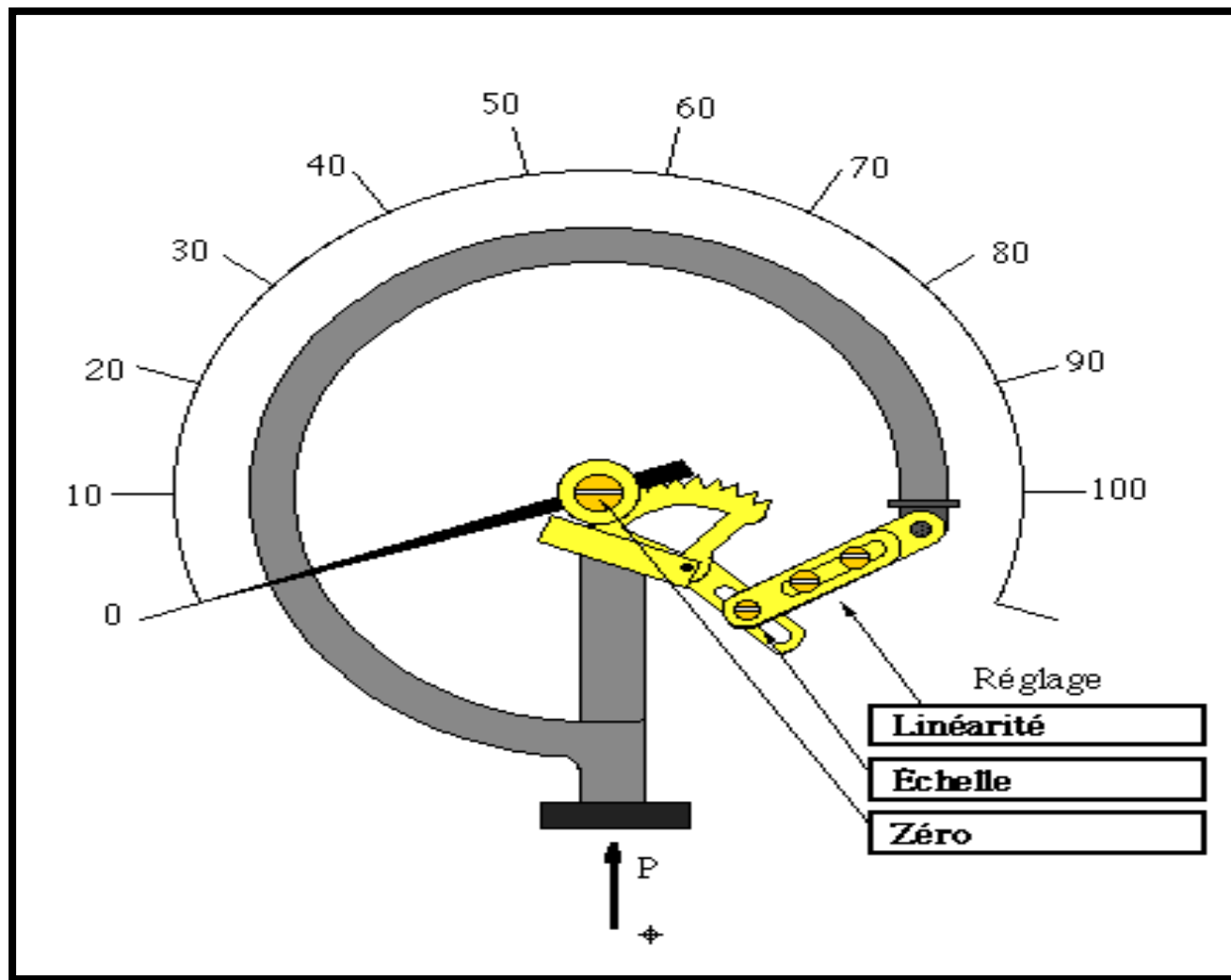


1. support de l'organe moteur.
2. Organe moteur, la capsule.
3. Bielle.
4. Mouvement.
5. Aiguille.
6. Cadran.

## *Utilisation*

Les manomètres à capsule sont utilisés pour la mesure de faibles et très faibles pressions, spécialement pour des fluides gazeux. La gamme de mesure possible s'étale sur toute la plage de 2,5 mbar à 600 mbar.

Les organes moteurs à capsule sont une forme spéciale de membrane. Ils comportent deux membranes ondulées concentriquement, assemblées de façon étanche en une capsule. 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.



# ***MESURE DES DEBITS***

## *Définition*

Le débit est habituellement mesuré par déduction, en mesurant la vitesse moyenne à travers une section connue.

Le débit mesuré par cette méthode indirecte est le débit volumique  $Q_v$  tel que  $Q_v = S \cdot V$

$S$  est la surface de section de la conduite en  $m^2$

$V$  est la vitesse moyenne du fluide en  $m/s$

Le débit volumique  $Q_v$  est le volume de fluide écoulé pendant l'unité de temps en  $(m^3/s)$

Le débit massique  $Q_m$  est la masse de fluide écoulée pendant l'unité de temps en  $(kg/s)$

En appelant  $\rho$ , la masse volumique du fluide (en  $kg/m^3$ ) :

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

Les liquides peuvent être considérés (à température constante) comme incompressibles, c'est à dire que leur volume ne dépend pas de la pression. Ce n'est pas le cas des gaz et des vapeurs pour lesquels la masse volumique est proportionnelle à la pression (gaz assimilé à un gaz parfait). On peut donc considérer que, à température constante, le débit massique d'un liquide est proportionnel à son débit volumique. Pour un gaz, il n'y a proportionnalité qu'à pression et température constante. La plupart des débitmètres indiquent le volume écoulé par unité de temps, ce sont des débitmètres volumiques.

Toutefois, dans certaines applications nécessitant la connaissance de l'énergie thermique d'un combustible, il est nécessaire de connaître le débit massique. On a recours alors à des débitmètres massiques, dont la valeur mesurée est directement le débit massique.

Cependant, bon nombre de débitmètres prétendument " massiques ", déduisent le débit massique à l'aide de l'équation (1).

# Mesure de débit

Mesure des débits volumiques des fluides par mesure de la vitesse du fluide

## 1-Débitmètre électromagnétique

Il utilise la loi de Faraday : Quand un conducteur rectiligne se déplace dans un champ magnétique, une force électromotrice est induite dans ce conducteur. Un champ magnétique est créé par deux enroulements inducteurs placés de part et d'autre d'un même diamètre de la canalisation. Le conducteur est le fluide lui-même, il circule dans une canalisation isolée électriquement à l'intérieur.



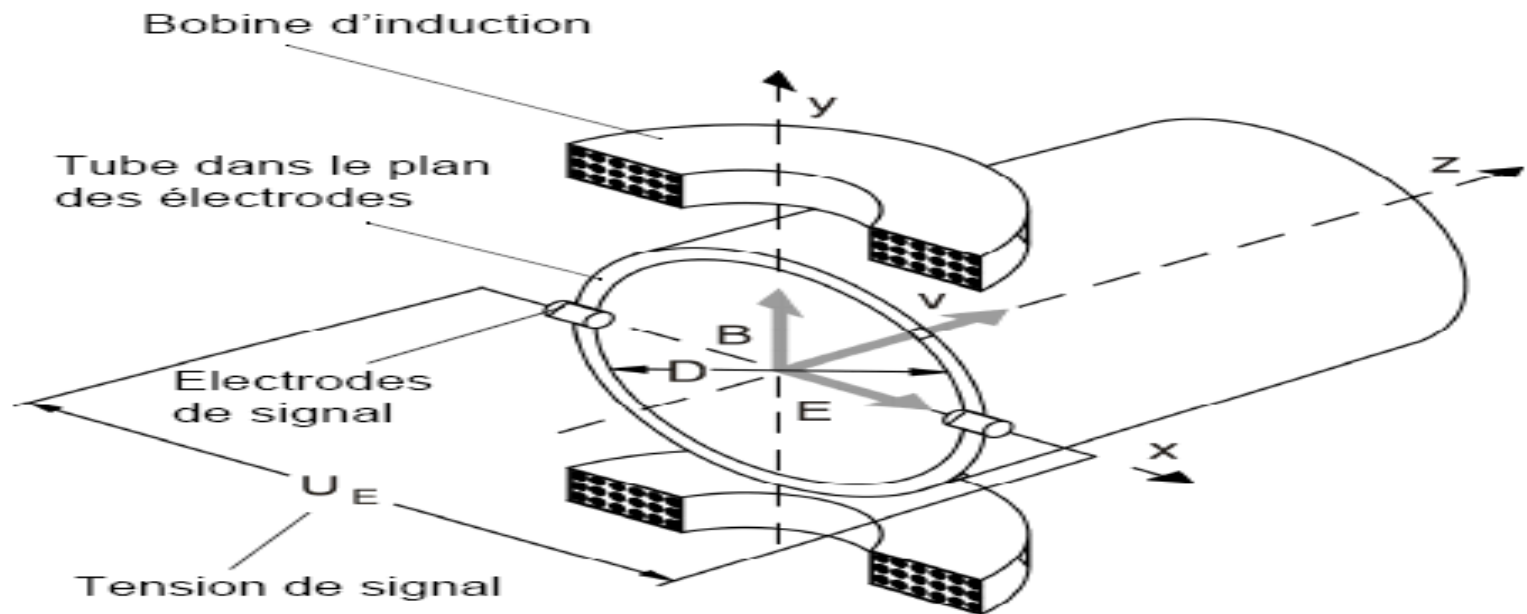
La force électromotrice est mesurée par deux électrodes au contact avec le liquide qui est placées aux deux extrémités d'un diamètre perpendiculaire aux lignes d'induction. La force électromotrice mesurée est proportionnelle à la vitesse moyenne du liquide, donc au débit volumique du liquide.

**Domaine d'utilisation** : liquide visqueux, pâteux, chargés d'impuretés ou très corrosifs à condition qu'ils soient conducteurs de l'électricité (ce qui n'est pas le cas des hydrocarbures).

***Diamètre de canalisations*** : 3 mm à 3 m

Bonne précision de l'ordre de 1 % (limitée pour les faibles vitesses d'écoulement)

Mesure ne dépendant pas des caractéristiques physique du liquide (viscosité, densité, granulométrie) et possible à haute température (450 °C) et haute pression (1000 bars)



$U_E$  = Tension de signal  
 $B$  = Induction magnétique  
 $D$  = Espacement des électrodes  
 $v$  = Vitesse moyenne de débit  
 $q_v$  = Débit volumique

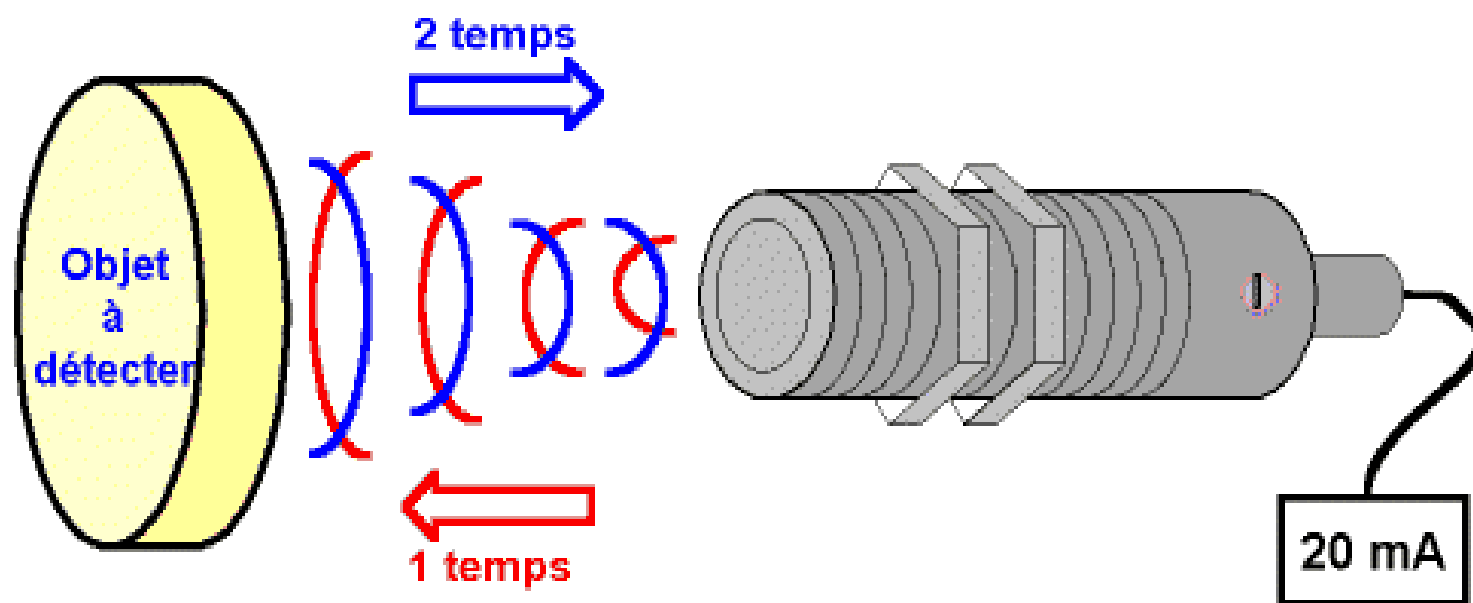
$$U_E \cdot B \cdot D \cdot v$$

$$q_v = \frac{D^2 \pi}{4} \cdot v$$

$$U_E \sim q_v$$

## *2-Débitmètre à ultrasons*

Un émetteur et un récepteur sont montés en opposition de manière à ce que les ondes acoustiques allant de l'un à l'autre soient à  $45^\circ$  par rapport au sens d'écoulement dans la conduite. La vitesse du son allant de l'émetteur au récepteur constitue la vitesse intrinsèque du son, plus un apport dû à la vitesse du fluide. La mesure du temps  $t$  mis par le signal pour parcourir la distance  $L$  permet de connaître la vitesse du fluide et d'en déduire le débit.



- Il est primordial que le fluide ne véhicule pas de solide, pour éviter la dispersion des ondes acoustiques entre les deux transducteurs. L'ensemble du dispositif, à l'extérieur de la conduite, est insensible à l'agressivité du fluide et n'entraîne aucune perte de charge.
- **Domaine d'utilisation** : fréquemment utilisé pour les écoulements turbulents, pour les fluides non conducteurs (notamment hydrocarbures), là où les débitmètres électromagnétiques ne conviennent pas.
- Diamètre de canalisations : généralement important (6000 mm).
- Précision : peut atteindre 0,5 % .
- Temps de réponse très rapide, jusqu'à 1 ms.

### *3-Débitmètre à turbine*

- L'écoulement du fluide entraîne la rotation d'une turbine (rotor à plusieurs ailettes, reposant sur des paliers) placée dans la chambre de mesure, la vitesse de rotation du rotor est proportionnelle à celle du fluide, donc au débit volumique total. La vitesse de rotation est mesurée en comptant la fréquence de passage des ailettes détectée à l'aide d'un bobinage (un aimant permanent est parfois solidaire de l'hélice). Chaque impulsion représente un volume de liquide distinct.
- *Domaine d'utilisation* : compatible avec de nombreux liquides (rotor en acier inoxydable).

Toutefois la propreté du liquide est essentielle, afin de ne pas encombrer les paliers de butée du rotor qui peut tourner à haute vitesse. De par leur principe ils sont réservés aux fluides peu visqueux. Ils sont destinés aux applications industrielles générales (carburants, eau, gaz liquéfiés, alcools, acides, liquides cryogéniques....).

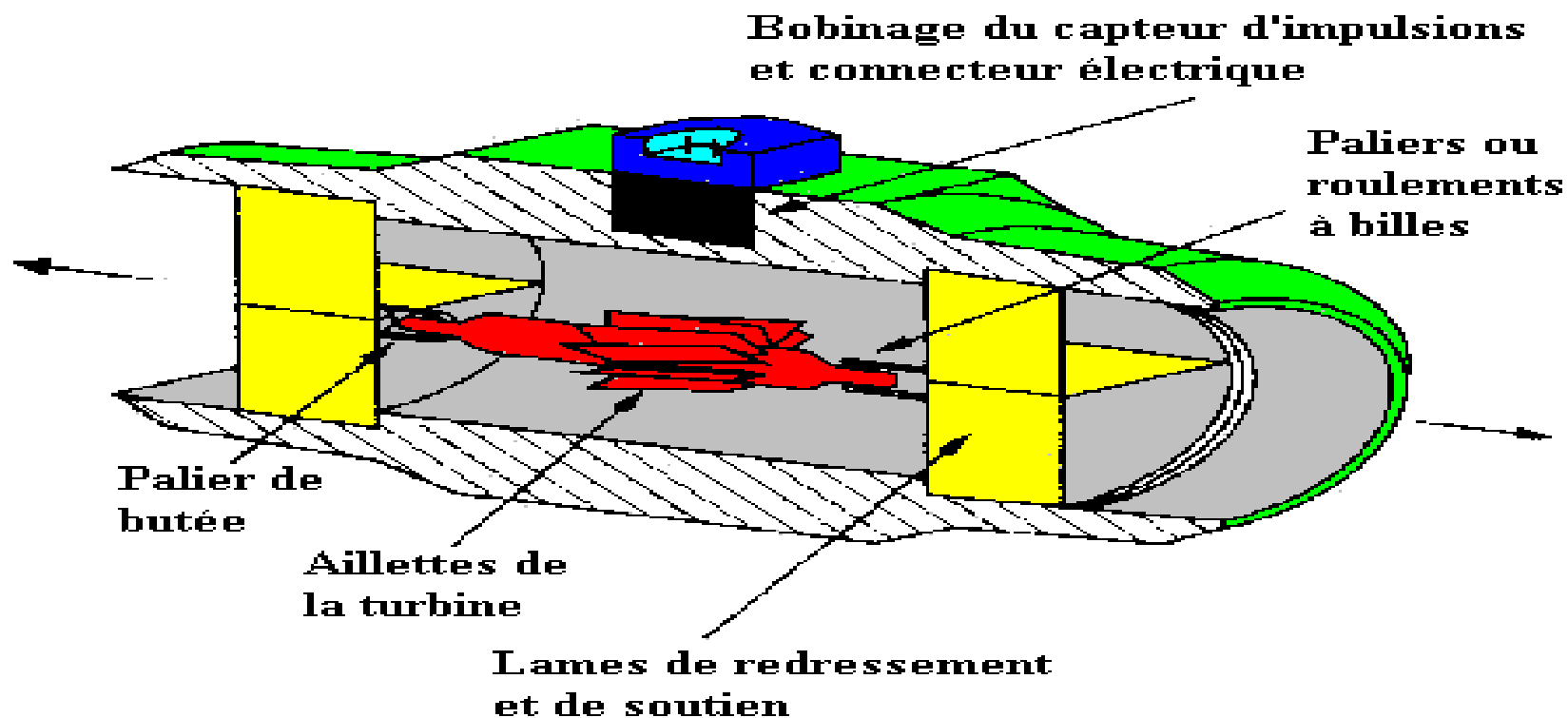
**Diamètre de canalisations** : 10 mm à 30 cm environ.

**Précision** : 0,2 à 2 % de la gamme de mesure, selon les appareils.

**Temps de réponse** : plusieurs millisecondes.

**Gamme de mesure**: de 25 L/h à 10 000 m<sup>3</sup>/h.

**Perte de charge** non-nulle ( $\approx 15$  kPa).



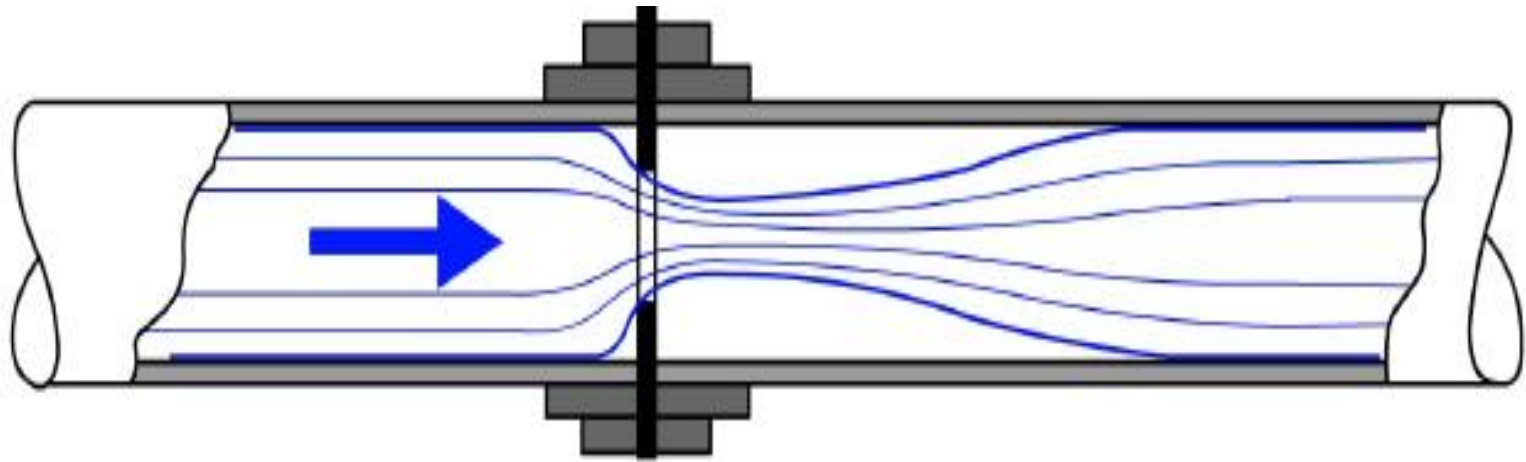


## *4-Débitmètres à organe déprimogène*

- Il s'agit de créer au sein de la canalisation une restriction localisée de la section qui engendrera une différence de pression statique dont la mesure nous permettra d'en déduire le débit.
- Les débitmètres à pression différentielle sont les plus anciens appareils de mesure de débit.
- Les premières études scientifiques furent réalisées au début du 17<sup>ème</sup> siècle par Castelli et Torricelli puis par Bernoulli en 1738 qui établit sa célèbre équation de conservation de l'énergie.

## *4-1- Diaphragme*

Il s'agit d'un disque percé en son centre, réalisé dans le matériau compatible avec le liquide utilisé. Le diaphragme concentrique comprime l'écoulement du fluide, ce qui engendre une pression différentielle de part et d'autre de celui-ci. Il en résulte une haute pression en amont et une basse pression en aval, proportionnelle au carré de la vitesse d'écoulement. C'est le dispositif le plus simple, le moins encombrant et le moins coûteux.

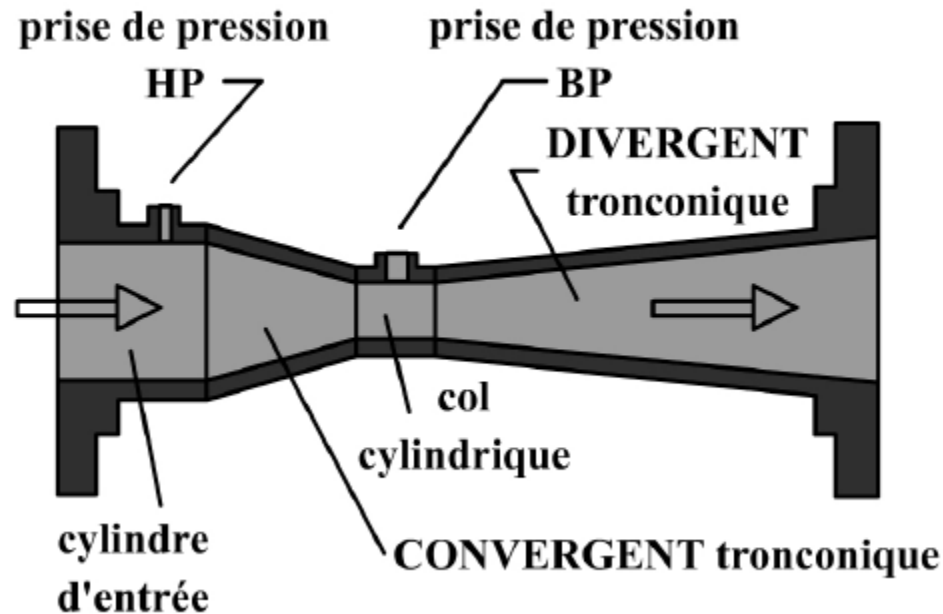


- Domaine d'utilisation : ne convient pas aux liquides contenant des impuretés solides car celles-ci peuvent s'accumuler à la base du diaphragme.
- Perte de charge importante.
- Diamètre de canalisation : tous diamètres disponibles.
- Précision : 2 à 5 %

## 4-2. Tube de Venturi

Il est constitué d'un tronc de cône convergent, d'un col cylindrique et d'un tronc de cône divergent. Le dispositif offre une bonne précision, mais reste coûteux et encombrant. Il dispose d'un bon comportement du point de vue perte de charge, usure et encrassement. Comme avec le diaphragme, les mesures de pression différentielle sont converties en débit volumique.

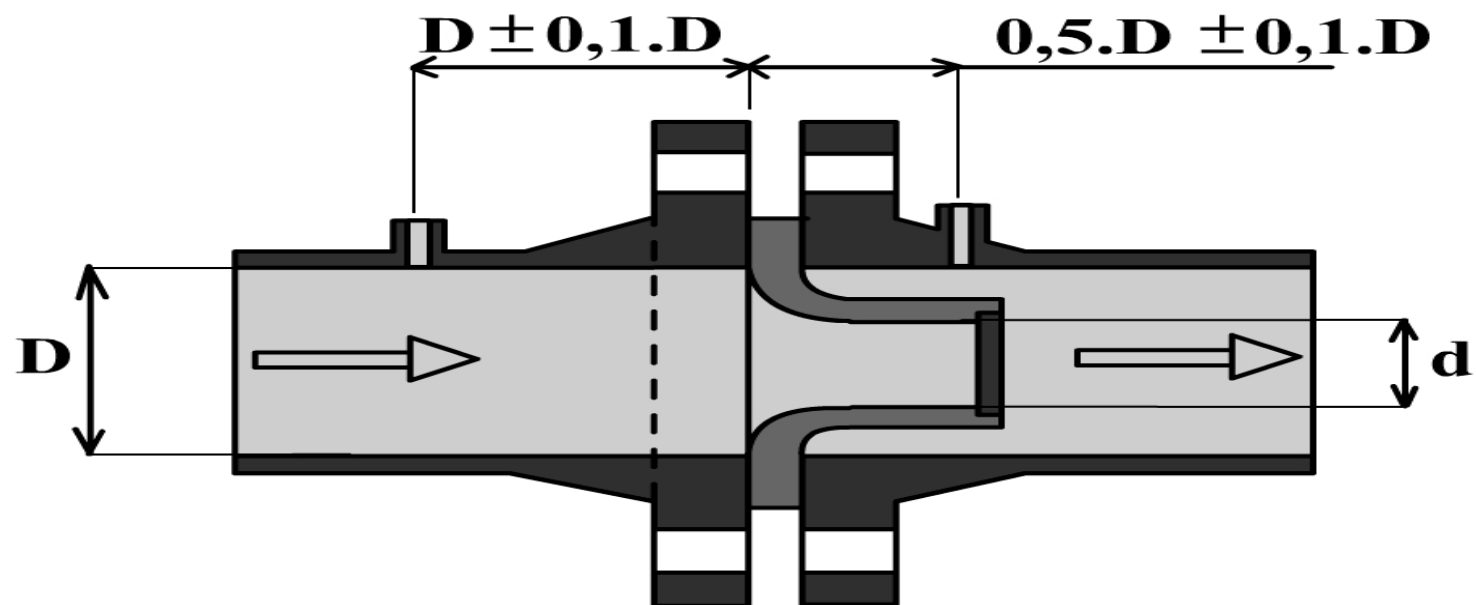
Domaine d'emploi : liquide propre, gaz et vapeur .  
Précision : 0,5 à 3 % selon les cas



## 4-3. Tuyère

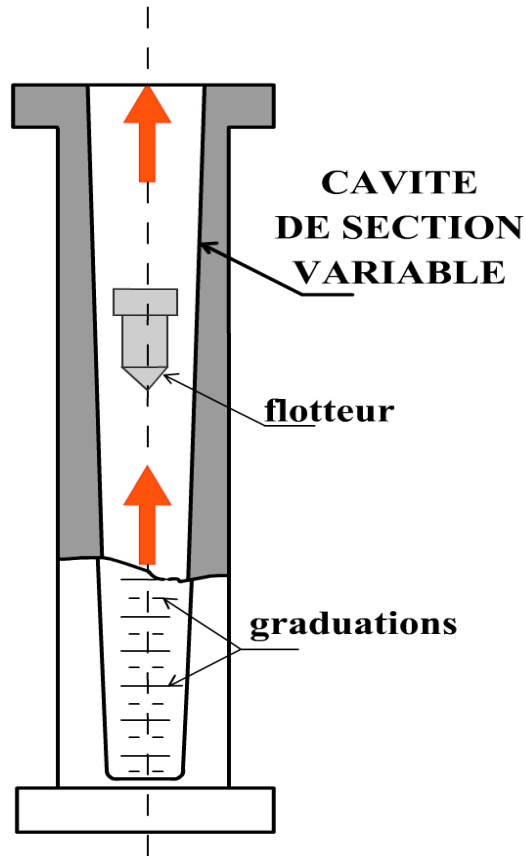
Elle est considérée comme une variante du tube de VENTURI. L'orifice de la tuyère constitue un étranglement elliptique de l'écoulement, sans section de sortie rétablissant la pression d'origine. Les prises de pression sont situées environ  $\frac{1}{2}$  diamètre de la conduite en aval et 1 diamètre la conduite en amont.

- La perte de charge se situe entre celle d'un tube de VENTURI et celle d'un diaphragme.
- Domaine d'utilisation : pour les turbulences importantes ( $Re > 50000$ ), notamment dans les écoulements de vapeur à haute température. Ce dispositif est inutilisable pour les boues .
- Précision : 1 à 3 %



## 5. Rotamètre

Il est constitué d'un petit flotteur placé dans un tube conique vertical.





- Le diamètre du tube en verre étant plus grand en haut qu'en bas, le flotteur reste en suspension au point où la différence de pression entre les surfaces supérieure et inférieure équilibre le poids. Une encoche dans le flotteur le fait tourner sur lui-même et stabilise sa position. Le repérage de la position du flotteur se fait par lecture directe sur le tube en verre qui est muni de graduations ou par l'intermédiaire d'un couplage optique entre le flotteur et l'extrémité du tube. Il introduit une perte de charge qui est fonction du débit et doit être étalonné dans ses conditions d'emploi.
- Domaine d'utilisation : Il ne tolère pas de haute pression (20 bars au maximum pour les modèles en verre).
- Diamètre de canalisation : 4 à 125 mm
- Précision : 2 à 10 % de la gamme de mesure

## Calculs et incertitude

Lorsqu'on additionne (ou qu'on soustrait) deux valeurs qui ont une incertitude, pour trouver l'incertitude de la réponse, on doit additionner les incertitudes absolues des deux valeurs.

### Exemple :


$$\Delta L = L_f - L_i$$

$$L_f = 0,0385 \pm 0,0007 \text{ m}$$

$$L_i = 0,0113 \pm 0,0009 \text{ m}$$

---

$$0,0272 \pm 0,0016 \text{ m}$$

Comme une incertitude ne peut pas avoir plus qu'un chiffre significatif : 0,002 m donc il reste 3 chiffres après la virgule  je dois grader aussi 3 chiffres après la virgule pour la valeur 0,028 m.

Le résultat s'écrit finalement :

$$0,028 \pm 0,002 \text{ m}$$

## *Calculs et incertitude*

Lorsqu'on multiplie (ou qu'on divise) deux valeurs qui ont une incertitude, pour trouver l'incertitude de la réponse, on doit **additionner** les incertitudes **relatives** des deux valeurs.

**Exemple :** une vitesse

$$\Delta V = \Delta L / \Delta t = (0,028 \pm 0,002 \text{ m}) / (0,041 \pm 0,001 \text{ s}) = 0,683 \pm ?? \text{ m / s}$$

$$[(0,002 / 0,028) + (0,001 / 0,041)] * 0,683 = 0,06544423 \text{ m / s}$$

Comme une incertitude ne peut pas avoir plus qu'un chiffre significatif : 0,07 m / s donc il reste 2 chiffres après la virgule → je dois grader aussi 2 chiffres après la virgule pour la valeur 0,68 m / s.

Le résultat s'écrit finalement :

$$0,68 \pm 0,07 \text{ m / s}$$

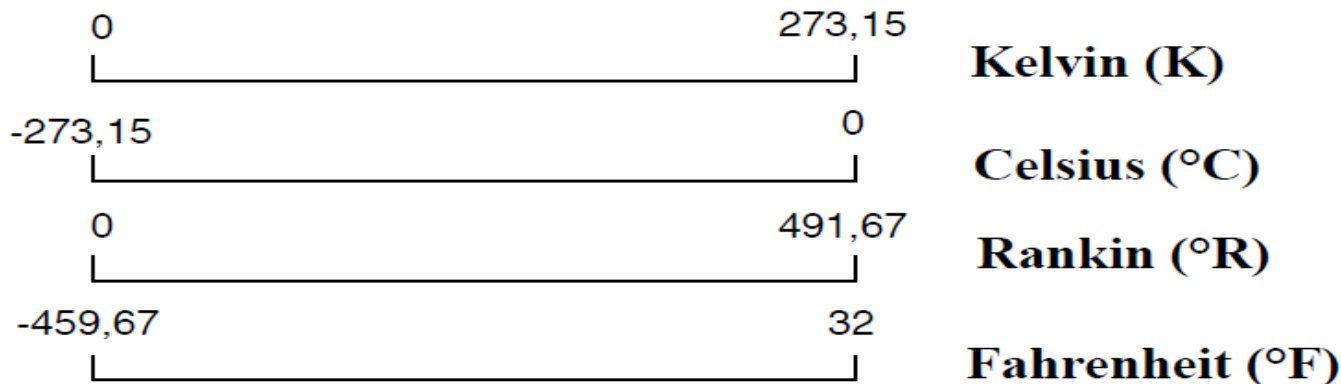
# MESURE DE TEMPERATURE

# Définition

Du point de vue thermodynamique, la température est une variable d'état intensive. A l'échelle moléculaire, la température est liée à l'énergie cinétique moyenne des constituants de la matière.

# Echelles de température

La plus ancienne est l'échelle centésimale (1742), attribuant arbitrairement les valeurs 0 et 100 degrés à la glace fondante et à l'eau bouillante, sous la pression atmosphérique normale. La température ainsi définie dépendant du phénomène choisi (la dilatation d'un fluide)

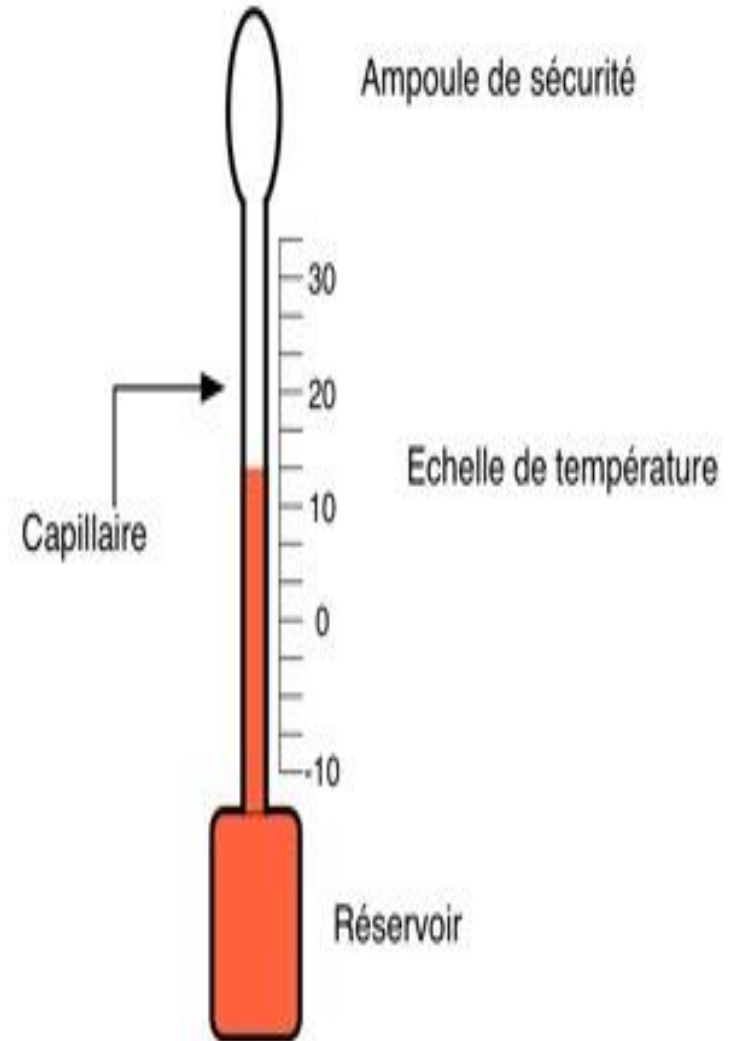


# Thermomètres à dilatation

C'est la dilatation des corps qui sera le phénomène image de la grandeur thermométrique. On constate en effet que le volume d'un corps augmente en général, lorsque sa température s'élève (sans qu'il y ait de **changement d'état physique**). La dilatation étant réversible, elle fournit un mode pratique de repérage des températures. Ce phénomène se retrouve de façon analogue, mais avec une ampleur différente pour les liquides, les gaz et les solides. D'où les trois types de thermomètres à dilatation.

# 1. Thermomètres à dilatation de liquide

Il est constitué d'un réservoir surmonté d'un capillaire de section faible et régulière (ordre de grandeur :  $D = 0,2 \text{ mm}$ ) se terminant par une ampoule de sécurité (utile lors d'un dépassement de la température admissible). Il est réalisé en verre. Sous l'effet des variations de température, le liquide se dilate plus ou moins. Son niveau est repéré à l'aide d'une échelle thermométrique gravée sur l'enveloppe.





## Loi de variation

La loi de variation du volume du liquide en fonction de La température est :

$$V = V_o(1 + \alpha \times \theta)$$

avec :  $V_o$  : volume du liquide à  $0^\circ\text{C}$  ;

$V$  : volume de liquide à  $\theta^\circ\text{C}$  ;

$\alpha$  : coefficient de dilatation du liquide en  $^\circ\text{C}^{-1}$

## Liquides thermométriques

Liquides	Domaine d'emploi ( $^\circ\text{C}$ )	$\alpha$ en $^\circ\text{C}^{-1}$
Pentane	-200 à 20	
Alcool éthylique	-110 à 100	1,17
Toluène	-90 à 100	1,03
Créosote - Alcool éthylique	-10 à 200	
Mercure	-38 à +650	0,182
Mercure - Thallium	-58 à +650	
Mercure - Gallium	0 à 1 000	

Tableau 1 – Liquides thermométriques

## 2. Thermomètres à dilatation de gaz

L' équation d'un gaz parfait est :  $PV = nR \theta$ , avec :

$n$  : Nombre de moles ;  $R = 8,31 \text{ J/mol.K}$  ;

$\theta$  : Température en K et  $P$  : Pression en Pa.

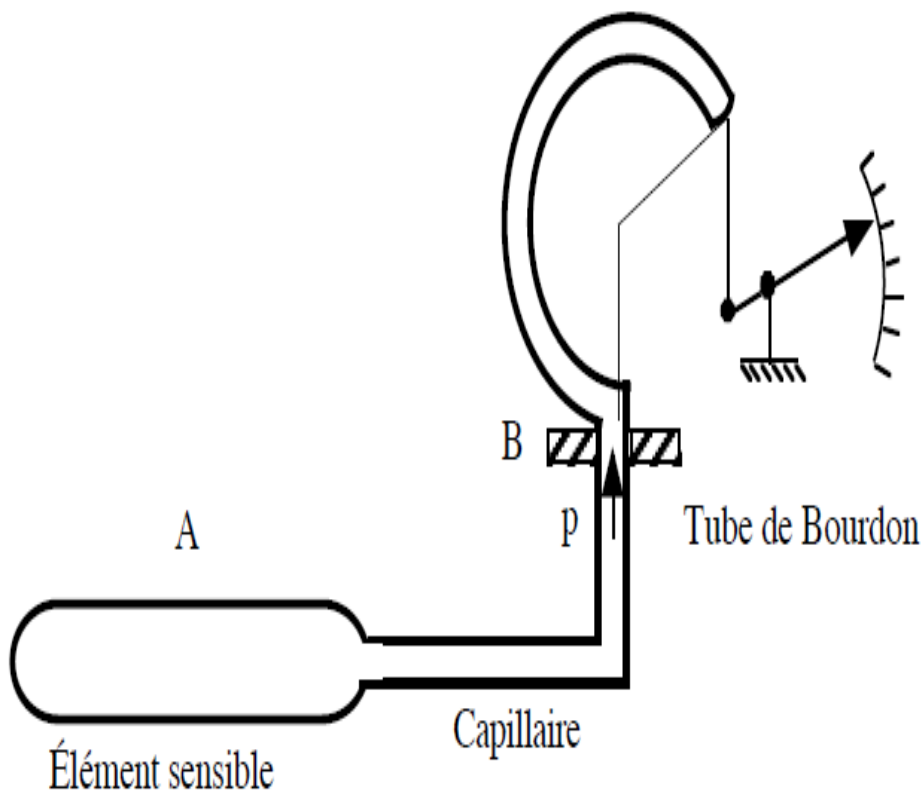


Tableau 2 - Gaz employés dans les thermomètres

Gaz	Température critique
hélium	-267,8°C
hydrogène	-239,9°C
azote	-147,1 °C
gaz carbonique	-31,1°C

## Principe

Un thermomètre à gaz est composé d'une sonde (A), formant une enveloppe dans laquelle est enfermée le gaz thermométrique. Cette sonde est reliée par un tube capillaire de raccordement à l'extrémité (B) d'un tube de Bourdon, appelée spirale de mesure. Cette extrémité est fixe.

Sous l'effet de la température du milieu dans lequel la sonde est placée, la pression du gaz va varier, ce qui modifiera l'équilibre de l'extrémité libre du tube de Bourdon.

Cette variation de pression se traduira par un mouvement de rotation de l'index indicateur qui se déplacera devant un cadran portant des graduations thermométriques.

Les gaz le plus souvent employés sont fournis (tableau 2).

### 3. Thermomètres à tension de vapeur

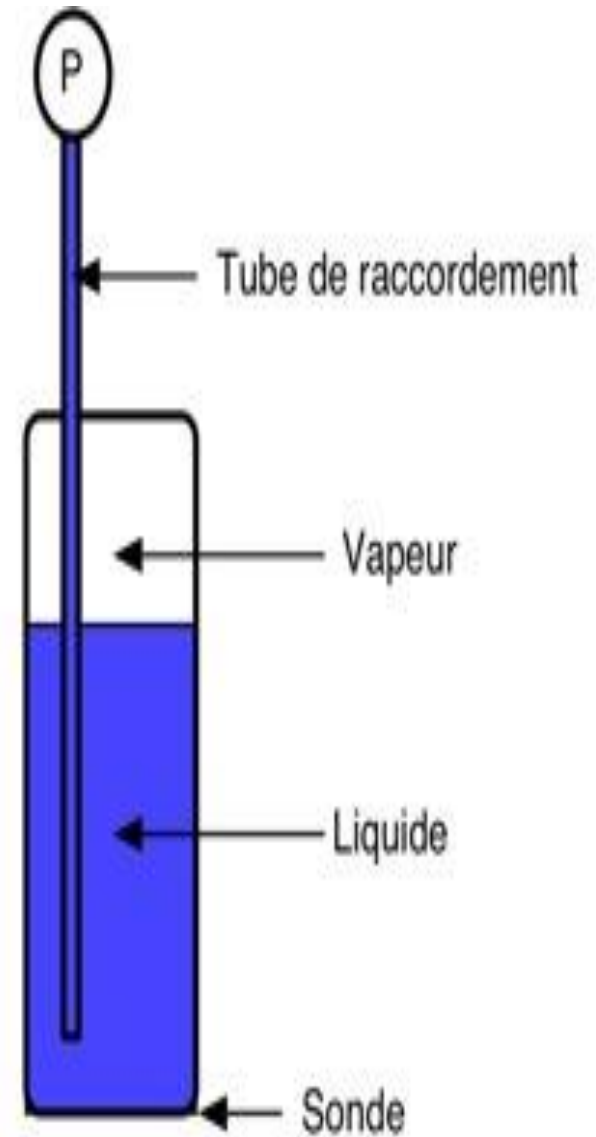
#### *Définition*

On appelle tension de vapeur d'un liquide, la pression sous laquelle ce liquide est en équilibre thermodynamique avec sa phase vapeur. La tension de vapeur n'est fonction que de la température d'un liquide donnée.

#### *Principe*

La mesure de la tension de vapeur d'un liquide permet donc de connaître sa température. La mesure thermométrique se fait par l'intermédiaire d'une mesure de pression. Les thermomètres à tension de vapeur sont très sensibles.

L'élément sensible est une sonde analogue à celle du thermomètre à gaz, mais le tube de raccordement plonge dans la sonde. Celle-ci et le tube de raccordement sont garnis de liquide vaporisable. Lorsque la sonde est placée dans une enceinte chaude, une partie du liquide se vaporise. Un équilibre liquide/vapeur s'établit, fonction de la température. En même temps, la pression a augmenté pour se fixer à la valeur de la tension de vapeur du liquide. Cette pression est transmise par le liquide au manomètre de mesure qui agit sur l'élément indicateur.



## 4. Thermomètres à dilatation de solide

Lorsqu'une tige métallique est portée à la température  $\theta$  sa longueur varie. La relation entre sa longueur  $L$  et  $\alpha\theta$  est :

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

avec :

$L$  la longueur de la tige à la température  $\theta$  ;

$L_0$  la longueur de la tige à  $0^\circ\text{C}$  ;

$\theta$  la température en  $^\circ\text{C}$  ;

$\alpha$  le coefficient de dilatation linéaire du métal.

La dilatation linéaire du métal peut servir de grandeur thermométrique.

*Quelques valeurs de  $\alpha$  :*

$9 * 10^{-6}$  pour le platine ;

$30 * 10^{-6}$  pour le Zinc ;

## *Thermomètres électriques:*

Les capteurs qui précèdent sont à lecture directe et sont peut utilisés dans les régulations industrielles. Les capteurs électriques qui suivent auront l'avantage d'une plus grande souplesse d'emploi (information transmissible, enregistrement) tout en gardant une précision suffisante pour les emplois industriels et beaucoup d'emplois de laboratoire.

L'emploi des thermistances a donc des avantages de sensibilité et de faible encombrement, mais la loi de variation de la résistance en fonction de la température n'est pas linéaire.



## Thermomètres à thermistance

Une thermistance est un agglomérat d'oxydes métalliques frittés (rendus compacts par haute pression exercée à température élevée) de l'ordre de 150 bars et 1000°C. La composition d'une thermistance peut être, par exemple :

- $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (oxyde ferrique) ;
- $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  (aluminate de magnésium) ;
- $\text{Zn}_2\text{TiO}_4$  (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 :  $R = a \times \exp \frac{b}{\theta}$

Un autre avantage des thermistances est leur faible encombrement. On les fabrique sous forme de petits cylindres ( $d = 1$  à  $12$  mm,  $L = 5$  à  $50$  mm). La variation de résistance des thermistances dépend des matériaux utilisés. Leur domaine d'utilisation va de  $-80^\circ\text{C}$  à  $+700^\circ\text{C}$  avec une précision de  $0,1$  à  $0,5$  degré.

## Résistance de platine PT100

Souvent on trouve des capteurs sous forme de résistance de platine. On utilise le fait que le coefficient de température soit connu avec une grande précision.  $\alpha = 3.85 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . La résistance du Pt 100 est donc  $100 \, \Omega$  à  $0 \, ^\circ\text{C}$  et  $138.5 \, \Omega$  à  $100 \, ^\circ\text{C}$ .

### Avantage :

- très répandu.
- il y a des configurations applicables pour tous les domaines.
- une résistance de  $100 \, \Omega$  ne pose pas de problèmes pour être mesurer avec une bonne précision.

### Inconvénient :

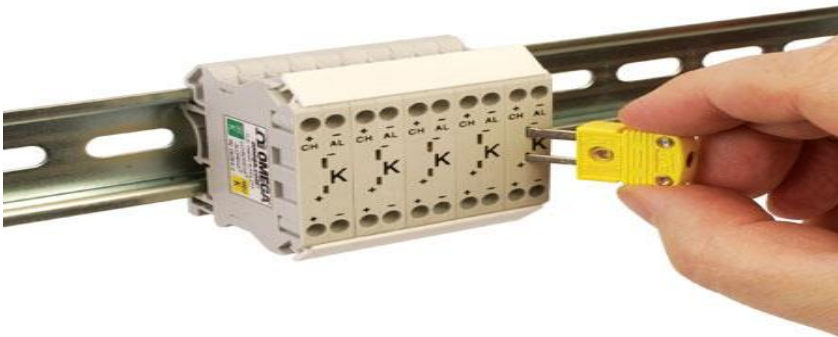
- le courant de mesure peut chauffer la résistance en platine.



# Thermocouples

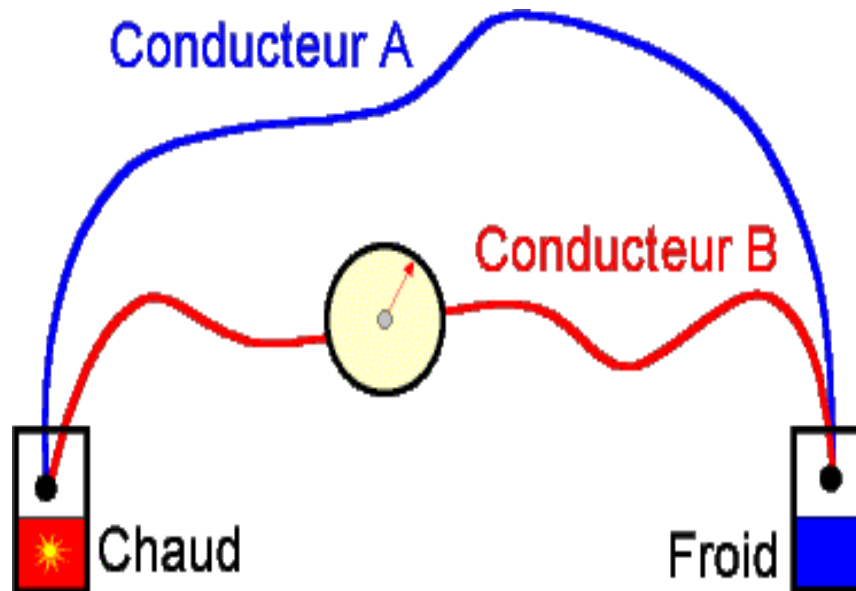
Les thermocouples (Couples thermoélectriques) sont utilisés pour la mesure de température. Ils permettent la mesure dans une grande gamme de températures. La mesure est basée sur l'effet Seebeck.

**Principe** : Lorsque deux conducteurs de métaux différents sont connectés ensemble en 2 points, et que ces jonctions sont à des températures différentes, une F.E.M. apparaît,



# Principe

L'**effet Seebeck** est un **effet thermoélectrique**, découvert par le physicien allemand *Thomas Johann Seebeck* en 1821. Celui-ci remarqua qu'une aiguille métallique est déviée lorsqu'elle est placée entre deux **conducteurs** de natures **différentes** liés par des jonctions à leurs extrémités et soumis à un **gradient** thermique



Comme la F.E.M. dépend de la différence de température entre les 2 jonctions, il faut s'assurer de connaître la température de l'une d'entre elle pour déduire la température de l'autre.

La jonction dont la température est connue est dite "jonction de référence".

Les thermocouples ont les caractéristiques suivantes :

- Très grande gamme de mesure de  $-270$  à  $2700$  °C;
- Précision dans l'ordre de  $\pm 0.2$  %;
- Temps de réponse rapide;
- Prix modéré.

## *Différents types de thermocouples*

Pour la réalisation d'un couple thermoélectrique on choisit des fils utilisables dans la zone de température attendue pour la mesure et présentant des caractéristiques de précision et de sensibilité convenables. On tient compte également de l'action corrosive du milieu ambiant (atmosphère oxydante, réductive, sulfureuse, etc...) sur les constituants du couple pour arrêter son choix. Le tableau donne les caractéristiques simplifiée des thermocouples les plus courants.

## *Caractéristiques simplifiée de thermocouples*

Code littéral	Couple	Usage continue Usage intermittent	Précision en %	Remarques
K	Nickel - Chrome Nickel - Aluminium	0°C à 1100°C -180°C à 1300°C	1,5	Bien adapté aux milieux oxydants
T	Cuivre Cuivre - Nickel	-185°C à 300°C -250°C à 400°C	0,5	
J	Fer Cuivre - Nickel	20°C à 700°C -180°C à 750°C	1,5	Pour milieu réducteur
E	Nickel - Chrome Cuivre - Nickel	0°C à 800°C -40°C à 900°C	1,5	Utilisation sous vide ou milieu légèrement oxydant
R	Platine - 13% Rhodium Platine	0°C à 1600°C 0°C à 1700°C	1	
S	Platine - 10% Rhodium Platine	0°C à 1550°C 0°C à 1700°C	1	Résistance à l'oxydation à la corrosion

## Application :

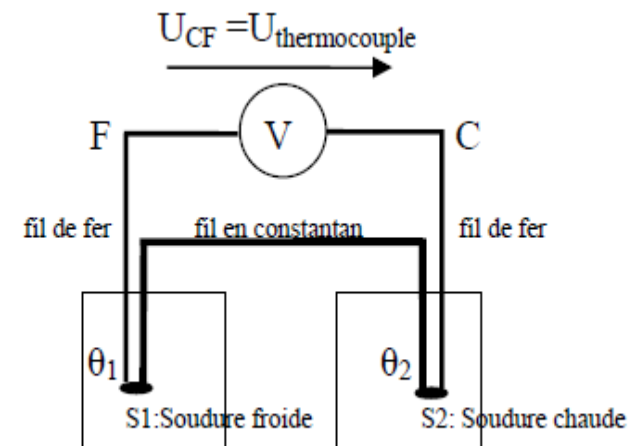
On utilise un thermocouple fer-constantan. Les deux fils, le fer métallique et l'alliage constantan sont soudés à leurs extrémités. Lorsque les deux soudures S1 et S2 sont portées à des températures différentes, on peut constater l'existence d'une tension  $U$  thermocouple entre les deux soudures. S1 la soudure dite froide reste à température fixe, la température de la soudure S2 dite chaude varie, selon la température que l'on désire mesurer.

1. La soudure froide S1 étant dans les deux cas à la température  $\theta_1$  de  $20^\circ\text{C}$ , on fait les deux mesures suivantes:

**Température** de S2:  $\theta_2 = 0^\circ\text{C}$

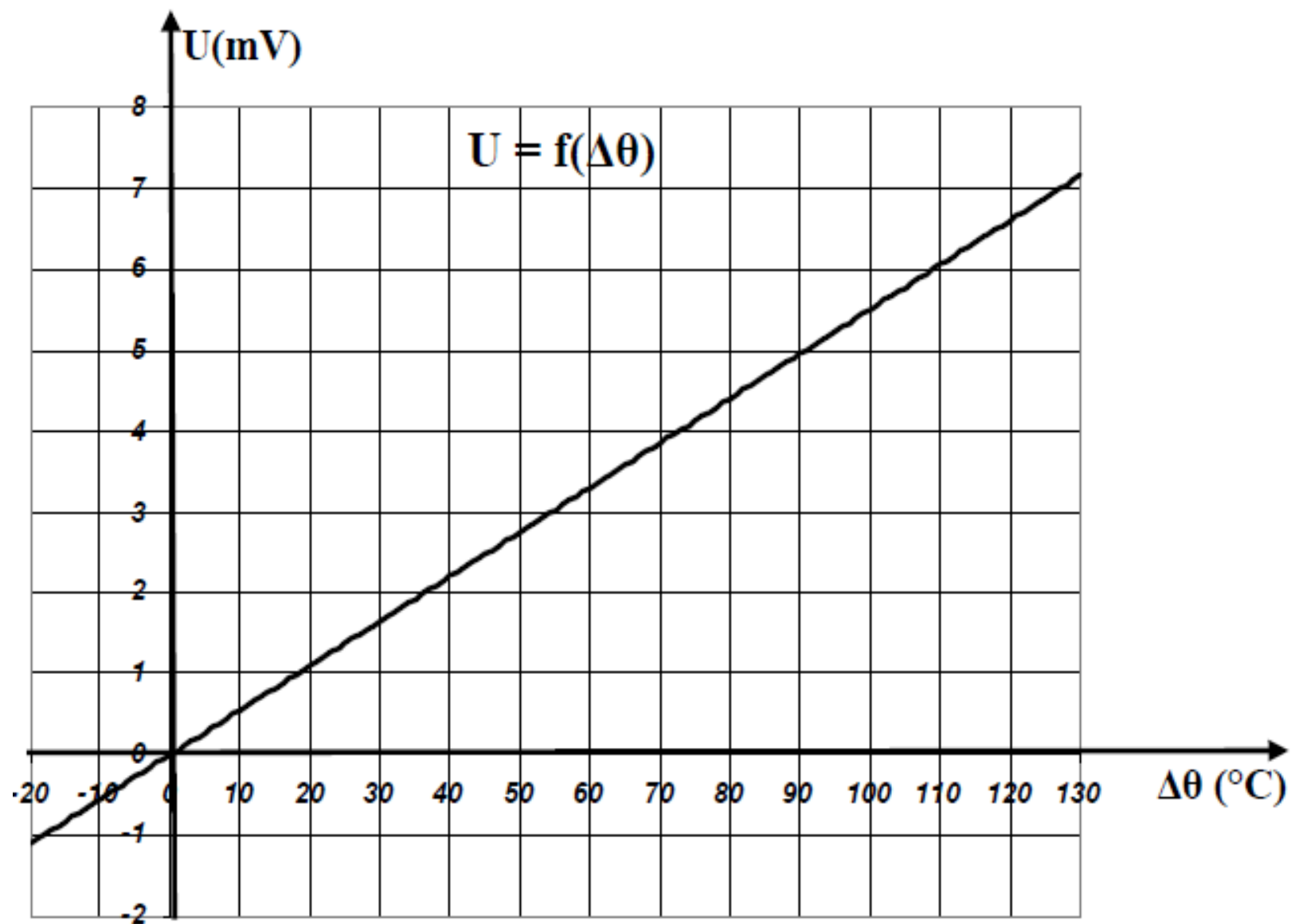
$U_{\text{thermocouple}} = -1,10 \text{ mV}$

**Température de** S2:  $\theta_2 = 600^\circ\text{C}$   $U_{\text{thermocouple}} = 33,75 \text{ mV}$





1. Calculer la sensibilité moyenne du thermocouple entre 0 et 600°C.
2. Pour mieux connaître le fonctionnement du thermocouple, on fait une série de mesures, en faisant varier la température de la soudure chaude entre 0°C et 150°C, la soudure froide étant toujours maintenue à 20°C. Le graphique ci-dessous représente les variations de la tension  $U$  thermocouple en fonction de  $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ 
  - 2.1 D'après le graphique obtenu, montrer que le thermocouple est un capteur de température linéaire pour  $\Delta\theta$  compris entre -20°C et 130°C ?
  - 2.2 Déduire du graphique la sensibilité du capteur.
- 3 Comparer les valeurs de  $s_{\text{moy}}$  et de  $s$ . Le thermocouple a-t-il toujours un comportement parfaitement linéaire pour  $\Delta\theta > 130^\circ\text{C}$  ? Justifier.



# Les capteurs

Organe chargé de prélever une grandeur physique à mesurer et de la transformer en une grandeur exploitable.

La grandeur physique à mesurer « mesurande » constitue le signal d'entrée du capteur. La grandeur exploitable étant de nature électrique constitue le signal de mesure (signal de sortie (réponse)) du capteur. Elle est une représentation de la grandeur à mesurer.

Idéalement, il faudrait que la réponse ne dépende que du mesurande. Malheureusement, en pratique, les grandeurs d'influence viennent perturber le fonctionnement du capteur et entraînent souvent des erreurs de mesure. Les principales grandeurs d'influence sont : la température, la pression, les vibrations, les chocs, le vieillissement, l'humidité, la fixation du capteur, etc...

Il faut faire en sorte de réduire le plus possible les effets des grandeurs d'influence.



## **CONSTITUTIONS D'UN CAPTEUR :**

### **1 – Le corps d'épreuve :**

Est un élément mécanique qui réagit à la grandeur à mesurer, il a pour rôle de transformer la grandeur à mesurer en une autre grandeur physique dite mesurable. Cette grandeur constitue la réaction du corps d'épreuve.

### **2 – L'élément de transduction :**

Est un élément sensible lié au corps d'épreuve. Il traduit les réactions du corps d'épreuve en une grandeur électrique constituant le signal de sortie.

### **3 – Le boîtier :**

Est un élément mécanique de protection, de maintien et de fixation du capteur.

