



Université Mohamed khider
Faculté science et technologie
Département chimie industrielle



Cours

Instrumentations et capteurs

Cours pour la troisième année Licence
Génie des Procédés

Dr. REHALI HANANE



Sommaire

Chapitre 1 Généralité sur les appareils de mesure

1. Introduction.....	2
2. Principe d'une mesure.....	2
3. Fonction d'un appareil de mesure	3
4. Qualités d'un appareil de mesure.....	3
5. Caractéristiques d'étalonnage	5
6. quelques définitions	5

Chapitre 2 capteurs de pression

1. Introduction	9
2. Définition de la pression.....	9
a. Les différentes unités de pression.....	9
3. Les différentes sortes de pressions.....	10
3.1 Le vide.....	10
3.2 La pression atmosphérique ou barométrique.....	10
3.3 La pression absolue.....	10
3.4 La pression relative ou effective	10
3.5 La pression différentielle.....	11
4. Pression pour les fluides (liquide et gaz).....	12
5. Les capteurs de pression (ou manomètres de pression).....	13
5.1 Principe	13
a. Manomètre à tube en U.....	14
b. Mesure de la pression atmosphérique.....	15
6. Capteurs à déformation élastique (manomètre métallique).....	16
6.1. Manomètre à tube de BOURDON.....	17
6.2. Manomètre à membrane.....	18
6.3 Manomètre à capsule.....	19
6.4. Manomètre de pression absolu.....	20
7. Manomètres pour pression différentielle.....	20
7.1. principe de fonctionnement.....	20
7.2. Les procédés de conversion : Conversion par variation de résistance.....	21
a. principe de fonctionnement.....	21
7.3. Conversion par variation de capacité.....	22

a. principe de fonctionnement.....	22
------------------------------------	----

CHAPITRE 3 : Mesure des débits

1. Introduction	25
2. Mesure des débits	25
3. Classification des principaux débitmètres	29
3.1 Débits à pression différentielle.....	29
• Débit mètre ultrason	29
• Débit mètre à turbine.....	30
• Débitmètres à organes déprimogènes.....	31
• Les différents types.....	32
1. tube de Pitot.....	32
2. Tube de Venturi.....	33
3. La tuyère	34
4. Diaphragme	34
3.2 les débitmètres a section variable.....	35
3.2.1.Le rotamètre.....	35
3.2.2.Le débitmètre à vanne mobile.....	39
4. Les Compteurs	39
4.1. Différents types.....	39
1.Compteurs de Volume.....	40
2. Compteurs de vitesse.....	41
3.compteurs à hélice (Woltmann).....	42
4.Compteurs combinés.....	43
Principe du débitmètre électromagnétique.....	44

CAPITRE4 MESURE DE NIVEAU

1. Introduction	
2. Mesure de niveau	46
2.1.Méthodes hydrostatiques.....	46
Mesure par flotteur.....	46
Mesure par plongeur.....	47
2.2 Appareils optiques (Détecteur de niveau optique).....	47
• Ancien principe.....	47
• Par fibre optique	48
2.3.Mesure niveau bulle a bulle	48

2.4.Mesure de niveau par la pression	49
--	----

Chapitre 4 : Capteurs de température

1. Définition.....	51
2. Les différentes unités de température.....	51
2.1.Les échelles de température.....	51
3. Thermomètres.....	52
3.1. Thermomètres à dilatation.....	52
3.1.1. Thermomètres à dilatation de liquide.....	53
3.1.2. Thermomètres à dilatation de gaz.....	53
3.2.1. Principe.....	53
3.2.2. Thermomètres à tension de vapeur.....	54
Principe	54
3.3. Thermomètres à dilatation de solide.....	56
Principe.....	55
3.3.1. Bilame.....	59
3.4. Thermomètres électriques.....	60
3.5. Thermomètres à résistance et à thermistance.....	60
3.5.1. Thermomètres à résistance.....	61
3.5.2. Thermomètres à thermistance.....	62
3.5.3. Thermocouples.....	63
1/ Limites de température de fonctionnement du thermocouple.....	65
2/ Mise en œuvre du thermocouple	66

Chapitre 6 : Les capteurs

1. Introduction	68
2. Les capteurs	68
a . Définitions	68
b. caractéristiques des capteurs	68
3. Constitution du capteur	70
Corps d'épreuve.....	70
Elément de transduction.....	70

Boîtier.....	70
• Grandeurs d'influence.....	70
4. Différentes familles de capteurs.....	71
4.1 Capteurs actifs.....	71
Effet piézo-électrique.....	71
• Effet thermoélectrique.....	71
• Effet d'induction électromagnétique.....	71
• Effet photo-électrique.....	71
• Effet hall.....	72
4.2. Capteurs passifs.....	72
4.2.1. Capteurs passifs composites	73
5. classification des signaux.....	74
6. Les circuits de conditionnement.....	75
Références bibliographiques	75

CHAPITRE 1 :

GENERALITES SUR LES APPAREILS DE MESURE

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES APPAREILS DE MESURE

1. INTRODUCTION

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.

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

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

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 la graduation et se déroulant en fonction d'une deuxième (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.

4 . Qualités d'un appareil de mesure

La qualité d'un appareil de mesure est l'ensemble des données qui caractérisent 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 a 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.

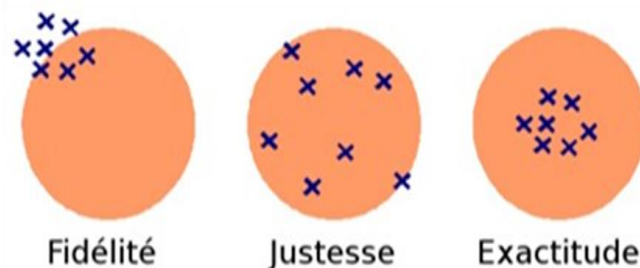
La sensibilité

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 dispersés 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.

5. Caractéristiques d'étalonnage

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

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

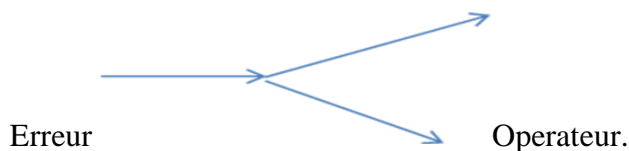
Le zéro : On appelle zéro d'un appareil de mesure la valeur de l'indication qui correspond à une valeur nulle ou minimal de la variable.

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.

Origine d'erreur

Appareil



6. quelques définitions

- **La métrologie** C'est la branche de la science qui traite des mesures. En métrologie, souvent mesurer c'est comparer.
- **La mesurande** Grandeur particulière soumise à mesurage.

- **Grandeur mesurable** Attribut d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance susceptible d'être distinguée qualitativement et terminée quantitativement
- **Incertitude de mesure Paramètre**, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient être attribuées au mesurande. Exemple : déplacement, température, pression, tension, etc.
- **Le mesurage Ensemble** des opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur.
- **LES GRANDEURS** Il s'agit d'un concept, qu'on ne peut pas donner définition à ce terme et on parle de quantité ou d'état ou de dimension d'une grandeur. Par conséquent, la grandeur est la qualité physique d'entités telles que : la longueur, le volume, la masse, le temps, etc.

Système d'unités internationales et ses symbole

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 = J/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.

CHAPITRE 2 :

Capteurs de pression

CHAPITRE 2 : CAPTEURS DE PRESSION

1. INTRODUCTION

La pression tout comme la température, la vitesse ou le débit, intervient, en tant que variable, dans les phénomènes liés aux fluides liquides ou gazeux et aux solides qui exercent ou subissent des pressions. Si on considère les applications industrielles, où se posent, surtout, les problèmes de mesure, dont la mesure de pression, on constate déjà qu'à lui seul le domaine énergétique absorbe une grande partie des instruments de mesure de pression. C'est évident car les installations hydrauliques, thermiques, nucléaires, etc... fournissent l'énergie mécaniques ou électrique, nécessitent la surveillance permanente des pressions à ne pas dépasser, ce dépassement pouvant entraîner la détérioration d'enceintes et canalisations sans parler du risque d'éclatement des parois et d'accidents graves pouvant en découler, comme il peut diminuer le rendement d'une réaction chimique se produisant dans un réacteur, ce qui influe sur la production de l'usine, d'où l'intérêt de la mesure de la pression.

2 . définition de la pression

La pression est une grandeur dérivée du système international. Elle est définie comme le quotient d'une force par une surface. La pression s'exerce perpendiculairement à la surface considérée.

$$P_{pa} = \frac{F(N)}{S(m^2)} \quad (1)$$

a. Les différentes unités de pression

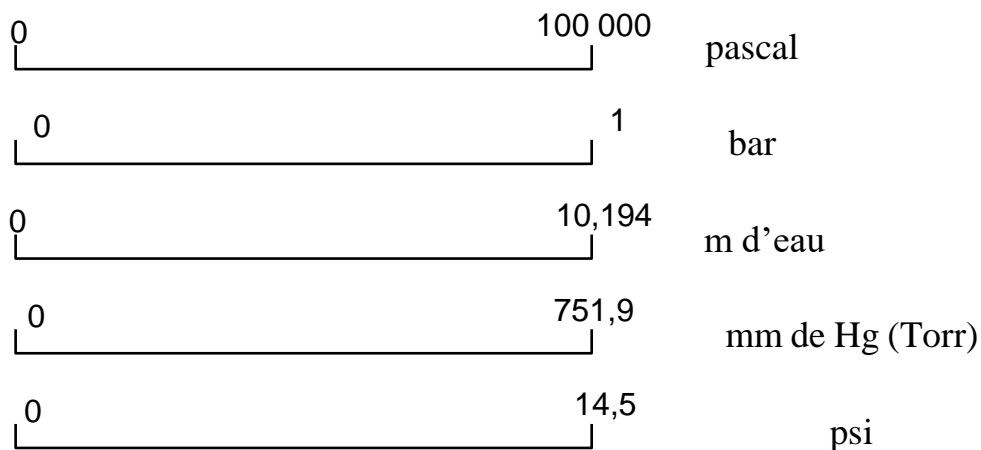


Figure 1 - Unités de pression

3. Les différentes sortes de pressions

3.1 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.

3.2 La pression atmosphérique ou barométrique

C'est la pression ressentie en chaque point de la surface terrestre. Elle est due au poids des couches d'air environnant le globe.

La pression atmosphérique varie avec :

- La température.
- la latitude (position % à la terre).
- L'altitude (position % à la mer).

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

3.3 La pression absolue

C'est une pression, positive, mesurée par rapport au vide absolu, par exemple la pression atmosphérique est une pression absolue.

3.4 La pression relative ou effective

C'est une pression, positive ou négative, exprimée par rapport à la pression atmosphérique. C'est l'écart entre la pression réelle absolue et la pression atmosphérique

$$Pr = Pabs - Patm. \quad (2)$$

- Si elle est négative, elle est appelée dépression
- Si elle est positive, elle est appelée surpression.

On dit qu'un appareil est en pression lorsque la pression enregistrée est supérieure à la pression atmosphérique.

Exemples :

- Pression de refoulement d'un ventilateur ;
- Pression d'une chambre à air de pneu ;
- L'eau est refoulée dans le tube en U, vers la branche qui est placée à l'air libre.

On dit qu'un appareil est en dépression lorsque la pression enregistrée est inférieure à la pression atmosphérique.

Exemples :

- Dépression d'un ventilateur à l'aspiration ;
- Dépression à l'aspiration d'une cheminée ;
- L'eau est aspirée dans le tube en U, vers la branche qui est reliée à l'appareil.

3.5 La pression différentielle

C'est la différence entre deux pressions : $\Delta P = PA - PB \quad (3)$

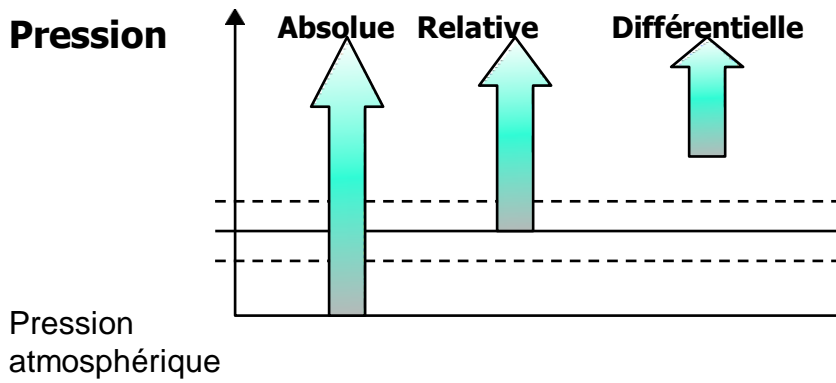


Figure 2 - Les différentes pressions

4. Pression pour les fluides (liquide et gaz)

Pression hydrostatique : À l'intérieur d'une colonne de fluide se crée une pression due au poids de la masse de fluide sur la surface considérée. Pour chacun des quatre récipients représentés sur la figure 3, la pression au fond de ceux-ci est identique est égal à :

$$P_{Pa} = \rho_{Kg/m^3} \times g_{m/s^2} \times h_m \quad (4)$$

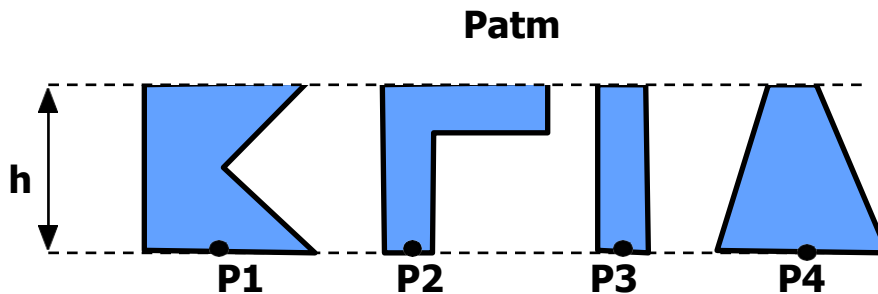


Figure 3 - Pression hydrostatique

Pression due à des forces extérieures : Un fluide se déplaçant à une vitesse V crée une pression supplémentaire P :

$$P_{Pa} = 0,5 \times \rho_{Kg/m^3} \times V_{m/s}^2 \quad (5)$$

Pression totale - Charge : C'est la somme de la pression hydrostatique, de la pression due aux forces extérieures et de la pression hydrodynamique. Celle-ci a la même valeur en tous points pour un fluide en mouvement horizontal (incompressible de viscosité négligeable), c'est le théorème de Bernouilli.

5. Les capteurs de pression (ou manomètres de pression)

5.1 Principe

Un **manomètre** ou **capteur de pression** est un instrument destiné à mesurer la pression des fluides

(liquide ou gaz). Les mesures de pression sont effectuées suivant différents principes à savoir :

- Application d'une **masse connue en réaction à l'effet d'une pression** sur une section connue (balances manométriques)

- Modification du niveau d'un liquide sous l'effet de la pression (manomètre à liquide).

- Détection de la déformation d'un élément sensible sous l'effet de la pression : on cite par exemples :

- Tube de bourdon.
- Capteurs de pression à jauges métalliques,
- Capteurs de pression à jauges piézo-résistives,
- Capteurs de pression par variation d'inductances,
- Capteurs de pression piézo-électriques.

5.2. Modes de détermination de la pression

On peut concevoir ou réaliser des appareils pour mesurer :

- La pression différentielle : chacune des deux prises de pression est reliée à un côté de l'organe sensible

de l'appareil de mesure.

- La pression absolue : l'un des côtés de l'appareil est relié à la prise de pression l'autre est branché au vide intégral.

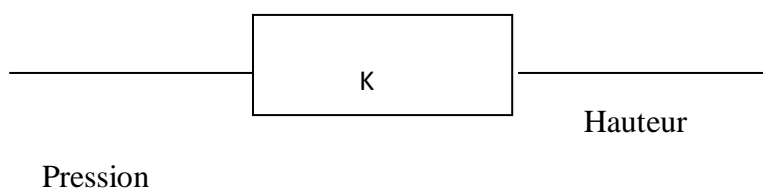
- Il existe également des appareils qui mesurent la pression au-dessus et en dessous de la pression Atmosphérique (pression relative), ces appareils sont appelés mano-vacuomètres.

5.3 Capteurs hydrostatiques ou Manomètres à liquide

C'est le plus simple de tous les manomètres. Son principe repose sur l'application de la relation

$$P_A - P_B = \rho g (Z_B - Z_A) \text{ et la mesure consiste à déterminer la hauteur } h = Z_B - Z_A$$

Les manomètres couvrent un domaine de 10 à 10^5 Pa pour la mesure de pression de gaz uniquement.



$$P = \rho \times g \times h \quad K = \frac{1}{\rho \times g}$$

a. 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 différence pression P entre les deux extrémités du tube. Ce manomètre offre une sensibilité sur sa partie droite :

$$m = \frac{da}{dp} = \frac{dh}{2 \times dp} = \frac{1}{2\rho g} \quad (6)$$

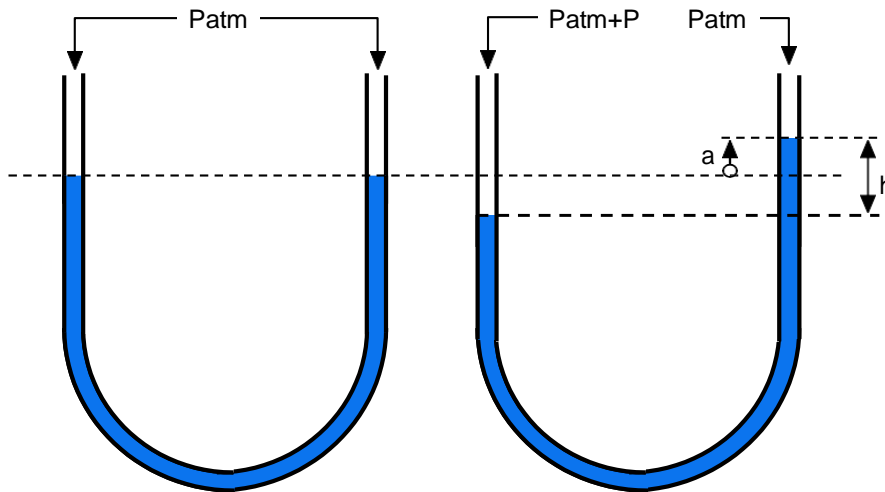


Figure 4 - Tube en U

On peut augmenter la sensibilité en utilisant un tube en U de sections inégales (figure 5).

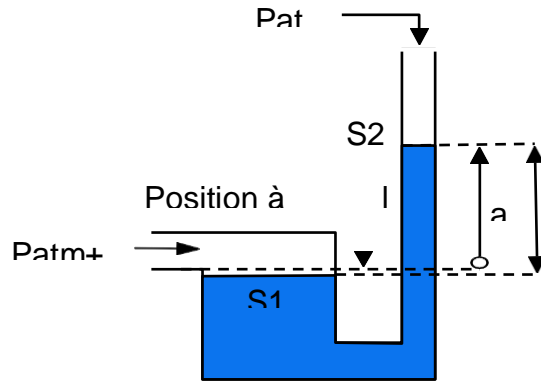
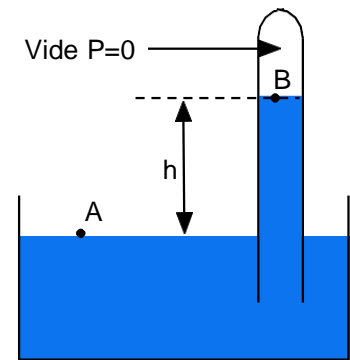


Figure 5 - Tube en U de sections inégales

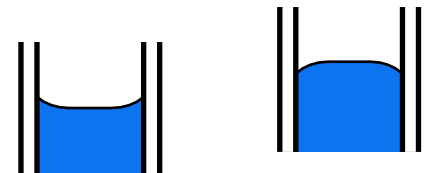
b. Mesure de la pression atmosphérique

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 mbars, $h = 0,7993$ m.



a. Problème de la capillarité

Dans les tubes en U de faible section (< 5 mm), contenant un liquide manométrique, il existe d’une part, des forces de cohésion entre les molécules du liquide, et d’autre part, des forces d’adhésion entre les molécules du liquide et celle du tube. Premier cas : les forces d’adhésion sont supérieures aux forces de cohésion, on dit que le liquide mouille les parois du tube. Exemple : eau + verre, le ménisque ainsi formé est concave



Deuxieme cas : les forces de cohésion sont supérieures aux forces d’adhésion, le liquide ne mouille pas les parois du tube. Exemple : mercure + verre, le ménisque Formé est convexe.

Loi de Jurin : L'ascension et la dépression capillaire sont :

- proportionnelles à la tension superficielle du liquide ;
- inversement proportionnelles à la masse volumique de ce liquide ;
- Inversement proportionnelles au diamètre du tube capillaire utilisé

C .Avantages et inconvénient des manomètres à tubes

Les manomètres à colonne de liquide couvrent un domaine de 0 à $5 \cdot 10^5$ Pa pour la mesure de

Avantages :

- ✓ bonne précision, on peut dépasser 0,1 % ;
- ✓ 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 ;
- ✓ ces appareils ne traduisent pas la pression mesurée en un signal analogique exploitable en régulation industrielle.

a. Domaine d'emploi

- ✓ mesure des pressions absolues, relatives ou différentielles jusqu'à deux bars ;
- ✓ pratiquement la colonne de liquide ne peut dépasser deux mètres ;
- ✓ réservé plutôt pour des usages en laboratoire ou comme appareils étalons.

6. Capteurs à déformation élastique (manomètre métallique)

Le principe de fonctionnement de ces appareils repose sur la déformation d'un tube, d'une membrane ou d'un soufflet généralement métallique, sous l'action de la force créée par la pression à mesurer. Le déplacement de la partie déformée est amplifié par un mécanisme à roue dentée qui entraîne une aiguille devant un cadran gradué. Ce mécanisme est au contact de l'air dans les appareils destinés à la mesure de pression, soit constante soit variante lentement (*manomètre sec*). En revanche, lorsque ces manomètres sont soumis à des vibrations, il est indispensable de placer le mécanisme dans un liquide visqueux qui amortit les mouvements rapides de l'aiguille et lubrifie le mécanisme (*manomètre à bain d'huile*). Les liquides généralement utilisés sont la glycérine, les huiles au silicone et l'huile de vaseline.

6.1. Manomètre à tube de BOURDON

Fonctionnement :

Le tube de Bourdon est brasé, soudé ou vissé avec le support de tube qui forme généralement une pièce complète avec le raccord. La mesure est effectuée à partir de la déformation d'un tube creux enroulé en spirale associé à un mécanisme permettant la lecture. Lorsque le fluide passe à l'intérieur du tube, sous l'action de la pression, la spire se déforme, entraînant le déplacement de l'aiguille sur le cadran du manomètre. Afin d'être protégés contre des détériorations, le système de mesure, le cadran et l'aiguille sont montés dans un boîtier.

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 : 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 3 108 Pa.

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.

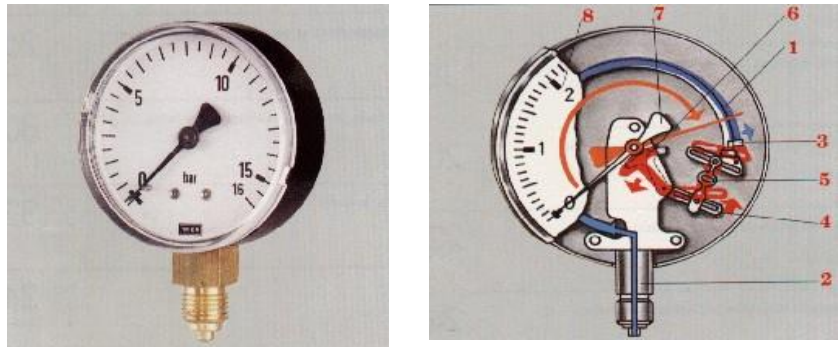


Figure 6 Le manomètre à tube de Bourdon

6.2. Manomètre à membrane

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.

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

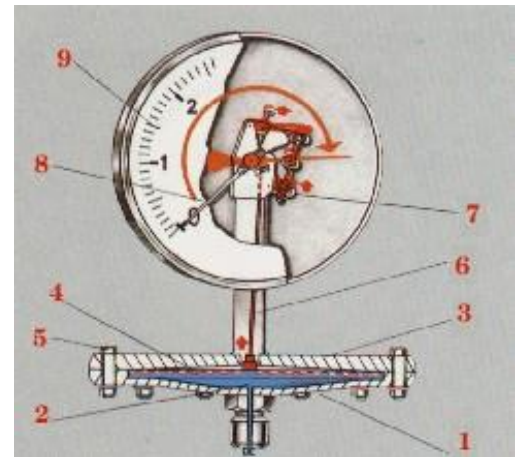


Figure 7 Le manomètre à Membrane

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 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. Pour l'utilisation avec des fluides hautement visqueux ou cristallisant il est possible de les équiper de brides ouvertes. Les appareils sont fabriqués avec un montage de membrane horizontal (à angle droit par rapport au cadran) ou vertical (parallèle par rapport au cadran). Étant 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.

6.3 Manomètre à capsule

Fonctionnement

La capsule est montée sur le raccord soit directement soit par l'intermédiaire d'un tube métallique. Par un trou dans le raccord le fluide à mesurer passe à l'intérieur de la capsule. Sous l'effet de la pression les demi-parties de la capsule se bombent. Ce déplacement proportionnel à la pression mesurée 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.

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

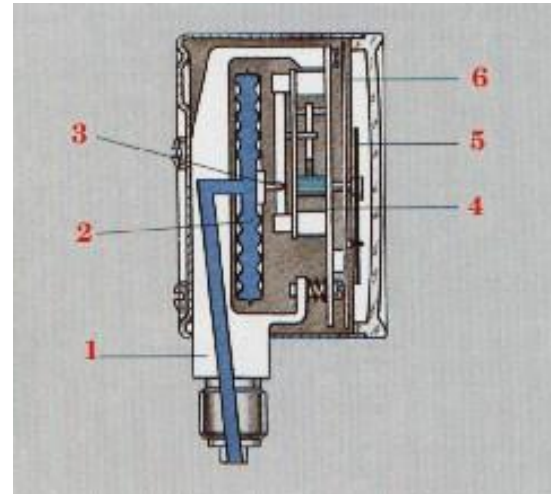


Figure 8 Le manomètre à capsule

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 de 2,5 mbar à 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.

6.4. 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 (figure 9).

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 de 10 mbar à 100 bar absolue.

7. Manomètres pour pression différentielle

7.1. Principe de Fonctionnement

Une capsule montée dans un boîtier étanche résistant à la pression, est soumise, de l'intérieur et de l'extérieur, à une pression. La différence de pression entre les deux parties provoque un mouvement de la capsule. Ce déplacement proportionnel à la différence de pression mesurée est transmis, par l'intermédiaire du mouvement à l'aiguille sur le cadran en tant que valeur de pression différentielle. Les deux pressions individuelles ne sont pas affichées

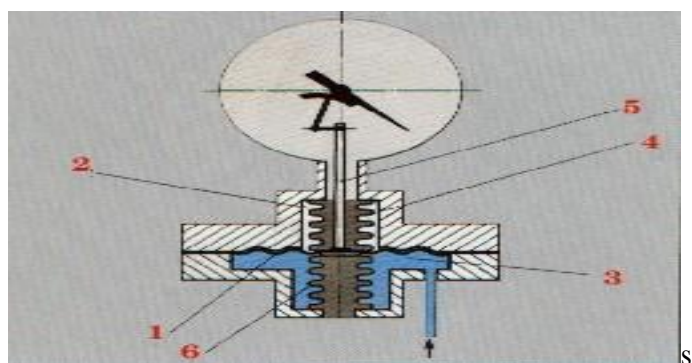
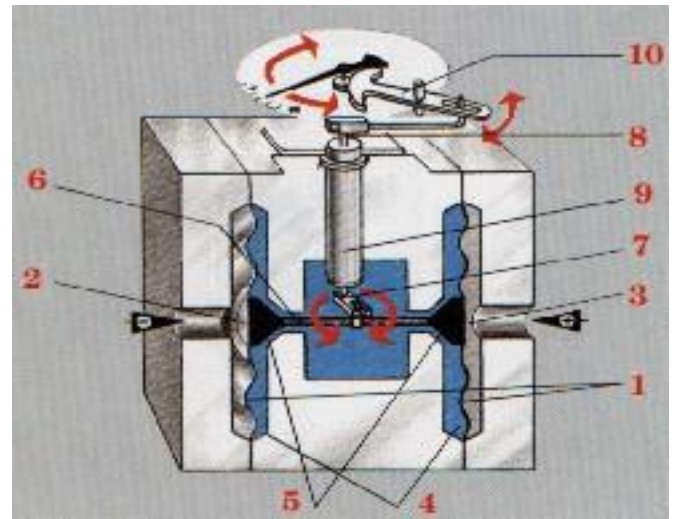


Figure 9 – Capteur de pression absolue

1. Organe moteur, la membrane
2. Chambre de mesure (-)
3. Chambre de mesure (+)
4. Chambre de mesure
5. Soupape double
6. Bielle
7. Levier de transmission
8. Axe d'entraînement
9. Tube de torsion
10. Mouvement



7.2. Les procédés de conversion : Conversion par variation de résistance

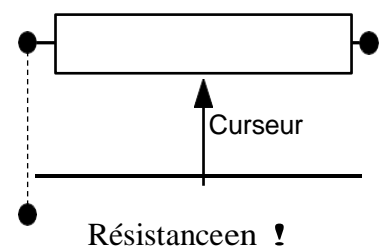
Rappel de physique : La résistance d'un conducteur s'écrit :

$$R = \frac{\rho \times l}{S}$$

- R : la résistance en Ω ;
- ρ : la résistivité du conducteur en Ωm ;
- l : la longueur du conducteur en m ;
- S : la section du conducteur en m^2 .

a. Principe de fonctionnement : La piste résistive est placée sur la partie fixe du capteur et le mouvement mécanique à mesurer est accouplé à un curseur qui se déplace sur celle-ci. Ainsi, la résistance entre un point fixe et la partie mobile du potentiomètre est fonction de la position à mesurer.

L'élément sensible est constitué d'un support sur lequel est déposée une pâte résistive qui incorpore un liant plastique et du carbone (cas des capteurs à piste résistive) ou un bobinage résistif (cas des capteurs à fil résistif).



L'élément sensible ainsi obtenu peut être rapporté :

- soit à l'intérieur d'une jupe cylindrique pour constituer un potentiomètre rotatif ;
- soit fixé sur un support plat pour réaliser un capteur de déplacement rectiligne.

Avantages :

- signal de sortie élevé ;
- utilisable sans conditionneur ;
- possibilité d'adapter à une variation non linéaire.

Inconvénients

- durée de vie ;
- sensibilité aux vibrations.

7.3. Conversion par variation de capacité

Rappel de physique : Un condensateur est composé de deux conducteurs séparés par un isolant. La capacité d'un condensateur s'écrit :

$$C = \frac{\epsilon_0 \times \epsilon_r \times S}{e} \tag{9}$$

- ϵ_0 : permittivité du vide = $8,8510^{-12}$;
- ϵ_r : permittivité relative de l'isolant ;
- S : surface en regard en m^2 ;
- e : épaisseur de l'isolant en m .

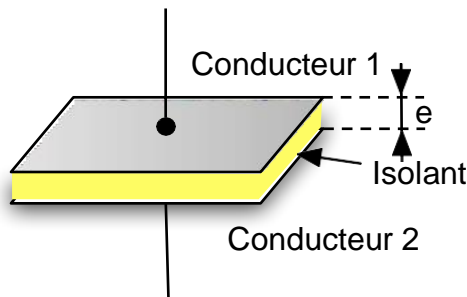


Figure 8 – Condensateur

A . Principe de fonctionnement : La différence de pression entraîne la variation de l'épaisseur entre les conducteurs, d'où une variation de la capacité de la cellule (figure 9).

Cas des capteurs de pression différentielles : Les pressions P1 et P2 sont transmises par l'intermédiaire d'une huile de silicone à la membrane déformable, ce qui entraîne une variation de la capacité entre les armatures et la membrane déformable (figure

ccc

10).

Avantages

- faible masse ;
- peu sensible aux accélérations.

Inconvénients

- sensibilité à la température (sauf montage différentiel) ;
- sortie haute impédance.

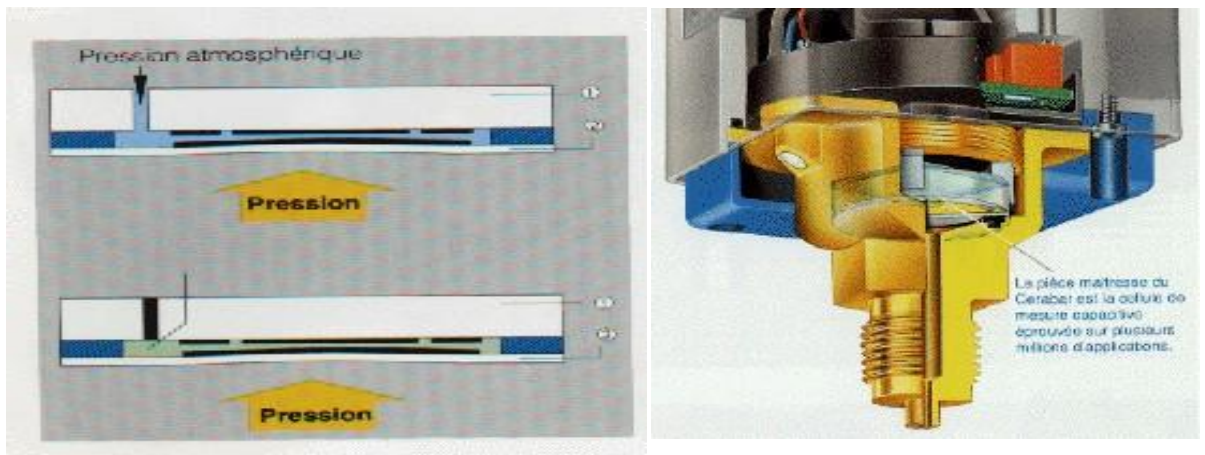


Figure 9 – Cellule de mesure d'un capteur de pression capacitif

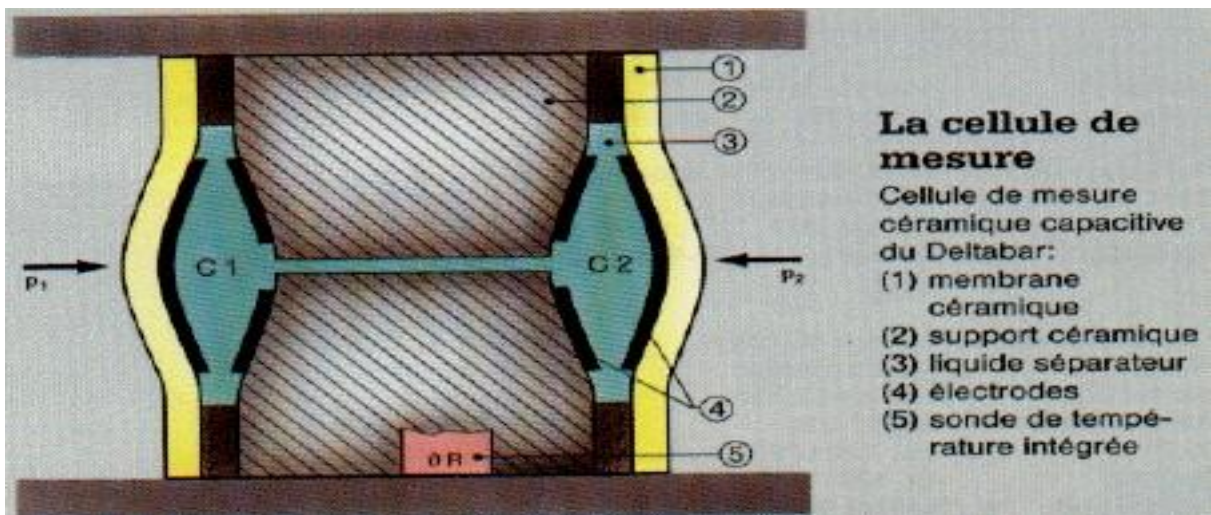


Figure 10 – Capteur de pression différentielle
- Vue en coupe

Chapitre 3 :

Mesure des débits

CHAPITRE 3 : Mesure des débits

1. Introduction :

Le transport des fluides industriels dans les conduites et les mesures de leurs débits 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).

Pour ces raisons les fluides influent sur les conduites et les instruments de mesure de débits. En pratique, les débitmètres à pression différentielle sont soumis à des pressions considérables qui peuvent être exercés des déformations élastiques et même des déformations plastiques en cas où les pressions dépassent les contraintes admissibles des matériaux des débitmètres. L'objectif de ce chapitre est de mentionner les débitmètres les plus utilisés dans l'industrie et les conditions de ces installations dont le but d'assurer les bonnes performances.

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

Les mesures des débits des fluides industriels ont une grande importance, car elles sont toujours présentées dans les opérations de commercialisation de ces produits soit en liquide ou en état gazeuse. Pour assurer le transport et la distribution de ces fluides sans une grande perte, des appareils de mesure de débit sont nécessaires afin de minimiser ces pertes.

2 – Mesure des débits :

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-masse ou débit massique Q_m qui s'exprime en kg/s
- Débit-volume ou débit volumique Q_v qui s'exprime en m^3/s

Si ρ est la masse volumique du fluide (kg/m^3) on a la relation liant le débit-masse au débit -volume :

$$Q_m = \rho \cdot Q_v$$

ATTENTION : seul le débit massique est conservé entre deux sections d'un tube de courant. Cette loi de conservation est nommée « EQUATION DE CONTINUITÉ » :

$$Q_{m,1} = Q_{m,2}$$

ce qui donne :

$$\rho_1 \cdot S_1 \cdot v_{\text{moy},1} = \rho_2 \cdot S_2 \cdot v_{\text{moy},2} \quad (2)$$

Si

→ le débit volumique s'exprime en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

→ le débit massique s'exprime en $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Rappelons aussi une formule élémentaire qui est exploitée par certaines techniques de mesure de débit lorsque la vitesse du fluide peut être considérée comme constante :

$$Q_v = \frac{\text{Volume}}{\text{temps}} \quad (3)$$

où « Volume » est un certain volume rempli pendant un certain temps « temps ».

Le théorème de Bernoulli

Ce théorème relie, le long d'une ligne de courant, les trois grandeurs « vitesse », « pression » et « altitude ».

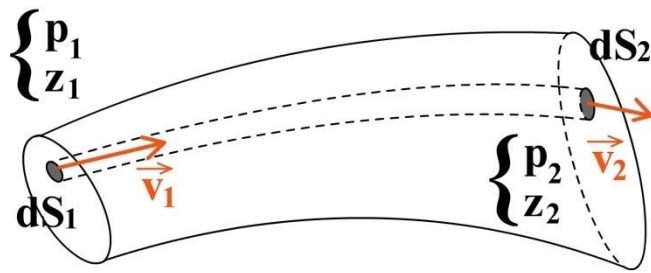
Le théorème de Bernoulli prend la forme suivante, dans le cas d'un fluide parfait :

$$p + \frac{1}{2\rho} \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot z = C^{\text{ste}} \quad (\text{en pression})$$

La vitesse « v » représente alors aussi bien la vitesse moyenne, que la vitesse locale puisque la distinction ne s'impose pas pour un fluide parfait.

Qu'en est-il pour un fluide réel ?

Nous avons rappelé ci-dessus que le débit (volumique ou massique) est défini grâce à la vitesse moyenne v_{moy} . Mais, s'agit-il encore de cette vitesse moyenne dans le terme d'énergie cinétique ?



La section S_1 peut être décomposée en petites surfaces élémentaires

dS_i tout comme la section S_2 .

En se rappelant que : $pression = \frac{Puissance}{débit_volumique}$, et que le débit volumique est défini par :

$Q_v = \int_{sectionS} v_i \cdot dS_i$, on peut écrire le théorème en bilan de puissance sur la section S_1 (ou sur la section S_2) :

$$\int_{sectionS} p_i \cdot v_i \cdot dS_i + \int_{sectionS} \frac{1}{2\rho} \cdot v_i^2 \cdot v_i \cdot dS_i + \int_{sectionS} \rho \cdot g \cdot z_i \cdot v_i \cdot dS_i = C^{ste} \cdot Q_v$$

le premier terme et le troisième terme de cette égalité ne posent pas de problème et font ressortir le débit défini à partir de la vitesse moyenne évoquée en 1) (en effet, les grandeurs p_i et z_i peuvent être sorties de l'intégrale !).

Mais, il n'en va pas de même pour le deuxième terme. Ce terme fait même ressortir une intégrale « en \mathbf{V}^3 », qui n'a aucune raison de redonner la vitesse moyenne

On est donc amené à définir :

→ une vitesse moyenne débitante $v_{moy,Q} = \int_{section} v_i \cdot dS_i$

→ une vitesse moyenne d'énergie cinétique $v_{\text{moy, Ec}}^2 = \frac{\int v^3 dS}{Q_v}$ qui est celle intervenant dans le théorème de Bernoulli

$$p + \frac{1}{2 \cdot \rho} \cdot v_{\text{moy, Ec}}^2 + \rho \cdot g \cdot z = C^{\text{ste}}$$

ces deux vitesses étant a priori différentes !

En pratique, la vitesse moyenne débitante est plus commode à déterminer. C'est d'ailleurs elle qui est reliée au débit.

C'est pourquoi on introduit un coefficient α sans dimension tel que $\alpha = \frac{v_{\text{moy Ec}}}{v_{\text{moy Qv}}}$

Ce coefficient α prend les valeurs suivantes :

- en régime laminaire : $\alpha = 2$
- en régime turbulent, dans un tuyau rectiligne, de section constante, et après un parcours supérieur à 10 fois le diamètre, $1,02 < \alpha < 1,15$
- pour les fluides parfaits, $\alpha = 1$

MORALITE DE CETTE HISTOIRE :

La plupart des écoulements industriels se font en régime turbulent, si bien que l'on peut, sans commettre d'erreur notable, prendre $\alpha = 1$, et continuer d'écrire le théorème de Bernoulli comme il a été vu dans le cours de physique

REMARQUE :

Cette année, nous ne nous soucierons pas de ce coefficient qui sera pris égal à 1, quelque soit le régime, et ce, même en régime laminaire.

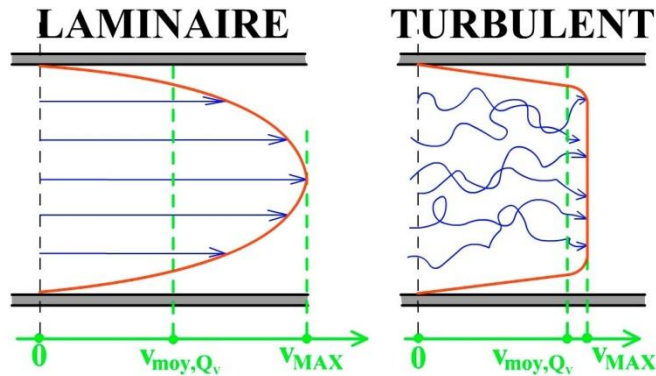
- **Les différents régimes d'écoulement**

Le cours de physique a montré l'importance d'un nombre sans dimension, caractérisant le rapport $\frac{\text{force inertie}}{\text{force frottement}}$.

Ce nombre, dans les écoulements au sein de canalisations cylindriques s'exprime par :

$$Re = \frac{\rho \times v_{\text{moy}} \times D}{\mu}$$

où ρ est la masse volumique du fluide, sa viscosité dynamique (Pa.s), et D le diamètre de la canalisation cylindrique.



Ces rappels de physique vont nous servir à étudier une catégorie importante de débitmètres : *les débitmètres à organe déprimogène*

si $Re \leq 2000$: le régime est laminaire, les forces de frottement dominent dans ce type d'écoulement, la conséquence est que les couches de fluide glissent les unes sur les autres sans s'entremêler. Le profil des vitesses est parabolique

si $2000 \leq Re \leq 4000$: le régime est incertain, mais, s'il est turbulent à un certain instant, alors, il le restera

2. Classification des principaux débitmètres :

2 .1 Débits à pression différentielle

- Débit mètre ultrason

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° 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.

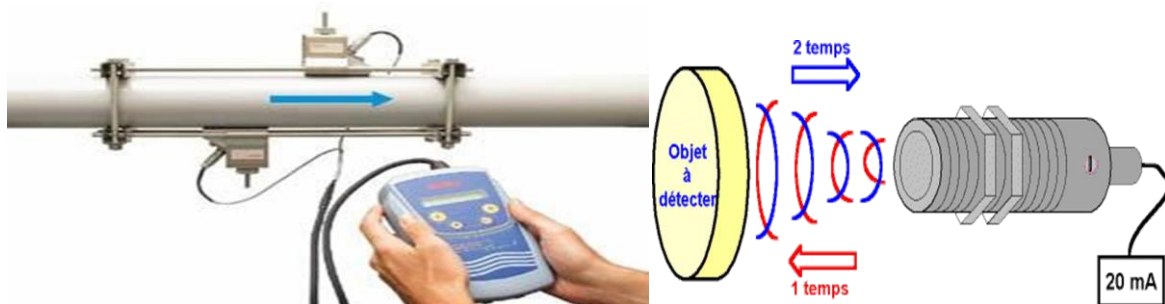


Figure 1 Débit mètre ultrason

- 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.
- **Débit mètre 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 m³/h.
- **Perte de charge** non-nulle (≈ 15 kPa).

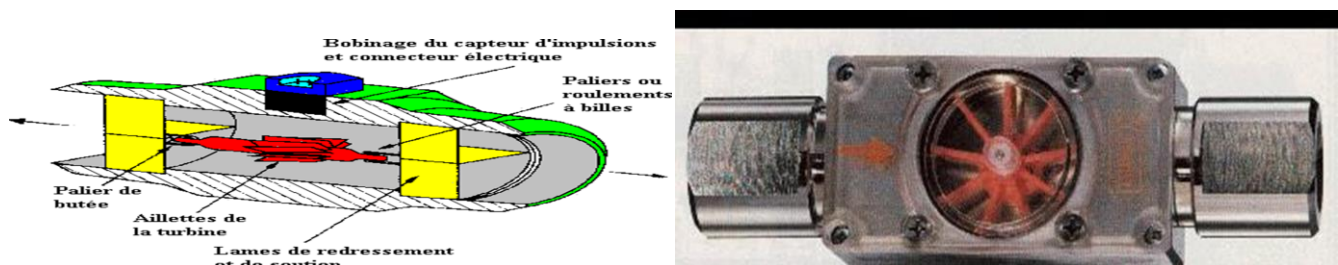


Figure 2 Débit mètre à turbine

- **Débitmètres à organes déprimogènes**
- **Principe**

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

$$Q = K \cdot (\Delta p)^{1/2}$$

Avec :

ρ : masse volumique du liquide

K : constante réelle

Q : débit volumique

Domaine d'utilisation :

Les débitmètres à organes déprimogènes sont utilisés pour la mesure des gaz et des liquides. Ces débitmètres ont connu une large utilisation dans le secteur de l'industrie pétrolière et gazière ainsi que pour la mesure de l'eau. On estime que plus de 50% du parc de débitmètres installés sont du type à pression différentielle. Le diaphragme est le plus utilisé ;

Ce sont des systèmes qui présentent les avantages suivants :

- Peu coûteux,
- Faciles à installer et à exploiter,
- Ils permettent de mesurer de grandes quantités de fluides à haute pression, supérieurs aux débits maximaux mesurables par d'autres type de débitmètres (compteurs volumétriques, turbines etc..).

Les inconvénients de ces débitmètres sont :

- Ils provoquent une perte de charge ou perte d'énergie massique importante : Elle peut aller jusqu'à 90% de la pression différentielle mesurée sur un diaphragme ; Le Venturiet la tuyère provoque une perte de charge beaucoup moins importante en raison de leur géométrie profilée.
- Une faible dynamique de mesure.
- Sensibles aux perturbations de l'écoulement (coudes, vannes, élargissements, pulsations etc..) ce qui nécessitent des conditions d'installation pénalisantes.

Pour les fluides visqueux tels que les produits pétroliers, l'aspect dynamique de l'écoulement constitue une considération très importante pour le choix d'un élément déprimogène.

- Les différents types

Le débitmètre à pression différentielle est constitué de deux dispositifs mécaniques réunis par des tubes de liaison :

- un organe déprimogène ou élément primaire, créant la différence de pression
- un appareil de mesure ou élément secondaire, pour mesurer en permanence cette différence de pression et pour donner automatiquement la valeur du débit instantanée. Les principaux organes déprimogènes sont :

- le tube de Pitot
- le tube de Venturi
- le diaphragme
- la tuyère

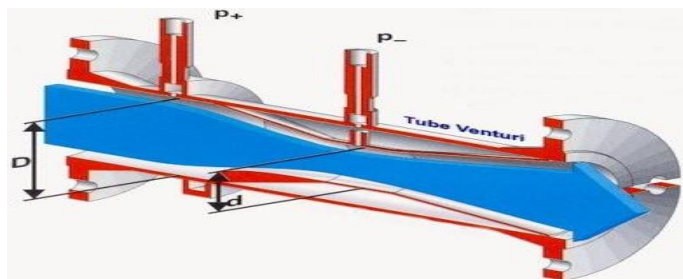


Figure 3 le tube de Venturi

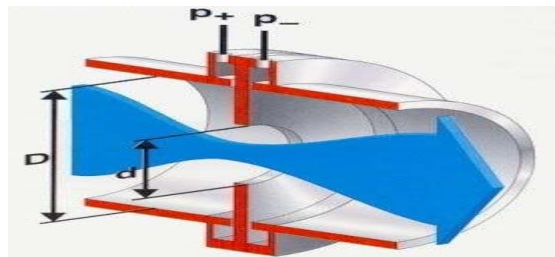


Figure 4 : Diaphragme

1. tube de Pitot

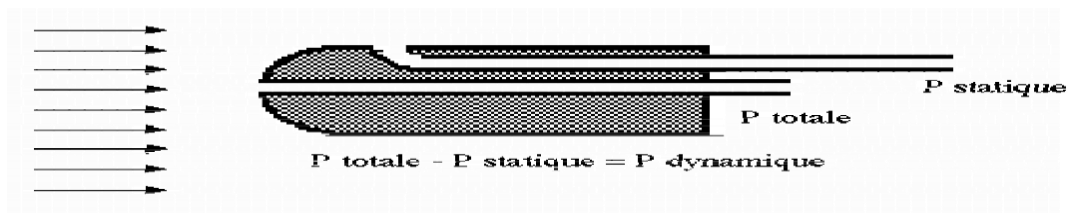
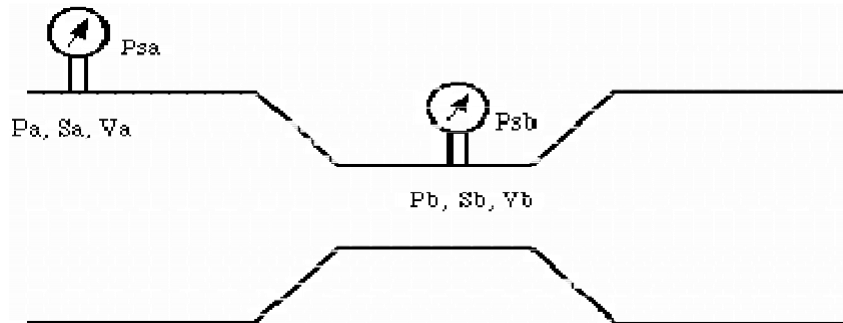


Figure 5 : tube de Pitot

La mesure des pressions statique et totale permet de connaître la vitesse du fluide.

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{totale} - P_{statique})}{\rho}}$$

2. Tube de Venturi



On crée un étranglement dans la canalisation et on mesure les deux pressions statiques. On en déduit alors la mesure la vitesse et le débit.

Le théorème de Bernoulli pour un écoulement sans frottement s'écrit :

$$p_A + \frac{1}{2} \rho \cdot v_A^2 = p_B + \frac{1}{2} \rho \cdot v_B^2 = p_C + \frac{1}{2} \rho \cdot v_C^2$$

D'après l'équation de continuité, $v_B S_B = v_A S_A = q_v$ et $v_B > v_A$ donc $p_A > p_B$

$$P_A - P_B = \Delta P = \frac{1}{2} \rho \cdot \left(\frac{1}{S_B^2} - \frac{1}{S_A^2} \right) \cdot Q^2$$

La différence de pression aux bornes du tube de Venturi est proportionnelle au carré du débit.

De l'équation précédente on déduire le débit volumique :

$$QV = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho \left(\frac{1}{S_B^2} - \frac{1}{S_A^2} \right)}}$$

$$Qv = k \sqrt{\Delta p}$$

Les principaux inconvénients des tubes de Venturi sont :

- sa taille, puisqu'elle peut aller à plus de 6.D, sans compter la longueur nécessaire en amont
- son prix, plus élevé que celui d'un diaphragme

La valeur de la perte de charge qu'il engendre est de 5 % à 20 % de la Δp mesurée.

- **La tuyère (nozzle)**

La tuyère est un « diaphragme amélioré », qui épouse la forme de la veine jusque dans sa section contractée. La partie arrondie a généralement un profil en « quart d'ellipse », excepté pour les faibles débits où on utilise un profil en « quart de cercle ».

En Europe, c'est la norme ISA 1932 qui est la plus utilisée pour le dimensionnement des tuyères, alors qu'aux Etats-Unis, c'est l'ASME.

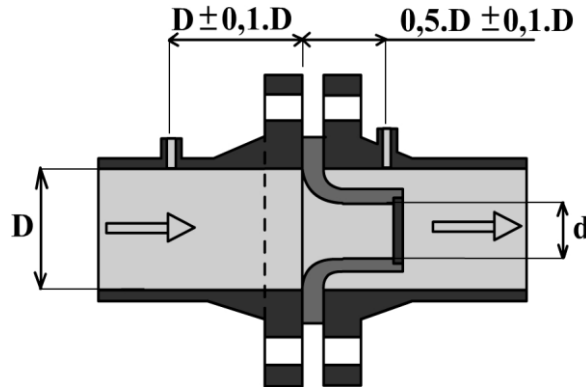


Figure 6 La tuyère

- **Diaphragme :**

Ils sont constitués d'une plaque percé d'un trou calibré perpendiculaire à la conduite. La version habituelle est munie d'un chanfrein sur la partie aval d'une angle qui doit être compris entre 30 et 45° et d'une arête vive en amont de l'orifice. le diamètre intérieur d doit être tel que β soit compris entre 0,20 et 0,80 selon le type du diaphragme, l'épaisseur de la partie cylindrique e doit être compris entre 0,005 D et 0,02 D et l'épaisseur totale E doit être compris entre e et 0,05 D . les diaphragmes peuvent se mettre dans les deux sens de l'écoulement, et ils doivent être symétriques et doivent comporter des arêtes vives sur les deux faces (figure 6).

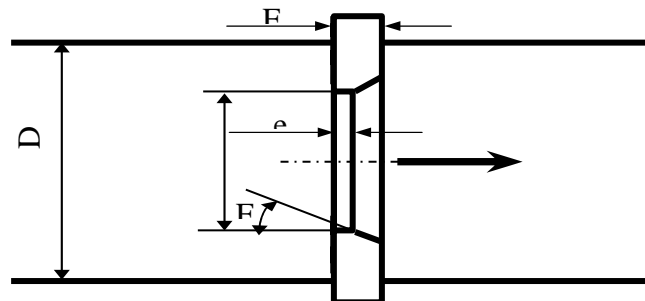


Figure 6 : Diaphragme

3.2 les débitmètres a section variable

L'idée d'utiliser une pression différentielle pour la mesure d'un débit, comme dans les organes déprimogènes, peut aussi être appliquée dans les débitmètres à section variable. MAIS, avec une différence fondamentale : c'est la section de passage qui varie, le champ de pression restant quasiment constant

Ainsi, le terme de « débitmètre à section variable » renvoie aux débitmètres pour lesquels la section de passage pour le fluide varie avec le débit : il s'agit principalement des rotamètres, et des débitmètres à vanne mobile. La mesure du débit est alors donnée par une quantité géométrique comme une hauteur de ludion, ou un angle de vanne.

Le débitmètre à vanne mobile est plutôt utilisé comme un indicateur local, et non comme un débitmètre, aussi sera-t-il présenté succinctement.

3.2 .1. Le rotamètre (« tapered-tube meter », ou « rotameter »)

- *description :*

Le rotamètre est un débitmètre simple et robuste pour les gaz et les liquides qui tient une large part dans le marché des canalisations inférieures à 100 mm.

Il est constitué d'un tube en verre transparent, dont l'intérieur est conique (ou, en tout cas de section variable ...), la section la plus étroite étant dirigée vers le bas. A l'intérieur de ce tube est placé un ludion (« bob »), de masse volumique ρ_L plus élevée que celle du fluide ρ . La forme de ce ludion, et sa masse volumique ρ_L sont choisies en fonction du fluide et du débit maximal à manipuler.

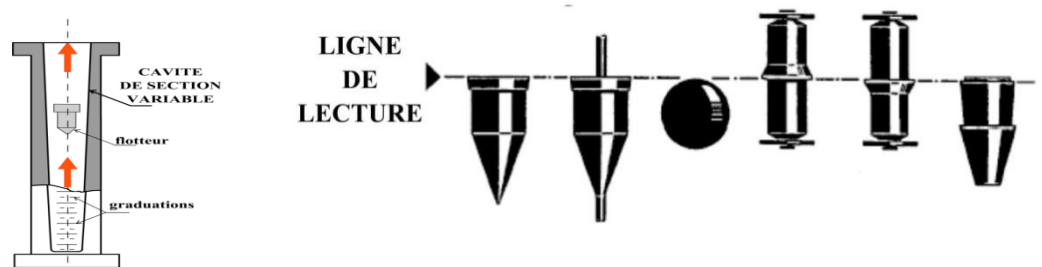


Figure 7 Le rota mètre

Le terme « ludion » est préférable au terme « flotteur » puisque dans tous les cas, il est totalement immergé. Quelques formes possibles du ludion : A noter que la forme sphérique est souvent retenue pour les tubes de petits diamètres. De plus, ce ludion possède des petites rainures tout autour de sa partie supérieure.

Le rôle de ces petites rainures est d'induire une légère rotation (fréquence de l'ordre d'1 Hz), afin d'augmenter la stabilité du ludion (effet gyroscopique).

Pour les rotamètres à tubes très larges, on ajoute parfois une tige dans l'axe du ludion afin d'éviter un retournement de celui-ci.

a- bilan des forces :

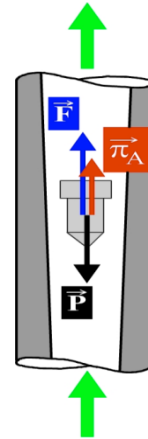
Le fluide circule du bas (faible section) vers le haut (forte section) du rotamètre.

Le ludion est soumis à trois forces :

- son poids \vec{P} (vers le bas)
- la poussée d'Archimède $\vec{\pi}_A$ (vers le haut)
- la traînée \vec{F} (vers le haut)

Le bilan, en régime permanent (c-à-d flotteur à l'équilibre) s'exprime par :

$$\vec{P} + \vec{\pi}_A + \vec{F} = \vec{0}$$



En notant « ρ_L » la masse volumique du ludion, « V_L » le volume du ludion, et « ρ » la masse volumique du fluide ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$) :

$$P = \pi_A + F \Rightarrow \rho_L \cdot V_L \cdot g = \rho \cdot V_L \cdot g + F$$

à ce stade, nous devons donner l'expression de la traînée, qui résulte des différentes forces de frottement s'exerçant sur le ludion (sans démonstration ...) :

$$F = C_x \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \cdot S_L$$

avec :

- C_x : coefficient de traînée qui est quasiment constant pour $100 \leq Re \leq 200000$

- S_L : section de ludion équivalente

Ainsi :

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot V_L \cdot g \cdot (\rho_L - \rho)}{C_x \cdot \rho \cdot S_L}}$$

Dans cette expression, tous les termes sont constants,

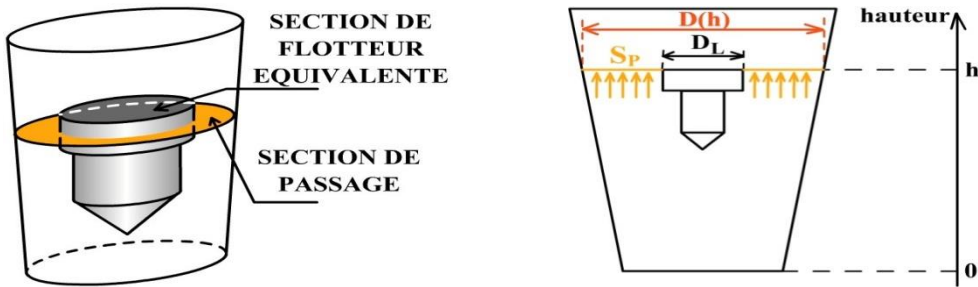
$v = C^{st}$ autour du ludion

le profil des vitesses au voisinage du ludion étant constant, le ludion va se positionner en conséquence, à condition que la section du tube soit variable »

Précisons : appelons

« D_L » le plus grand diamètre du ludion, et « $D(h)$ » le diamètre du tube à la hauteur « h ». Alors, la section par laquelle circule le fluide, appelée section de passage « S_p » s'obtient par,

$$S_p = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2(h) - D_L^2)$$



Cette section de passage dépend bien évidemment de la hauteur « h » du ludion.
Pour finir :

$$Q_v = S_p \cdot v = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2(h) - D_L^2) \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{V_L \cdot g}{C_x \cdot \rho \cdot S_L} \cdot (\rho_L - \rho)}$$

ou encore, en remarquant que la section de passage est une « donnée constructeur S(h) » :

$$Q_v = C^{ste} \cdot S(h) \cdot \sqrt{\frac{m_L \cdot g}{\rho \cdot S_L} \cdot \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_L} \right)}$$

b- nécessité d'un étalonnage :

afin de déterminer les graduations de son rotamètre, le constructeur utilise un ludion bien précis, sur un fluide bien précis (souvent pour les liquides, de l'eau à 15 °C, et pour les gaz, de l'air à 15°C sous 1 bar). A priori, la valeur lue sur ce rotamètre, ne sera exacte que pour ce ludion, et ce fluide.

Son emploi serait bien limité si on ne pouvait sortir de cet étalonnage.

Dans les autres cas (ludion différent et/ou fluide différent), on applique le terme correctif suivant (les valeurs indicées « 0 » concernent le fluide d'essai, et les valeurs indicées « 1 »

$$Q_{v,REEL} = Q_{v,LU} \cdot \frac{D_{L,1}}{D_{L,0}} \cdot \sqrt{\frac{m_{L,1}}{m_{L,0}} \cdot \frac{\left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_{L,1}} \right)}{\left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_{L,0}} \right)}}$$

concernent le fluide étudié) :

avec, donc :

- $D_{L,0}$ et $D_{L,1}$ diamètres respectivement du ludion d'essai, et du ludion utilisé
- $\rho_{L,0}$ et $\rho_{L,1}$ leur masse volumique respective
- $m_{L,0}$ et $m_{L,1}$ leur masse respective

- ρ_0 le fluide d'étalonnage, dans les conditions de température et pression de l'étalonnage
- ρ_1 le fluide réellement utilisé, dans éventuellement d'autres conditions que celles de l'étalonnage

c- Caractéristiques :

- construction simple et robuste
- grande fiabilité
- faible perte de charge
- utilisable pour une large variété de liquides et gaz
- portée typique pour de l'eau : 0,04 L/h à 150 m³/h
- portée typique pour de l'air : 0,5 L/h à 3000 m³/h
- rangeabilité de l'ordre de 10 :1
- imprécision de l'ordre de 0,4% à 4% du débit maximal
- insensible aux turbulences en amont (donc, pas de contrainte sur la forme de la conduite en amont)
- température maximale d'utilisation de l'ordre de 400 °C
- pression maximale d'utilisation de l'ordre de 40 bar
- faible coût
- faible prix d'installation

Signalons aussi quelques problèmes inhérents aux rotamètres :

- nécessité de les installer verticalement
- non utilisable pour les faibles débits (le coefficient C_x varie énormément)
- non utilisable pour les vapeurs saturées
- non utilisables pour les liquides corrosifs, et/ou contenant des résidus solides
- non utilisables pour les gaz contenant des résidus solides

La plupart des rotamètres sont insensibles aux variations de viscosité. Les plus sensibles sont les plus petits rotamètres, avec des ludions sphériques, tandis que les très grands y sont quasiment insensibles.

3.2.2. Le débitmètre à vanne mobile

Le débitmètre à vanne mobile est un composant robuste, tout indiqué pour les débits très importants lorsqu'une précision modeste est requise.

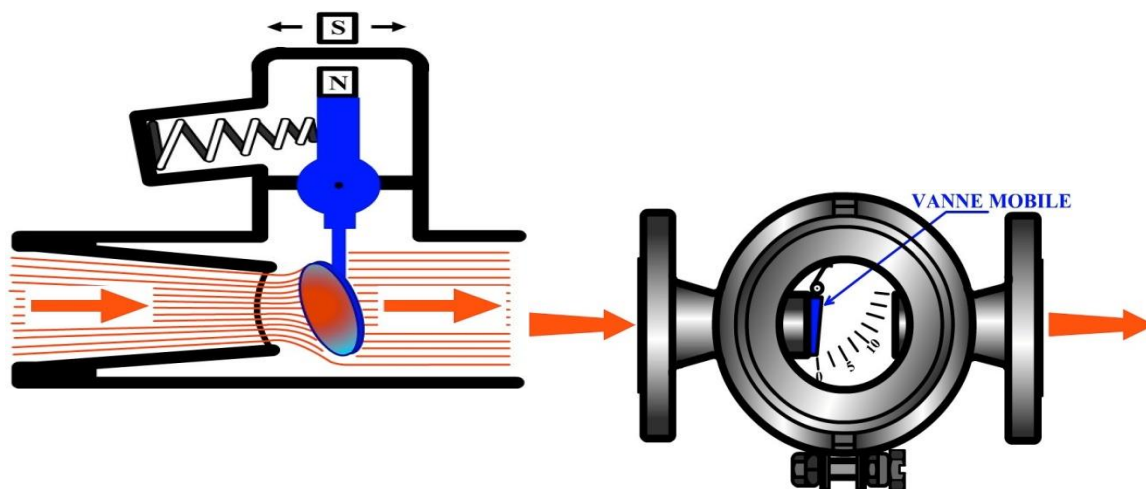
Les fluides fortement chargés en impuretés peuvent également être mesurés.

Son principe est illustré par le schéma ci-contre : Un volet, qui ferme la canalisation à débit nul grâce à un dispositif de rappel (un ressort par exemple), va subir une force (due à la pression dynamique) dès qu'un débit sera établi dans la canalisation.

On accède à la lecture du débit par une échelle indexant le déplacement de la vanne.

Là encore, un étalonnage sera nécessaire en fonction du fluide utilisé.

Un exemple de réalisation est présenté ci-dessous :



4. Les Compteurs

4.1. Différents types

La figure 1 donne les différents types de compteurs et les calibres usuellement couverts, variables selon les constructeurs, en fonction du média de comptage. Une autre typologie correspond au totalisateur. Si les totalisateurs à aiguilles ne sont plus proposés par les grands fabricants, on trouve un choix de totalisateurs secs ou noyés (figure 9).

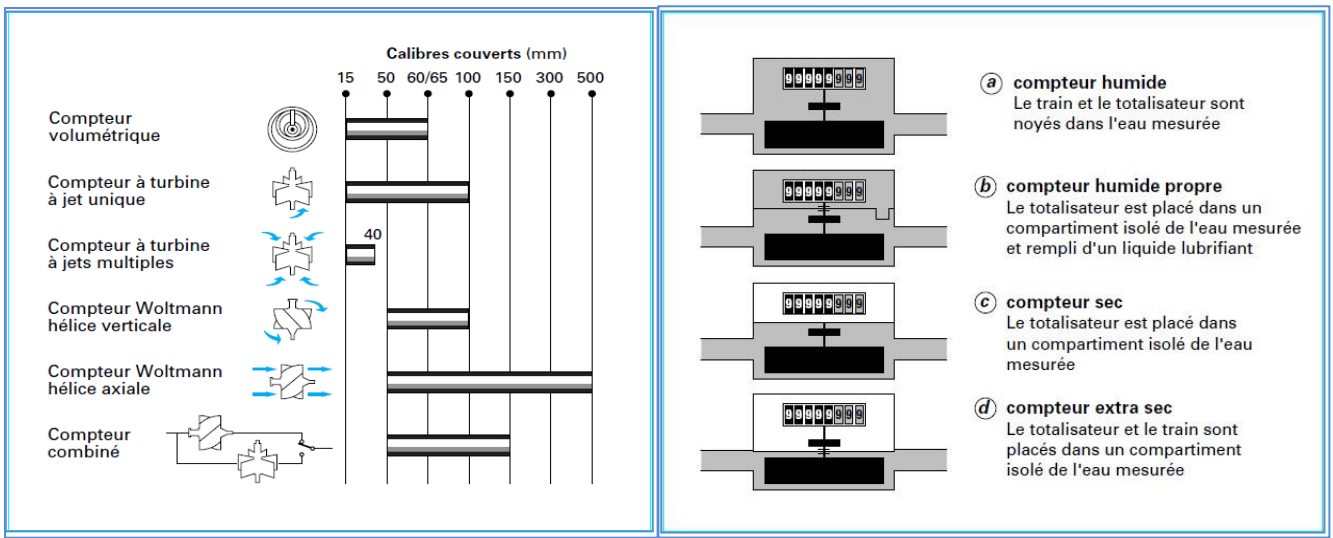


Figure 8 – Différentes technologies de compteurs **Figure 9 – Différents types de totalisateurs**

Un compteur est caractérisé par sa courbe de réponse aux débits transitant, comparée aux valeurs mesurées par un dispositif étalon. On définit ainsi **un canal de tolérance et des erreurs** maximales tolérées en fonction des débits nominaux, de transitions, minimales, et maximales. Pour un compteur neuf, l'erreur maximale admise entre Q_{min} et Q_t est de $\pm 5\%$; elle est de $\pm 2\%$ entre Q_t et Q_{max} . On tolère que ces valeurs soient doublées pour un compteur en service. Le tableau 1 résume le classement. Pour toutes les classes uniformément, le débit maximal est fixé au double du débit nominal : $Q_{max} = 2 Q_n$. À de rares exceptions près, les services d'eau occidentaux font appel à des compteurs de classe C.

Tableau 1 : Classement des compteurs selon la CE

Classe		$Q_n < 15 \text{ m}^3/\text{h}$	$Q_n > 15 \text{ m}^3/\text{h}$
A	Q_{min}	$0,04 Q_n$	$0,08 Q_n$
	Q_t	$0,10 Q_n$	$0,30 Q_n$
B	Q_{min}	$0,02 Q_n$	$0,03 Q_n$
	Q_t	$0,08 Q_n$	$0,20 Q_n$
C	Q_{min}	$0,01 Q_n$	$0,006 Q_n$
	Q_t	$0,015 Q_n$	$0,015 Q_n$

Q_n débit normal ou nominal.
 Q_t débit du transition.

1. Problème du décomptage

Il ne se pose pas pour les compteurs placés sur les branchements de fourniture d'eau aux usagers où il ne doit pas y avoir de retour d'eau. Par contre, au sein des réseaux maillés (entre des conduites de distribution), lors des études de ces derniers et surtout dans le cas de vente d'eau entre deux services différents, il est important que les retours soient décomptés.

Les compteurs volumétriques sont réversibles par construction, les compteurs à hélices ou de vitesse ont une précision moins bonne en sens inverse du sens normal. Le compteur à jet unique accuse la plus grande différence de précision entre les deux sens.

1. Compteurs de volume

Un récipient d'un volume connu se remplit et se vide alternativement ; le mouvement est transmis par un train mécanique réducteur ou par un dispositif magnétique vers un totalisateur généralement à huit tambours chiffrés (figure 10). Les compteurs de volume sont les plus sensibles (un compteur de 15 mm a un débit de démarrage de 1 L/h environ) mais ils peuvent être détériorés par des coups de bélier ou des accumulations d'impuretés ; ils ne doivent être employés qu'avec de l'eau parfaitement claire. Ils peuvent être disposés dans n'importe quelle position, mais il est souhaitable de les fixer à l'horizontale.

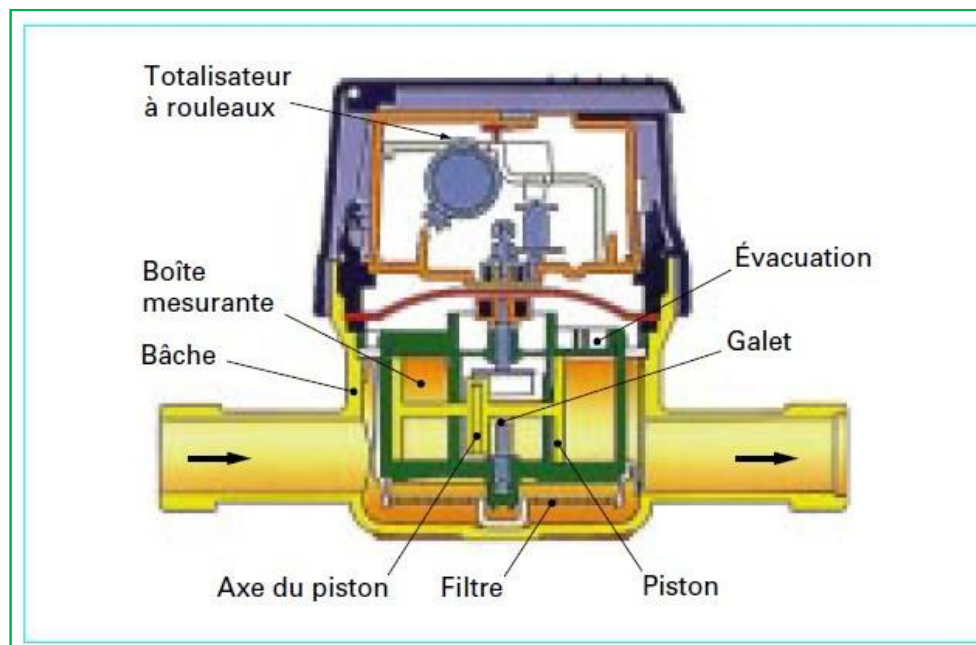


Figure 10 – Compteur volumétrique

2. Compteurs de vitesse

L'eau y traverse un ou plusieurs orifices de section précise dont le jet de sortie met en mouvement une turbine dont le nombre de tours est enregistré. Le comptage se fait par un train mécanique et un totalisateur (figure 11). Leur sensibilité est moins bonne que celle des compteurs volumétriques (un compteur de 15 mm a un débit de démarrage de 3 L/h environ) mais leur détérioration est moins fréquente. Ils sont insensibles aux coups de bélier et les impuretés les traversent plus aisément. Ils doivent obligatoirement être posés à l'horizontale. En effet, ils perdent au moins une classe de mesure s'ils ne sont pas horizontaux (un compteur de classe C devient de facto au mieux un compteur de classe B)

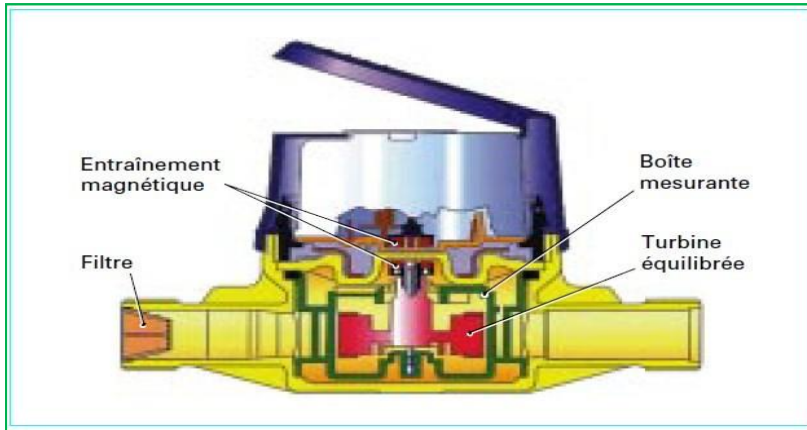


Figure 11 – Compteur de vitesse

3. compteurs à hélice (Woltmann)

Ils sont à hélice verticale ou à hélice axiale. Dans les **compteurs à hélice verticale** se trouve un cylindre abritant une hélice (figure 12). L'eau arrive par la partie inférieure à travers un diviseur adapté au nombre de pales de l'hélice. Le mouvement ascendant de l'eau entraîne l'hélice à une vitesse correspondant au débit et le nombre de tours est transmis par train réducteur au comptage. Ces compteurs sont très robustes ; insensibles aux remous, ils sont bien adaptés pour le comptage à la sortie des pompes ; ils engendrent une perte de charge sensiblement inférieure à celle des compteurs de volume. Ces compteurs doivent être disposés horizontalement. Les **compteurs à hélice axiale** comportent une hélice et un diviseur (figure 13) ; ils peuvent être de grande dimension (jusqu'à 800 mm). Ils sont, par contre, sensibles aux remous et doivent être précédés soit d'une certaine longueur droite horizontale, soit d'un stabilisateur d'écoulement.

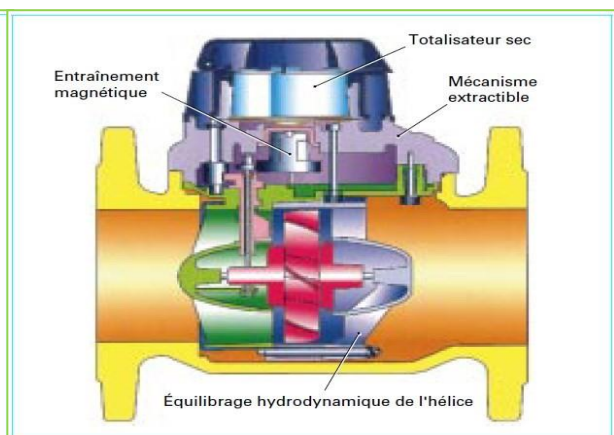
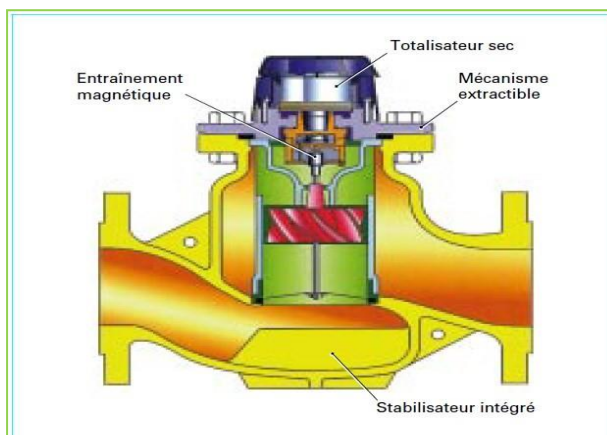


Figure 12 – Compteur Woltmann à hélice verticale **Figure 13**– Compteur Woltmann à hélice axiale

4. Compteurs combinés

Suivant la dimension de la canalisation, ils comprennent :

a) -pour des **diamètres de 50 à 100 mm** : — un compteur principal à hélice verticale, un compteur secondaire de vitesse ou de volume, — un commutateur ;

b) - pour des diamètres supérieurs à 100 mm :

— un compteur principal à hélice axiale, — un compteur secondaire de vitesse, — un commutateur.

À faible débit, la valve de commutation (figure 14) est fermée, seul le compteur secondaire fonctionne.

Un accroissement de débit entraîne une augmentation de pression dans le circuit principal du compteur.

Quand la force résultant de cette pression devient supérieure à la force de résistance exercée par le ressort du commutateur, la valve s'ouvre.

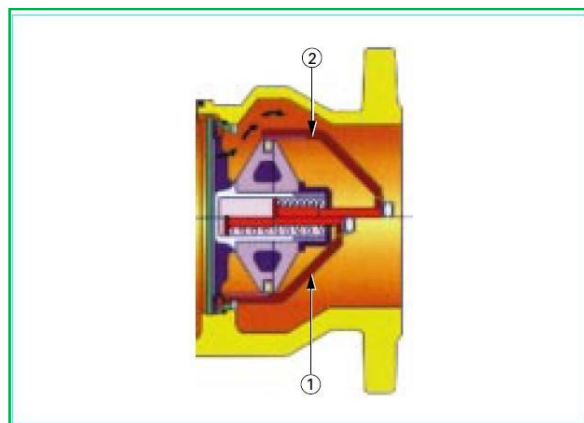


Figure 14 : Commutateur de compteur combiné

1. Détermination du rendement

Comptage à l'amont

Plus les débits sont élevés et plus les ouvrages d'admission sont de grande dimension, plus les erreurs peuvent être importantes, en valeur absolue bien sûr, mais également en pourcentage. Lorsque l'on quitte le domaine de la métrologie par comptage, c'est-à-dire au-delà des plus gros compteurs Woltmann, on entre dans le domaine de la débitmétrie élevée. On fait alors appel aux organes déprimogènes, aux débitmètres à ultrasons ou électromagnétiques. Ces appareils ont à présent une grande précision (erreur inférieure à $\pm 5\%$) et une bonne fiabilité ; ils nécessitent toutefois plus de vérifications et de réétalonnages que les compteurs classiques.

Principe du débitmètre électromagnétique

Le principe de fonctionnement découle de la loi de Faraday. La tension induite dans un conducteur qui se déplace perpendiculairement à un champ magnétique est directement proportionnelle à la vitesse de déplacement du conducteur. Dans le débitmètre (figure 15), deux bobines (B1 et B2), disposées perpendiculairement au tube de mesure et parcourues par un courant continu, produisent un champ magnétique B . Les deux électrodes E1 et E2, diamétralement opposées et perpendiculaires à la fois au tube de mesure et au champ magnétique, recueillent une tension « E » lorsqu'un liquide conducteur y circule à la vitesse moyenne V .

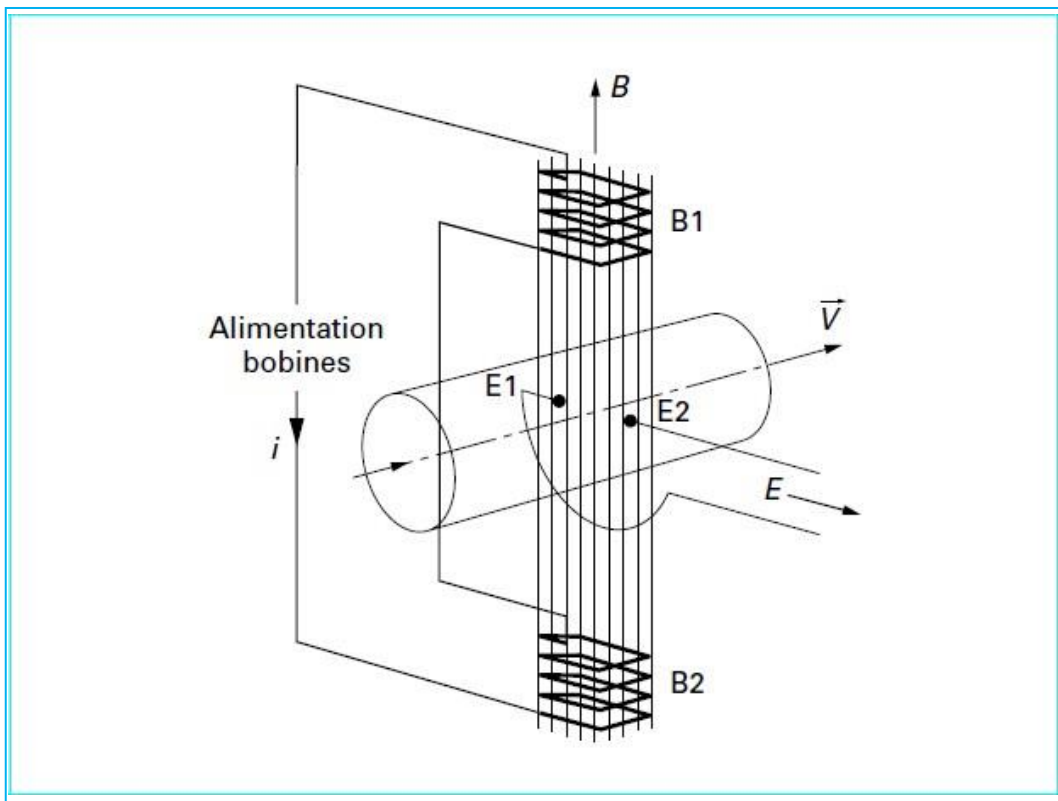


Figure 15 – Principe du débitmètre électromagnétique

La loi de Faraday donne : $E = kV$ (Avec k une constante pour un appareil donné)

CHAPITRE 4

MESURE de niveau

Chapitre 4 Mesure de Niveau

1. Introduction

Le contrôle de niveau est utilisé dans de nombreux et divers domaines, afin de connaître l'état de remplissage de récipients, c'est-à-dire le niveau qu'y atteint le produit présent.

Il existe deux types d'informations relatives au niveau :

- la mesure continue.
- la détection de seuil.

2. Mesure de niveau

La mesure de niveau est une mesure continue, c'est-à-dire que le capteur et son conditionneur délivrent un signal proportionnel au niveau de liquide dans le réservoir. À chaque instant, l'opérateur connaît exactement le volume du liquide (ou le volume encore disponible dans le réservoir).

2.1. Méthodes hydrostatiques

2.1.1. Rappel de physique

Pour un liquide homogène donné, la pression relative au fond de réservoir est proportionnelle au niveau de celui-ci. La mesure de cette pression nous informe directement sur le niveau de liquide, mais dépend, de la masse volumique ρ du liquide.

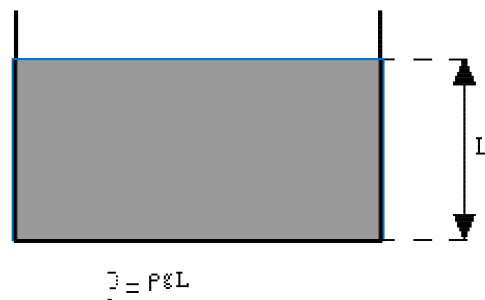


Figure 1 : principe de mesure hydrostatique

• Flotteur

Le flotteur est composé d'un système maintenu à la surface du liquide et solidaire d'un capteur de position.

Le capteur transmet un signal électrique qui correspond au niveau du liquide dans le réservoir.

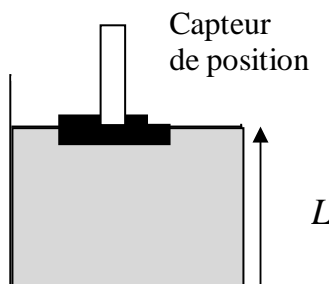


Figure 2 : principe d'un flotteur



• Plongeur

Le plongeur est un système immergé au fond de réservoir, dont la hauteur est au moins égale à

la hauteur maximale du liquide dans le réservoir. Il est suspendu à un capteur dynamométrique qui se trouve soumis à une force F (le poids apparent), fonction de la hauteur L du liquide :

$$F = P - \rho g S l \quad (1)$$

où P est le poids du plongeur, S est l'aire de sa section, et $\rho g S L$ est la poussée d'Archimède s'exerçant sur le volume immergé du plongeur .

$$d'où \quad L = (P - F) / \rho g S \quad (2)$$

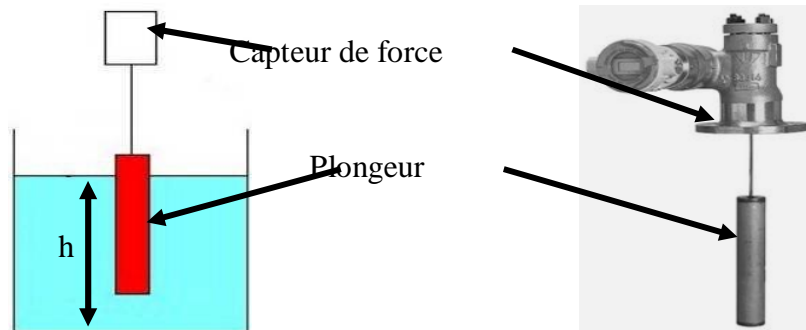


Figure 3: Mesure par plongeur

2.2 Appareils optiques (DéTECTEUR DE NIVEAU OPTIQUES)

- Ancien principe

Une lampe émet horizontalement un faisceau lumineux étroit et directif. Ce faisceau lumineux est détecté par une cellule photoélectrique.

Lorsque le niveau monte, le faisceau lumineux traverse le liquide (transparent ou non). L'intensité lumineuse reçue est donc diminuée **Figure 4**.

La plupart du temps, l'émetteur est une diode électroluminescente, choisie pour la faible puissance électrique dont elle a besoin.

Le récepteur est une photorésistance, un phototransistor ou une cellule photoémissive.

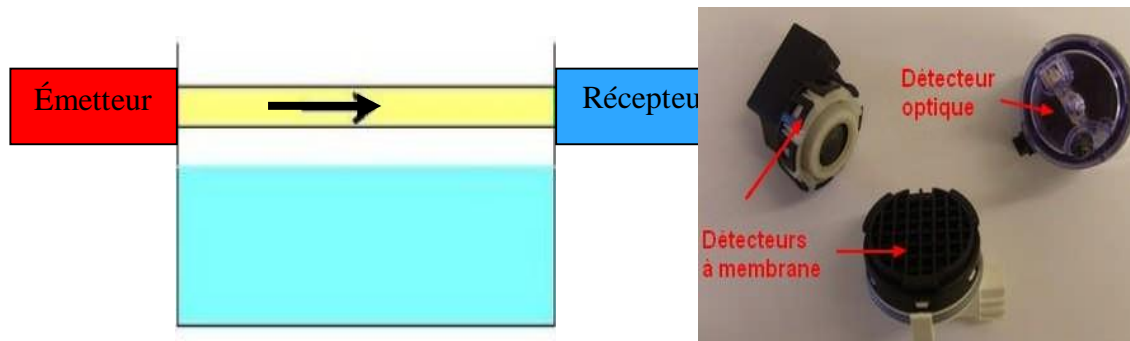


Figure 4 : Détection de niveau optique

- **Par fibre optique**

Il est nécessaire que l'indice de réfraction du liquide soit différent de celui de l'air.

Lorsque le niveau est bas, le rayon lumineux incident est réfléchi à l'extrémité de la fibre optique et est détecté à sa sortie **Figure 5**.

Lorsque le niveau est haut, le rayon incident est réfracté dans le liquide.

Quand le détecteur de sortie ne détecte plus le rayon lumineux en sortie, cela signifie que le niveau seuil est atteint.



Figure 5: Détection de niveau par fibre optique

2.3.Mesure de niveau bulle à bulle

Pour mesurer la pression, on peut utiliser un système à bulle.

Le système comporte :

- Une canne d'injection ;
- Un manomètre mesurant la pression d'air de bullage ;
- Un contrôleur de débit visuel (dit bulleur) ;
- Un régulateur de débit ;

Le régulateur de débit contrôle celui-ci de manière à avoir un débit très faible. Ainsi, en

négligeant les pertes de charges, la pression P est la mesure de la pression en bout de canne. P fournie une mesure de L

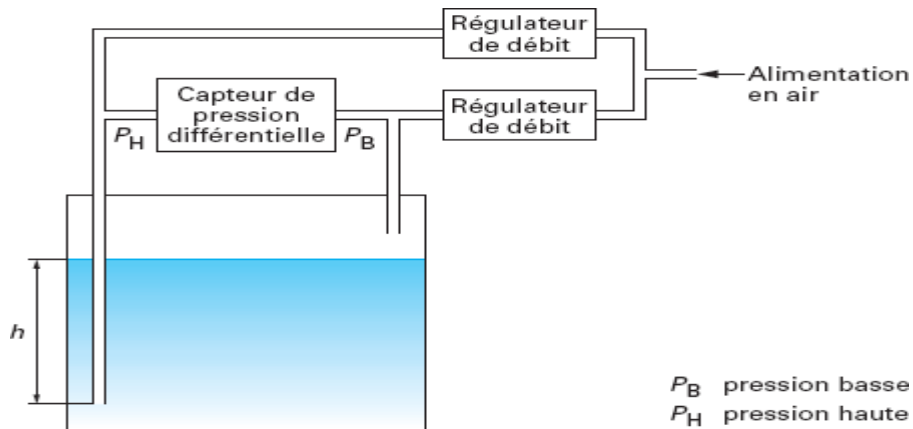


Figure 6 : Mesure de niveau h par bullage dans un réservoir pressurisé

2.3. Mesure de niveau par la pression

On place un capteur de pression différentielle à la base du réservoir **Figure 7**. La pression Mesurée par le capteur est égale à :

$$P = P_0 + \rho \cdot g \cdot h \quad (3)$$

Avec : P_0 : pression au sommet du réservoir, $\rho \cdot g \cdot h$: pression hydrostatique, h : hauteur du liquide

ρ : densité du liquide, g : accélération de la pesanteur.

Quelques précisions sur le capteur : Le corps d'épreuve du capteur est une membrane, soumise sur l'une de ses faces à la pression P et sur l'autre à la pression P_0 . La déformation de la membrane est proportionnelle à la hauteur h

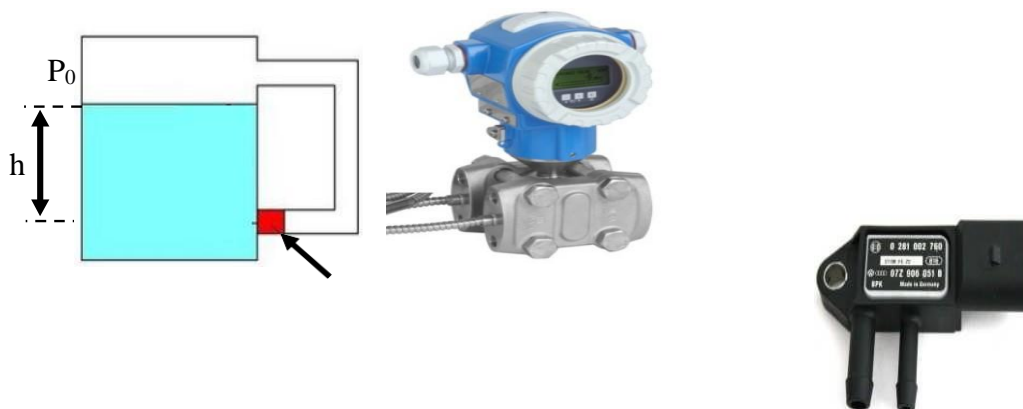


Figure7: Mesure par un capteur de pression différentielle

Chapitre 5

Capteur de température

CHAPITRE 4 : CAPTEURS DE TEMPERATURE

1. Définition

La température n'est pas une variable d'état, c'est une grandeur intensive, qui peut être mesurée de deux façons différentes :

- A l'échelle moléculaire : elle est liée à l'énergie cinétique moyenne des constituants de la matière.
- A l'échelle macroscopique : Certaines propriétés dépendent fortement de la température et peuvent être choisies dans la construction des échelles thermométriques.

2. Les différentes unités de température

2.1. Les échelles de température

- **Echelle Absolue**

Cette échelle, dont l'unité est le **kelvin (K)**, est celle du système internationale. La température absolue est définie à partir du point triple de l'eau, température à laquelle, la glace, l'eau liquide et la vapeur d'eau sont en équilibre thermique, la pression en ce point étant connue. Cette température est fixée par définition à 273,16 K. Le zéro absolu, 0 K, est le zéro de cette échelle.

- **Echelle Celsius**

Elle est définie à partir de l'échelle Kelvin par : $\theta[^\circ C] = T[K] - 273.15$ (1)

- Fusion de la glace à 0 °C.
- Ébullition de l'eau distillée à 100 °C.

- **Autres échelles**

Les pays anglo-saxons utilisent une échelle de température différente : l'**échelle Fahrenheit**, définie par :

$$1[^\circ F] = \frac{9}{5}\theta[^\circ C] + 32 \quad (2)$$

Point triple de l'eau (0.01 °C): 459.7 °F.

L'échelle **Rankine**, est définie par : $\theta[^\circ C] = 1,8 \cdot T[K]$ (3)

Zéro thermodynamique: 0 °R;

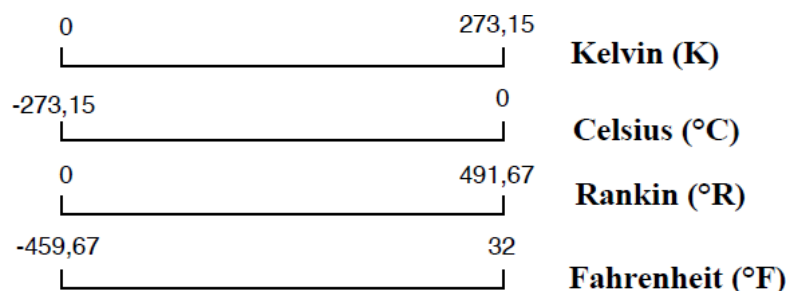


Figure .1 : Echelles de température

3 3. Thermomètres

4 3.1. 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.

3.1.1. 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.



Figure2. Thermomètres à dilatation de liquide

o Loi de variation

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

$$V = V_0(1 + \alpha \times \theta) \quad (4)$$

avec : V_0 : volume du liquide à 0°C ; V : volume de liquide à $\theta^\circ\text{C}$;

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

Cette équation nous montre que la sensibilité du thermomètre à dilatation de liquide est proportionnelle au volume V_0 (fonction du volume du réservoir), au coefficient de dilatation du liquide (donc au type de liquide choisi) et inversement proportionnel à la section S du capillaire car :

$$\Delta h = \frac{\Delta V}{S}$$

Tableau 1 : liquides thermométriques

Liquides	Domaine d'emploi (°C)	α en °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	

L'espace libre au dessus du liquide peut-être vide. Toutefois, pour empêcher la colonne de liquide de se fractionner facilement et aussi pour permettre de mesurer des hautes températures, l'espace libre est rempli d'un gaz neutre (azote ou argon) mis sous une pression fonction de la température à mesurer. La chambre d'expansion évite les trop fortes variations de pression.

• **Nature de l'enveloppe**

En fonction de la température à mesurer, il y a lieu de choisir le matériau constituant l'enveloppe du thermomètre.

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

Colonne émergente

En dehors des réglages classiques (zéro, échelle), on doit penser à corriger la mesure de la température si il est impossible d'immerger complètement la colonne.

Dans les cas (a) et (c) la colonne de liquide thermométrique est totalement immergée dans l'enceinte dont on mesure la température. La dilatation de ce liquide se fait donc pleinement.

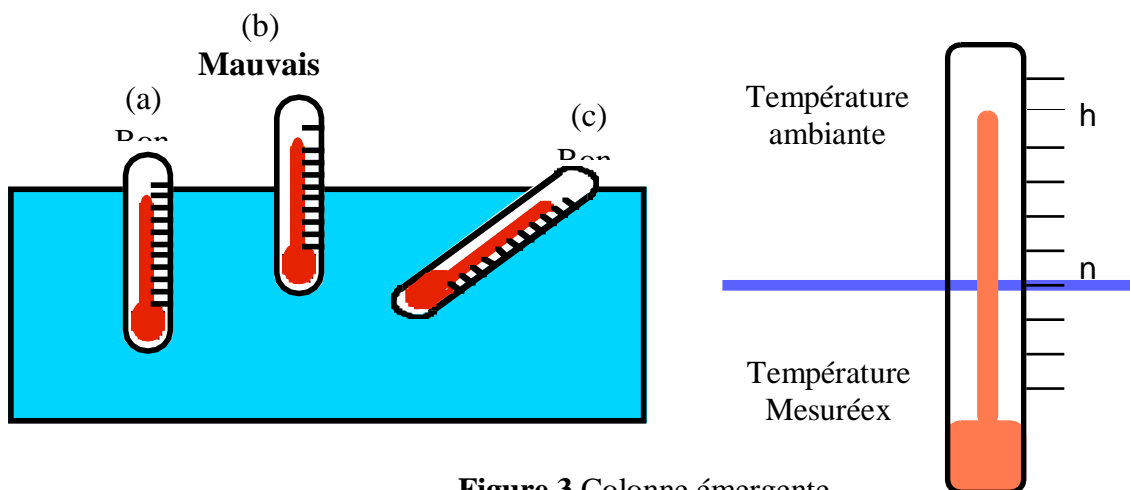


Figure 3 Colonne émergente

Dans le cas (b) la colonne de liquide est immergée jusqu'à la graduation n, dans l'enceinte de température inconnue. La partie de la colonne située entre n et h est en contact avec la température ambiante. Le volume correspondant à une graduation est noté v.

Le volume à la température ambiante est :

$$V = (h - n) \times v \quad (5)$$

Ce volume est à la température ambiante, donc il en résulte un défaut de dilatation de :

$$\delta V = V \times \alpha \times (x - t)$$

$$\delta V = (h - n) \times v \times \alpha \times (x - t)$$

La correction à apporter est donc :

$$\delta h = \frac{\delta V}{v} = (h - n) \times \alpha \times (x - t) \quad (6)$$

En réalité, la partie émergée n'est pas à la température ambiante. Dans la pratique on prend les 7/10 de la correction calculée. Cette correction n'étant pas très précise, on essayera, dans la mesure du possible, de positionner au mieux le thermomètre (cas a ou c).

3.1.2. Thermomètres à dilatation de gaz

L'équation d'un gaz parfait

est : $PV = nR\theta$ avec :

- n : Nombre de moles ;
- $R = 8,31 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$;
- θ : Température en K ;
- P : Pression en Pa.

On voit donc que, si l'on enferme une certaine quantité de gaz dans une enveloppe de volume constant V, la pression développée par le gaz est proportionnelle à la température absolue :

$$P = \frac{R}{V} \theta, \text{ avec le rapport } \frac{R}{V} \text{ constant.}$$

3.2.1. Principe

Sous une forme schématisée, un thermomètre à gaz est composé d'une sonde (A), formant une enveloppe dans laquelle est enfermé 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. La longueur du tube de raccordement ne doit pas excéder 100 mètres. 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.

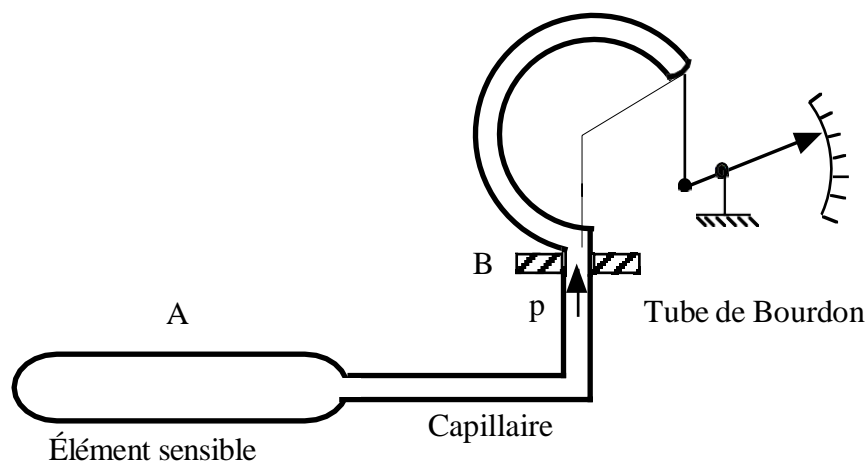


Figure 4. Thermomètres à dilatation de gaz

Les gaz le plus souvent employés sont fournis tableau suivant :

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

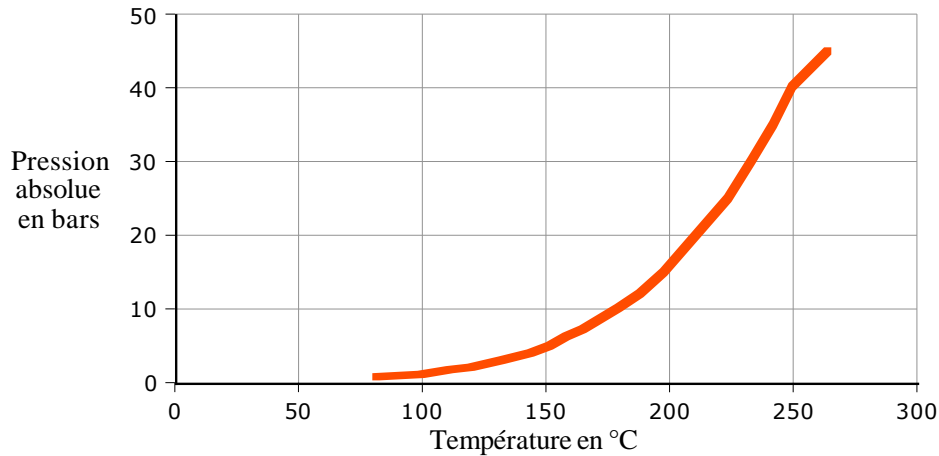
Remarques :

- La température critique, c'est la température maximale à laquelle un gaz ou une vapeur peut être liquéfié par variation de pression uniquement.
- La différence de hauteur entre la sonde sensible et la spirale de mesure est sans effet, puisque la masse du gaz est négligeable.
- Le gaz doit être soigneusement séché avant l'emploi et être utilisé dans des conditions qui le rapprochent de l'état parfait.
- L'avantage des thermomètres à gaz est leur précision, 1 % en mesures industrielles. Mais leur sonde est d'assez grande dimension. Ils permettent le repérage des très basses températures. Certains thermomètres à gaz sont de véritables instruments de précision, auxquels on a recours pour les déterminations de référence de la température. Le thermomètre à hydrogène en est l'exemple classique.

3.2.2. Thermomètres à tension de vapeur

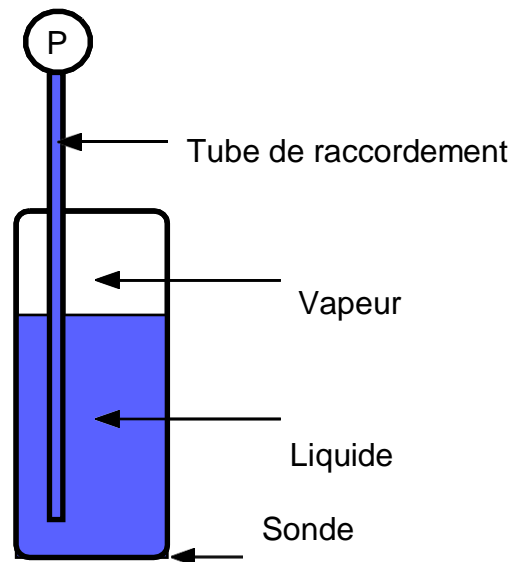
Définition

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. À une température correspond pour le liquide choisie une pression de vapeur fixe.



Principe

La mesure thermométrique se fait par l'intermédiaire d'une mesure de la tension de vapeur d'un liquide. La réalisation la plus simple est le thermomètre à simple remplissage. 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. 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.



La vaporisation du liquide se faisant toujours au point le plus chaud du système clos, les capteurs à simple remplissage ne sont utilisables que si le bulbe est à une température supérieure à la température ambiante (sinon, la vaporisation se ferait au niveau du capteur de pression). Pour pallier cet inconvénient et permettre des mesures de températures inférieures et supérieures à la température ambiante, on utilise le bulbe à double remplissage. Le liquide évaporable est placé dans la zone médiane du bulbe. C'est un liquide transmetteur non évaporable qui est dans le fond du bulbe et dans l'ensemble capillaire - capteur de pression. Ce liquide est soit de l'huile, soit de la glycérine. Il transmet au manomètre la pression de la vapeur.

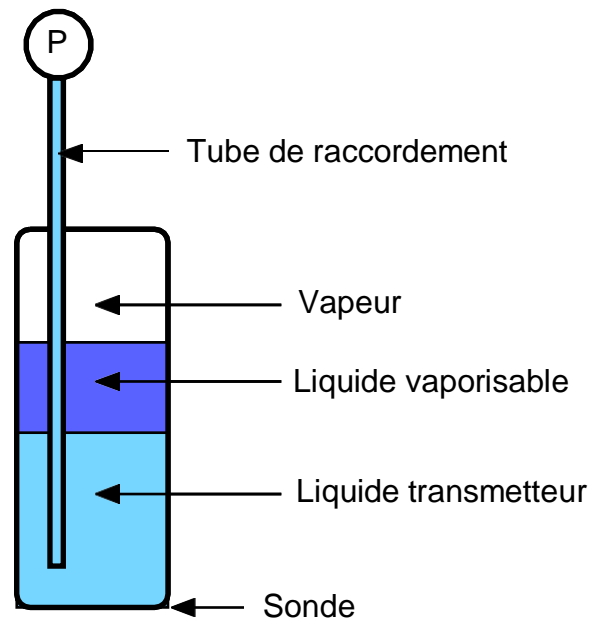


Tableau 2 Liquides de remplissage et domaine d'utilisation :

Liquide	Domaine d'utilisation Température en °C	Domaine d'utilisation Pression en bars
Ammoniac	-20 à +60	2 à 25
Propane	0 à +100	5 à 45
Butane	+20 à +140	2 à 30
Chlorure d'éthyle	+30 à +180	2 à 50
Alcool méthylique	60 à +220	1 à 53
Benzène	+80 à +280	1 à 43

Remarques :

- La position de la sonde par rapport au capteur de pression influence la mesure.
- L'ordre de grandeur de la classe de précision est de 1 %.

3.3. Thermomètres à dilatation de solide

Principe

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

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

Avec :

- L la longueur de la tige à la température θ ;
- L_0 la longueur de la tige à $0\text{ }^\circ\text{C}$;
- θ la température en $^\circ\text{C}$;
- α le coefficient de dilatation linéaire du métal.

3.3.1. Bilame

Une bilame thermique est constituée de deux bandes d'alliage dont les coefficients de dilatation sont très différents, soudées à plat sur toute leur surface. Lorsqu'une telle bande est soumise à une variation de température, les dilatations différentes des deux faces provoquent des tensions, il en résulte une incurvation de l'ensemble.

La soudure des deux constituants doit être suffisamment intime pour que la zone de jonction soit mécaniquement aussi résistante que chacune des deux lames.

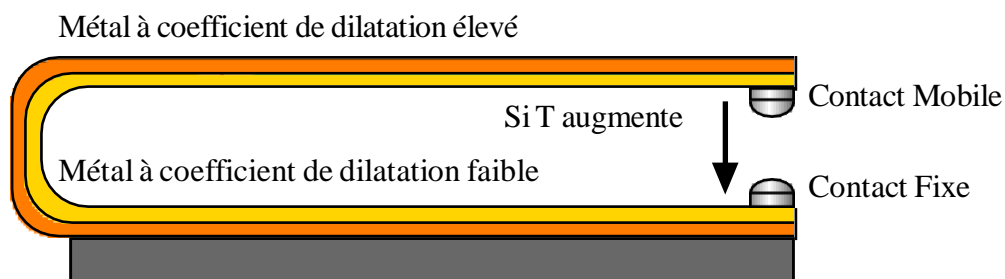


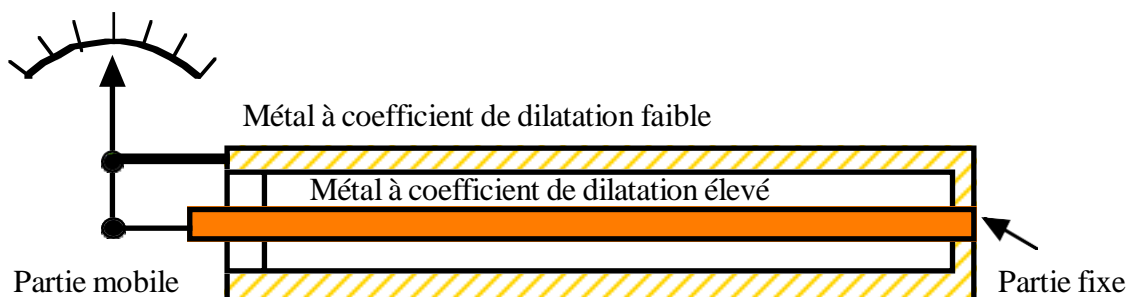
Figure 1 Bilame

Exemple de constitution :

- Métal très dilatable : Alliage de fer ;
- Métal peu dilatable : Invar.

3.3.2. Pyromètre linéaire

La sonde est formée d'une gaine de silice dans laquelle est placé un barreau métallique dilatable. Une tige en élinvar (Ferronickel dérivé de l'invar auquel on a ajouté du chrome pour assurer un module d'élasticité constant) transmet la dilatation du barreau à un système amplificateur permettant la lecture (ou la transmission).



3.4. Thermomètres électriques

Présentation

Les capteurs qui précèdent sont à lecture directe et sont peut utilisés dans les régulations industrielles. De plus, à l'exception du thermomètre à gaz l'indication de température est proche du lieu de mesure.

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.

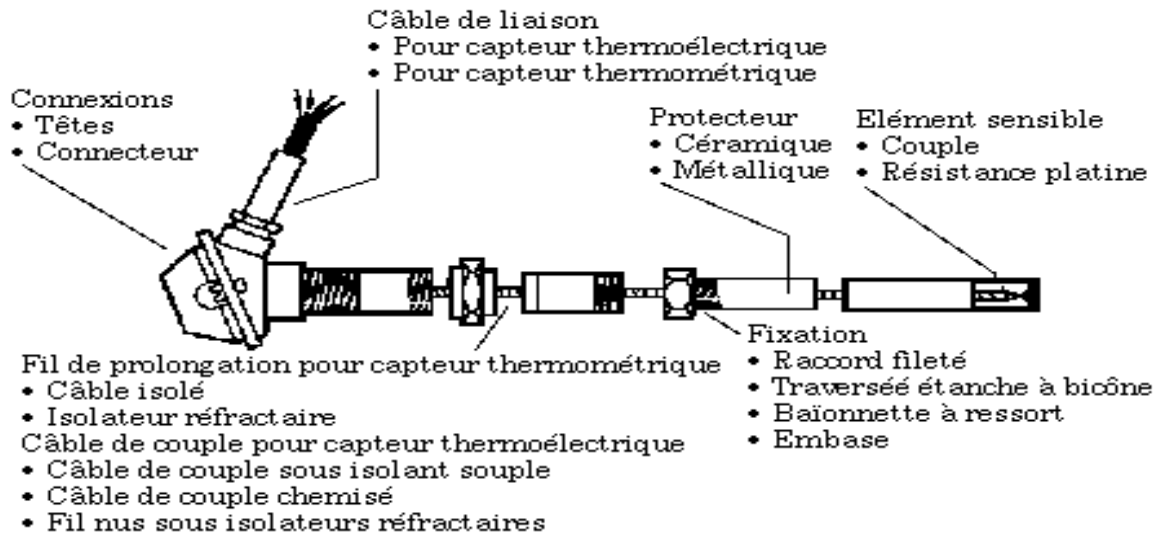


Figure Thermomètres électriques

On décompose les capteurs de température en deux sous catégorie :

- Les capteurs passifs, à résistance ou thermistance ;
- Les capteurs actifs, à couple thermoélectrique.

3.5. Thermomètres à résistance et à thermistance

3.5.1. Thermomètres à résistance

Le fonctionnement de ces capteurs passifs, se base sur l'influence de la température sur la résistance électrique d'un conducteur. La relation entre la résistance électrique et la température est de la forme:

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

Avec θ : la température en $^{\circ}\text{C}$, R_0 la résistance à 0°C , a , b et c sont des coefficients positifs spécifiques au métal. Différents métaux peuvent être utilisés comme le nickel et le cuivre mais c'est le platine est le plus utilisé, car il offre l'étendue de mesure la plus grande (-250 à 1100°C).



Figure .3 : Sonde PT100

Avantage :

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

Inconvénient :

le courant de mesure peut chauffer la résistance en platine

3.5.2. Thermomètres à thermistance

Ceux sont des oxydes métalliques, semi-conducteurs, présentant une bonne sensibilité, qui est dix fois supérieure à celle de résistances de platine, grâce à une rapide et importante variation de la résistance en fonction de la température sous la forme :

$$R = a. \exp\left(\frac{b}{\theta}\right)$$

Il existe deux types de thermistances :

- Les CTN à coefficient de température négatif ($b < 0$).
- Les CTP à coefficient de température positif ($b > 0$)

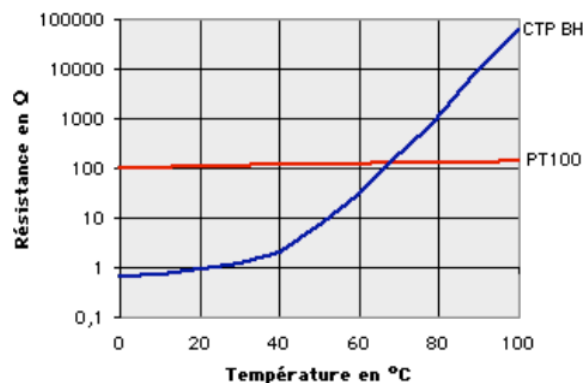


Figure 4 : Comparaison entre la résistance d'une thermistance CTP et une sonde PT100

- Avantages et inconvénients

En règle générale, les thermistances ont une sensibilité de mesure très élevée ($\sim 200 \Omega/^{\circ}\text{C}$), ce qui les rend très sensibles aux variations de températures. Bien qu'elles présentent un taux de réponse de l'ordre de la seconde, les thermistances ne peuvent être utilisées que dans une gamme de températures ne dépassant pas 300°C .

Cette caractéristique, associée à leur résistance nominale élevée, contribue à garantir des mesures précises dans les applications à basse température.

Un autre avantage des thermistances est leur faible encombrement : elles sont fabriquées sous forme de petits cylindres, dont la variation de la résistance dépend du matériau utilisé.

Les thermistances ne présentent pas de polarisation et peuvent être utilisées en continu ou en alternatif. Cependant, la loi de variation de la résistance avec la température est non linéaire

3.5.3. Thermocouples

Un thermocouple consiste en deux conducteurs de métaux différents connectés entre eux à une extrémité, de sorte que le point de connexion est le point de mesure.

Lorsque l'on chauffe le point de mesure, la tension sur les extrémités du câble (jonction froide) est mesurée; elle représente la température du point de mesure. (Effet thermo-électrique = effet Seebeck) Cette tension (FEM = force électromotrice) est produite à cause de la différente densité en électrons des deux conducteurs en métal (différents) utilisés, en combinaison avec la différence de température entre le point de mesure et la jonction froide.

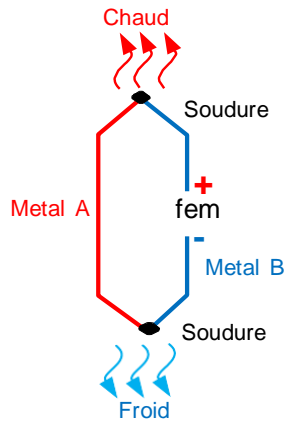


Fig.5. Principe de fonctionnement d'un thermocouple.

Tout simplement, un thermocouple ne mesure pas la température absolue, mais la température différentielle entre le

- T_1 : Point de mesure (jonction chaude)
- T_2 : Point froid (jonction froide).

❖ **Effet Seebeck**

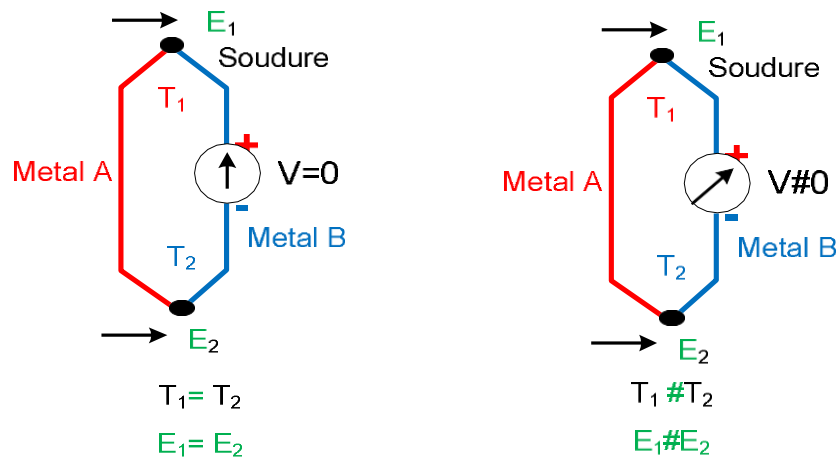


Fig.6. le fonctionnement de l'effet Seebeck.

V ne dépend que des matériaux en présence et non de la nature des jonctions. La variation de la tension en fonction de la température est donnée par la formule suivante

$$dV = \alpha dT \Rightarrow V = \int_{T_1}^{T_2} \alpha dT$$

Avec α coefficient relatif de Seebeck

$$dV = (\alpha_A - \alpha_B) dT = dV_A - dV_B$$

Avec α_A et α_B coefficients absolus de Seebeck

Elément	α ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)
Fe	13.4
Cu	0.0
Ni	-20.4
Bi	-72.8
p-Si	10 a 1000
n-Si	-100 a -1000

Comme la tension est souvent mesurée à température ambiante, la valeur de tension qui est affichée serait trop basse par rapport à la valeur de tension de la température ambiante. Pour obtenir la valeur pour la température absolue du point de mesure, on utilise ce qu'on appelle la “compensation de jonction froide”.

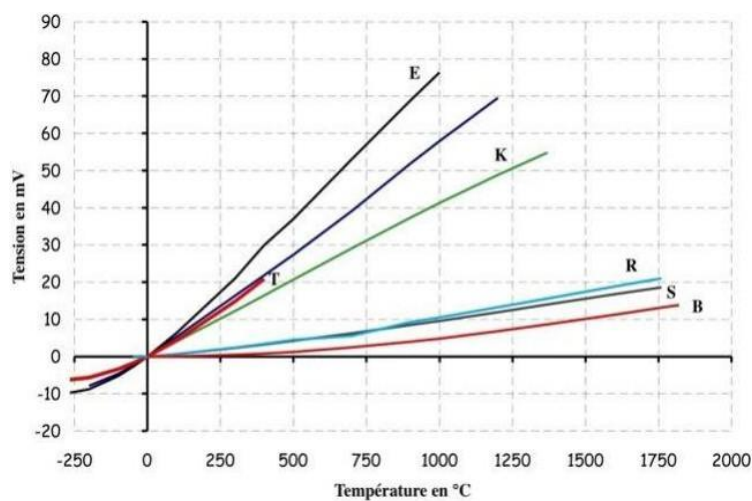


Fig.7. Courbes de tension thermo-électrique (CEI 60584-2)

Sur les instruments courants avec entrée thermocouple (transmetteurs, instruments de mesure portables ou dispositifs installés dans le panneau électrique, etc.), une compensation de jonction froide électronique est incluse dans les circuits de l'instrument.

Symbole	Type de thermocouple	Plage d'utilisation °C
T	Cuivre-Constantan	-200 a +390
J	Fer-Constantan	-200 a +760
E	Chromel-Constantan	-200 a 990
K	Chromel-Alumel	-200 a +1270
S	Platine 10%	0 a +1450
R	Platine 13%	0 a +1760
B	Platine 30%	0 a +1820

1. Limites de température de fonctionnement du thermocouple

Pour ponter la distance entre le thermocouple et l'instrumentation, il faut utiliser des câbles de raccordement spéciaux avec les thermocouples.

On opère ici une distinction entre **câbles de thermocouple** (le matériau du câble correspond au matériau d'origine du thermocouple) et ce qu'on appelle les **câbles de compensation**.

2. Mise en œuvre du thermocouple et sa protection

La construction mécanique des sondes utilisées dans les industries est identique qu'il s'agisse d'une thermo résistance ou d'un thermocouple. Elle comprend les éléments suivants :

- Insert de mesure avec borner céramique ou transmetteur de tête
- Raccord process
- Tube d'extension/Tige du doigt de gant
- Tête de raccordement avec entrée de câble

Il faut éviter que se créent lors de son montage ou de son utilisation des inhomogénéités dans sa structure qui risquent, en modifiant localement les propriétés thermoélectriques de former des couples parasites ; ces inhomogénéités ont trois causes principales :

- Les contraintes mécaniques dues à des pliures ou à la tension du fil: elles peuvent en général être supprimées par recuit ;
- Les contaminations chimiques: les fils doivent être protégés vis-à-vis de tout agent susceptible de réagir avec eux; en particulier, lors de leur manipulation une propreté extrême est requise ;
- Les rayonnements nucléaires provoquant des transmutations dans certains alliages de thermocouples.
- La partie soudée du thermocouple doit être d'un volume aussi réduit que possible pour éviter entre ses divers points des différences de température qui donneraient naissance à des f.é.m. parasites, conséquence des modifications chimiques des métaux au niveau de la soudure.

L'une des trois techniques suivantes est habituellement utilisée :

- Le brasage à l'étain lorsque la température d'utilisation n'est pas trop élevée (couple de type T) ;
- Le soudage autogène au chalumeau oxyacétylénique est la technique la plus courante ;
- Le soudage à l'arc électrique.

Les fils peuvent être torsadés sur une faible longueur au voisinage de la soudure afin d'accroître sa protection mécanique mais aux dépens de la précision de sa localisation et de la vitesse de réponse. Afin d'éviter tout contact en dehors des jonctions de mesure les fils sont placés à l'intérieur d'isolateurs en céramique.

Ceux-ci doivent être chimiquement inertes et avoir une grande résistante électrique d'isolement à température élevée.

(a) (b)
 Fig.2.13. Thermocouple et la gaine enveloppé. (a) Soudure isolée (b) Soudure non isolée

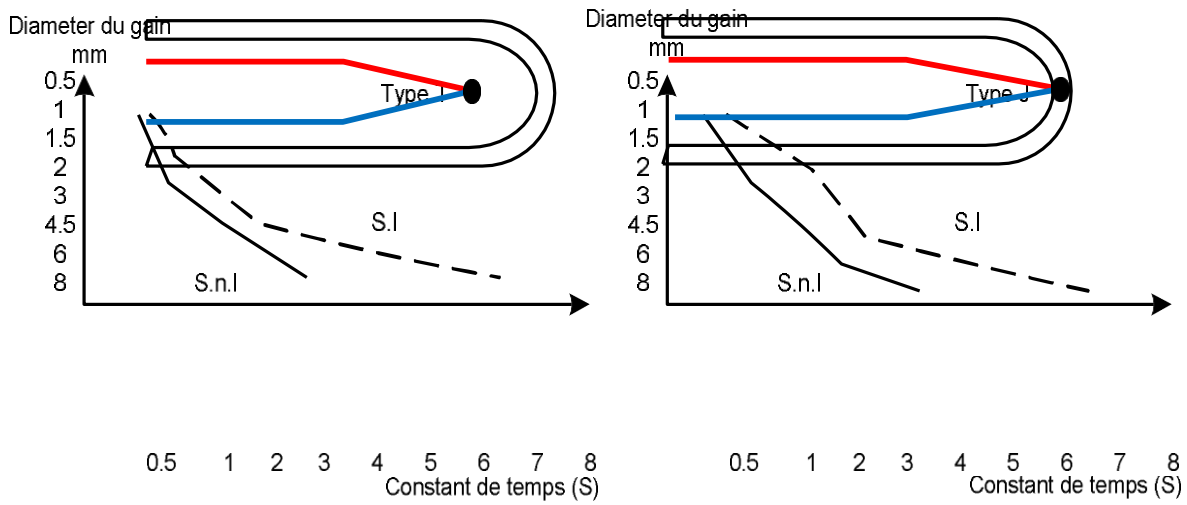


Fig.2.14 Constante de temps thermique de couples en fonction du diamètre de leur gain en acier selon que la soudure est ou non isolée de la gaine (Doc. Pyro-Contrôle).

La fragilité de l'ensemble isolateur-thermocouple requiert le plus souvent une protection supplémentaire qui est assurée par une enveloppe ou gaine qui doit être étanche aux gaz et insensible aux chocs thermiques. Elle est réalisée généralement en céramique ou en acier; dans ce dernier cas la

Soudure du couple peut être isolée ou bien en contact avec la gaine ce qui améliore la vitesse de réponse mais ris que d'introduire une tension de mode commun qui peut être gênante.

CHAPITRE 5 :

Les capteurs

Chapitre 5 : les capteurs

1. Introduction

Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services, loisirs ...), on a besoin de contrôler de nombreux paramètres physiques (température, force, position, vitesse, luminosité, ...). Le capteur est l'élément indispensable à la mesure de ces grandeurs physiques.

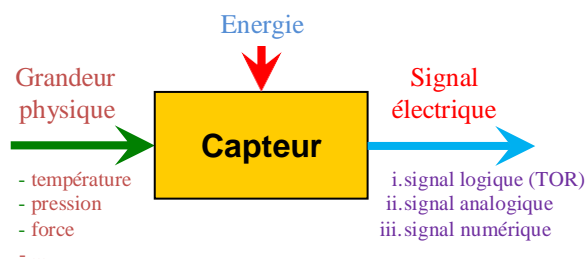
Le capteur, premier élément de la chaîne de mesure est la source déterminante du signal électrique que le reste de la chaîne doit traiter et exploiter. L'adaptation du capteur et de la chaîne de mesure implique que celle-ci n'ajoute pas au signal initial des incertitudes ou limitations supérieures à celles apportées par le capteur.

C'est donc de la qualité du capteur que dépendent, d'une part, la plus ou moins bonne concordance entre valeur mesurée et valeur vraie du mesurande, et d'autre part, les limites de l'incertitude sur la valeur mesurée.

2. Les capteurs

a. Définitions

Un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (très souvent électrique). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande.



b. Caractéristiques des capteurs

Etendue de mesure : Valeurs extrêmes pouvant être mesurée par le capteur.

Résolution : Plus petite variation de grandeur mesurable par le capteur.

Sensibilité : Variation du signal de sortie par rapport à la variation du signal d'entrée.

Exemple : Le capteur de température LM35 a une sensibilité de 10mV / °C.

Précision : Aptitude du capteur à donner une mesure proche de la valeur vraie.

Rapidité : Temps de réaction du capteur. La rapidité est liée à la bande passante.

C . Éléments de métrologie (définitions)

Le mesurage : C'est l'ensemble des opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur.

La mesure (x) : C'est l'évaluation d'une grandeur par comparaison avec une autre grandeur de même nature prise pour unité.

Exemple : 2 mètres, 400 grammes, 6 secondes.

La grandeur (X) : Paramètre qui doit être contrôlé lors de l'élaboration d'un produit ou de son transfert.

Exemple : pression, température, niveau.

On effectue des mesures pour connaître la valeur instantanée et l'évolution de certaines grandeurs. Renseignements sur l'état et l'évolution d'un phénomène physique, chimique, industriel.

L'incertitude (dx) : Le résultat de la mesure x d'une grandeur X n'est pas complètement défini par un seul nombre. Il faut au moins la caractériser par un couple (x, dx) et une unité de mesure. dx est l'incertitude sur x . Les incertitudes proviennent des différentes erreurs liées à la mesure.

Ainsi, on a : $x-dx < X < x+dx$

Exemple : $3 \text{ cm} \pm 10\%$, ou $3 \text{ cm} \pm 3 \text{ mm}$.

Erreur absolue (e) : Résultat d'un mesurage moins la valeur vraie du mesurande. Une erreur absolue s'exprime dans l'unité de la mesure.

$$e = x - X$$

Exemple : Une erreur de 10 cm sur une mesure de distance.

Erreur relative (e_r) : Rapport de l'erreur de mesure à une valeur vraie de mesurande. Une erreur relative s'exprime généralement en pourcentage de la grandeur mesurée.

$$e_r = e/X ; e_{r\%} = 100 e_r$$

Exemple : Une erreur de 10 % sur une mesure de distance (10 % de la distance réelle).

3. Constitution du capteur

Un capteur est constitué des parties suivantes (**Figure. 1.**) :

- **Corps d'épreuve:** élément mécanique qui réagit sélectivement à la grandeur à mesurer, dont le but est de transformer la grandeur à mesurer en une autre grandeur physique dite mesurable.
- **Élément de transduction:** élément sensible lié au corps d'épreuve. Il traduit les réactions du corps d'épreuve en une grandeur électrique constituant le signal de sortie.
- **Boîtier :** élément mécanique de protection, de maintien et de fixation du capteur.
- **Module électronique:** il a, selon les cas, les fonctions suivantes :
 - alimentation électrique du capteur (si nécessaire)
 - mise en forme et amplification du signal de sortie
 - filtrage, amplification
 - conversion du signal (CAN,...)

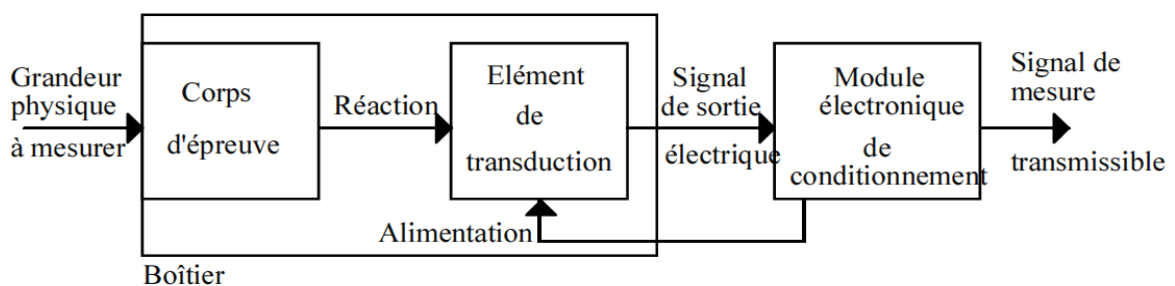


Figure. 1: Constitution du capteur

- **Grandeurs d'influence**

Les grandeurs d'influence sont des grandeurs étrangères qui, selon leur nature et leur importance, peuvent provoquer des perturbations sur les capteurs. C'est donc une cause d'erreurs agissant sur le signal de sortie ;

Exemple :

- ✓ la température
- ✓ la pression environnante
- ✓ les vibrations mécaniques ou acoustiques
- ✓ la position du capteur et sa fixation
- ✓ l'humidité, la projection d'eau, l'immersion
- ✓ les ambiances corrosives
- ✓ les perturbations électromagnétiques
- ✓ les rayonnements nucléaires
- ✓ les accélérations et la pesanteur
- ✓ l'alimentation électrique du capteur.

4. Différentes familles de capteurs

Les capteurs fonctionnent selon deux principes de base suivant l'origine du signal électrique de sortie. On distingue **les capteurs actifs** fonctionnant en générateur et **les capteurs passifs** fonctionnant en modulateur .

4.1 Capteurs actifs: Dans ce type de capteurs, une partie de l'énergie physique prélevée sur le mesurande est transformée directement en une énergie électrique qui constitue le signal de sortie. Ce signal est un courant, une tension ou une quantité d'électricité. Les signaux de sortie délivrés par les capteurs actifs sont de faible puissance. Ils sont dits de bas niveau et doivent être amplifiés pour pouvoir être ensuite transmis à distance. Les effets physiques les plus classiques (**Tableau 1.**) sont:

- **Effet thermoélectrique:** Un circuit formé de deux conducteurs de nature chimique différente, dont les jonctions sont à des températures T_1 et T_2 , est le siège d'une force électromotrice d'origine thermique $f(T_1, T_2)$.
- **Effet piézo-électrique:** L'application d'une contrainte mécanique sur deux faces à certains matériaux dits piézo-électriques (le quartz par exemple) entraîne l'apparition d'une déformation et d'une même charge électrique de signes différents sur les faces opposées.
- **Effet d'induction électromagnétique:** La variation du flux d'induction magnétique dans un circuit électrique induit une tension électrique (détection de passage d'un objet métallique).
- **Effet photo-électrique:** c'est la libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement d'une onde électromagnétique.
- **Effet hall:** Un champ magnétique B et un courant électrique I créent dans le matériau une différence de potentiel Hall U_{Hall} .

Effet photovoltaïque: Des électrons et des trous sont libérés au voisinage d'une jonction PN illuminée, leur déplacement modifie la tension à ses bornes.

2 **Tableau 1.2:** Les capteurs actifs

Mesurande	Grandeur de sortie	Mesures
Température	Thermoélectricité ou thermocouple	tension
Flux lumineux	Photoémission	courant
	Pyroélectricité	charge
Force, pression, accélération	Piézoélectricité	charge
Position	Effet hall	tension
Vitesse	Induction	tension

4.2 Capteurs passifs: Dans ce type de capteurs, c'est l'impédance du capteur qui est sensible aux variations du mesurande. Ces variations d'impédance ne sont mesurables que par l'intermédiaire d'un circuit électronique de préconditionnement. Les capteurs passifs doivent être alimentés par une source d'énergie extérieure. Cette source peut être une tension continue ou modulée en fréquence .

Ces modes de fonctionnement correspondent à des principes de base et s'adapte essentiellement aux capteurs à sortie analogique. Le mode de fonctionnement des capteurs à sortie numérique et logique sont des cas particuliers **Tableau 2** .

Tableau 2: Matériaux utilisés dans les capteurs

Mesurande	Grandeur de sortie	Matériaux
<i>Température</i>	Résistivité	Platine, nickel, semi-conducteurs
<i>Flux lumineux</i>	Résistivité	semi-conducteurs
<i>Position</i>	Résistivité	Polymères résistifs
<i>Humidité</i>	Résistivité	Chlorure de lithium, ZrCrO ₄
<i>Déformation</i>	Résistivité	Platine, nickel, semi-conducteurs
<i>Déplacement</i>	Self inductance	Bobine, matériaux magnétiques
<i>Déplacement</i>	Couplage mutuel	Transformateur magnétique
<i>Déformation</i>	Capacité	Vide
<i>Humidité</i>	Capacité	Polymère, or

4.2.2.1 Capteurs passifs composites

Pour des raisons de coût ou de facilité d'exploitation, on peut être amené à utiliser un capteur, non pas sensible au mesurande mais à l'un de ses effets. C'est le cas en résistance des matériaux lorsqu'on utilise des jauges extenso métriques **Fig. 4** ;

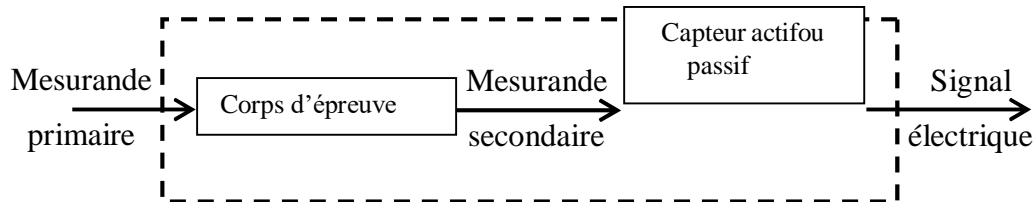


Fig. 4 : Capteurs composites

Le **corps d'épreuve** est le dispositif qui, soumis au mesurande en assure une première traduction en une autre grandeur physique non électrique, qu'un capteur adéquat traduit en grandeur électrique.

- L'association corps d'épreuve + capteur actif ou passif est un **capteur composite**.

[1, 9-26]

4.2.2.2 Transducteur (Elément secondaire ou de mesure): Dispositif qui transforme le signal émis par le capteur en une indication locale plus ou moins soignée **Fig. 6**.

4.2.2.3. Transmetteur : Elément secondaire (éléments électroniques) qui transmet un signal normalisé après conditionnement et amplification **Fig. 6**.

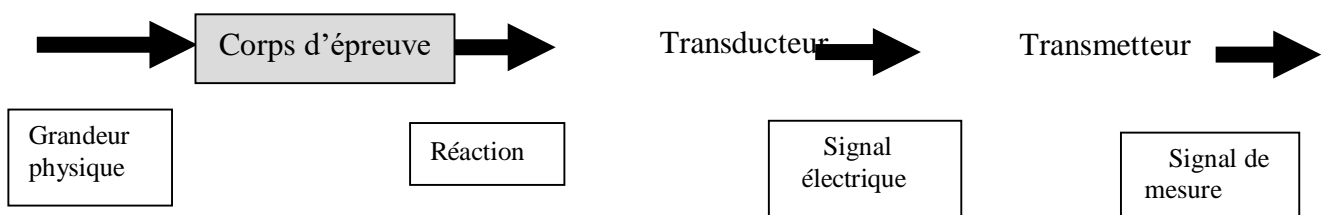


Fig. 6: Constitution des capteurs

5 . classification des signaux

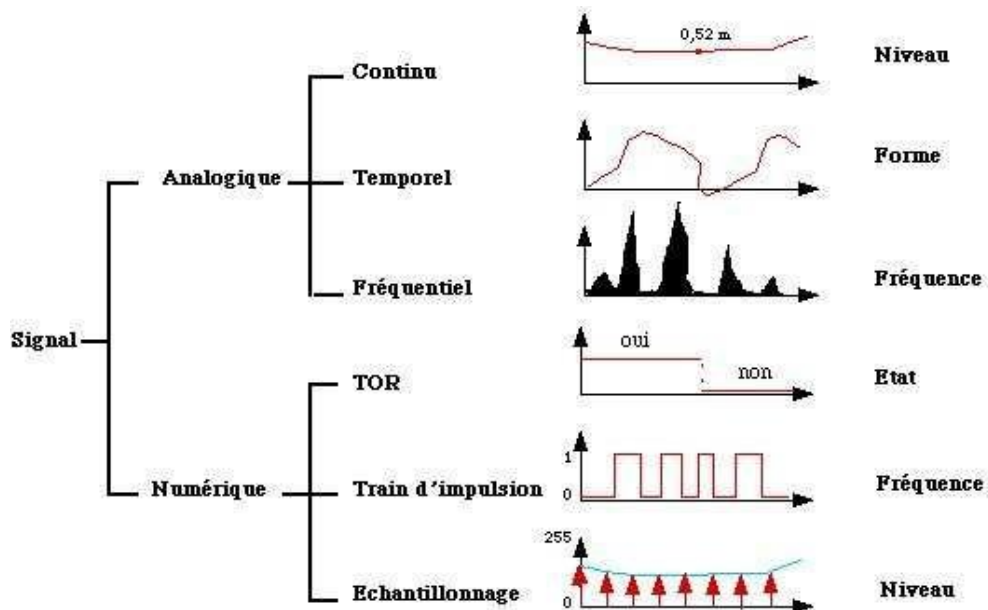


Fig 5 classification des signaux

Un signal est dit analogique si l'amplitude de la grandeur physique le représentant peut prendre une **infinité** de valeurs dans un intervalle donné.

- **Signal continu** : C'est un signal qui varie 'lentement' dans le temps : température, débit, niveau.
- **Forme** : C'est la forme de ce signal qui est importante : pression cardiaque, chromatographie, impact.
- **Fréquentiel** : C'est le spectre fréquentiel qui transporte l'information désirée : analyse vocale, sonar, spectrographie.

Un signal est dit numérique si l'amplitude de la grandeur physique le représentant ne peut prendre qu'un nombre **fini** de valeurs. En général ce nombre fini de valeurs est une puissance de 2.

- **Tout ou rien (TOR)** : Il informe sur l'état bivalent d'un système.
Exemple : une vanne ouverte ou fermée.
- **Train d'impulsion** : Chaque impulsion est l'image d'un changement d'état. Exemple : un codeur incrémental donne un nombre fini et connu d'impulsion par tour.
- **Echantillonnage** : C'est l'image numérique d'un signal analogique.
Exemple : température, débit, niveau, son (pression)...

6. Les circuits de conditionnement

Le circuit de conditionnement optimise les caractéristiques du signal de sortie du capteur (filtrage du bruit, amplification, suppression de composante continue...). Une conversion analogique/numérique du signal peut également être faite afin par exemple de rendre la mesure exploitable par un ordinateur [1, 3, 9, 15] Fig. 7.

Le signal analogique est converti en signal numérique à l'intérieur du module électronique de commande. Cette numérisation a pour but de conserver en mémoire certaines valeurs mais aussi de rendre plus facile les multiples opérations à réaliser sur le signal (amplification, dérivation, intégration). Ces opérations sont réalisées par des microprocesseurs. Ces capteurs ont besoin d'un circuit d'adaptation pour fournir un signal électrique de mesure utilisable Fig. 7

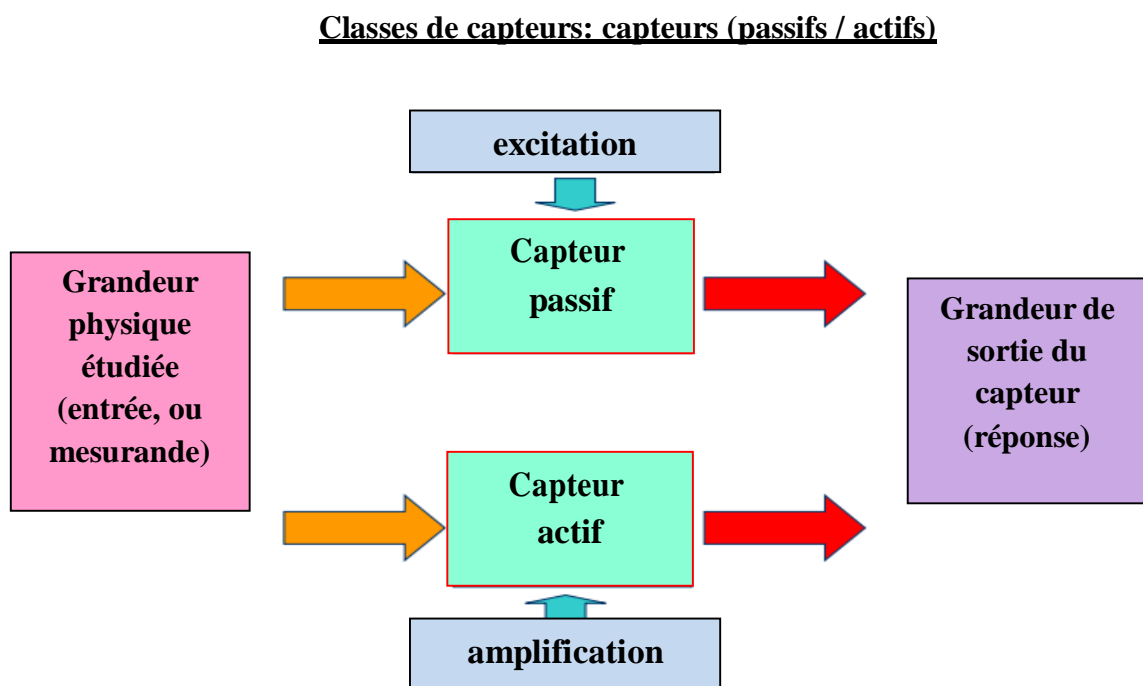


Fig. 7: La classes de capteurs (passifs / actifs)

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Cours Instrumentations – Capteurs 3^{ème} Année Raffinage et pétrochimie - Génie des Procédés. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene , 2016-2017
- [2] S. Poujouly IUT CACHAN / Module-Capteurs : Capteurs – présentation
- [3] Mlle. Saloua Helali, Conception et réalisation de matériaux biofonctionnels pour des dispositifs capteurs impedimétriques, Thèse de doctorat de L'école Centrale de Lyon, N° d'ordre : 2005 – 49
- [4] Georges Hasch, Les capteurs en instrumentation industrielle
- [5] Gwenaëlle Toulminet, Généralités sur la chaîne d'acquisition des données et sur les capteurs (Chapitre 1), 2002-2003
- [6] Mohammed Belhadj Capteurs et Instrumentation Université Tahri Mohammed Béchar, 2017
- [7] I.HAFSAOUI , cours Capteurs de température
- [8] Dr BENDJERAD Adel ,Capteurs (Cour) ,Université Mustapha Ben Boulaid Batna 2
- [9] B. Chenevier, M. Labeau, Capteurs de gaz (chapitre 6) : Matériaux oxydes semi-conducteurs pour la détection de la pollution atmosphérique
- [10] Les capteurs en instrumentations industrielle, Georges Asch et Collaborateurs, Dunod.
Sensors and transducers, Ian R. Sintclair, NEWNES 2001.
- [11] Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook, J. G. Webster, Taylor & Francis Ltd.
- [12] Instrumentations industrielle : Spécifications et installation des capteurs à des vannes de régulation, M. Grout, Dunod 2002.
- [13] Amor Gharsalli Mesure et instrumentations (mesure des débits) Université Virtuelle de Tunis
- [14] BENDIB Mohamed E lhadi, cours metrologie et instrumentations, Ecole Supérieure en Génie Electrique et Energétique Oran 2019

[15] M. Cerr, J-C. Engrand, F. Rossman, Instrumentation Industrielle, Ed Paris Technique & documentation-Lavoisier impr., 1990 Paris Impr. Jouve.

[16] Michel Grout, Patrick Salaun, Instrumentation industrielle, Collection: Technique et Ingénierie, Dunod/L'Usine Nouvelle.

[17] Michel Capot, Les principes des mesures: pressions, débits, niveaux, températures, Editions TECHNIP.