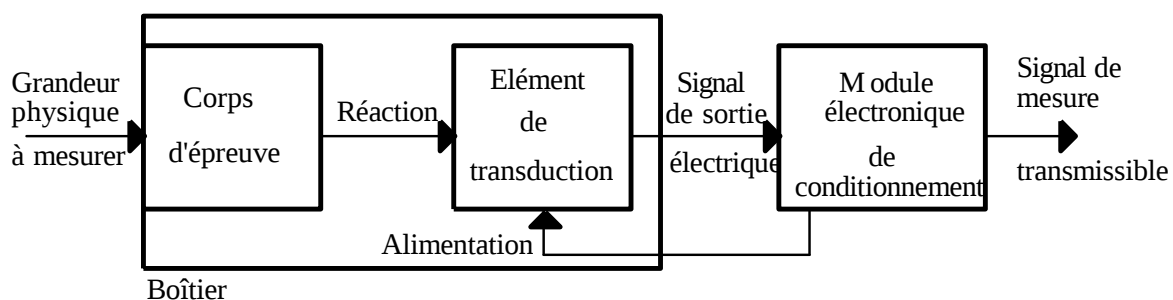


I. CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES DES CAPTEURS

I.1. Définition

Un capteur est un organe chargé de prélever une grandeur physique à mesurer et de la transformer en une grandeur exploitable. Le capteur est un organe de saisie d'informations. C'est le premier maillon de toute une chaîne de mesure, acquisition de données, de tout système d'asservissement, régulation, de tout dispositif de contrôle.

I.2. Constitution d'un capteur



- **Corps d'épreuve:** élément mécanique qui réagit sélectivement à la grandeur à mesurer (appelée aussi mesurande). Il a pour but de transformer la grandeur à mesurer en une autre grandeur physique dite mesurable.
- **Elément 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 de fonctionnement :** 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,...)

I.3. 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.

Parmi les grandeurs d'influence, nous distinguons:

- 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
- L'alimentation électrique du capteur
- Les accélérations et la pesanteur

2.1. Mode de fonctionnement des 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
- les capteurs passifs fonctionnant en modulateur.

Dans les capteurs actifs; une partie de l'énergie physique prélevée sur la 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.

Dans les capteurs passifs, 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.

2.2. Caractéristiques métrologiques d'un capteur

Les liens entre un capteur et la grandeur qu'il mesure sont définis par ses caractéristiques d'emploi.

2.2.1. Etendue de mesure

Domaine de mesure pour lequel les indications du capteur ne doivent pas être entachées d'une erreur supérieure à l'erreur maximale tolérée. On appelle les valeurs limites du domaine, « portée minimale » et « portée maximale ».

2.2.2. Sensibilité

C'est le rapport de la variation du signal de sortie à la variation correspondante de la grandeur à mesurer. C'est à dire la pente de la courbe de réponse du capteur pour une valeur donnée : $S = ds/de$

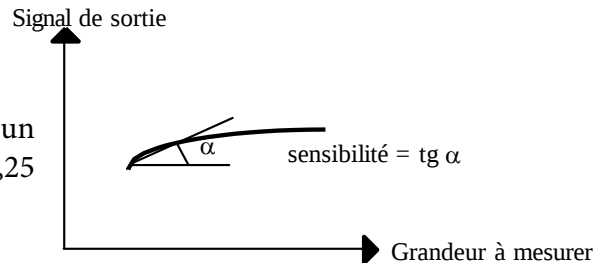
ds : variation de sortie de : variation de l'entrée

EX1

Pour une variation de température de 30°C, un thermocouple engendre une augmentation 1,25 mV. Quelle est la sensibilité ?

EX2

Un capteur de pression dont la plage de mesure est de 0 à 10kPa fournit un signal de sortie de 0 à 250mV. Déterminez la sensibilité de ce capteur.



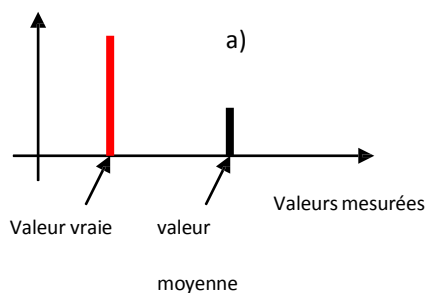
2.2.3. Précision

C'est l'aptitude du capteur à donner des indications proche de la valeur vraie de la grandeur mesurée.

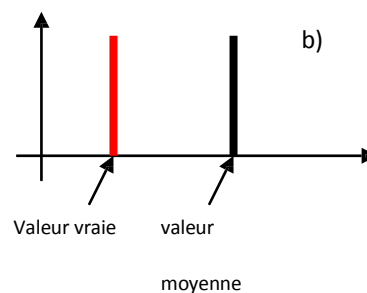
2.2.4. Fidélité et justesse

- La **justesse** est la qualité d'un capteur à fournir des indications précises.
- La **fidélité** est la qualité d'un capteur à fournir des indications identiques pour une même valeur de la grandeur à mesurer.

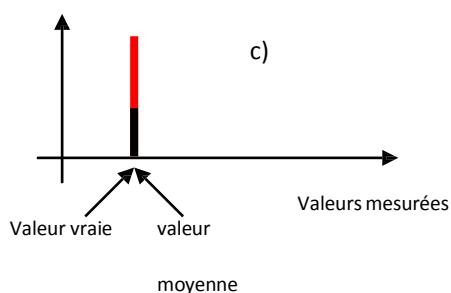
Répartition des mesures



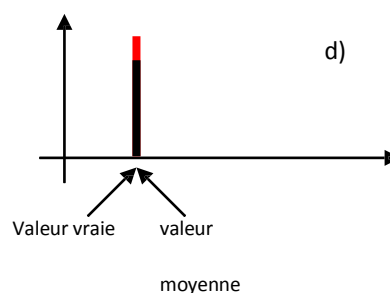
Répartition des mesures



Répartition des mesures



Répartition des mesures



2.2.5. Rapidité

C'est l'aptitude du capteur à suivre dans le temps les variations de la grandeur à mesurer. Il faut donc tenir compte du temps de réponse, de la bande passante et la fréquence de coupure du capteur.

2.2.6. Stabilité

La stabilité qualifie la capacité d'un capteur à conserver ses performances pendant une longue durée (problème de dérive du zéro par exemple).

2.2.7. Répétabilité et Reproductibilité

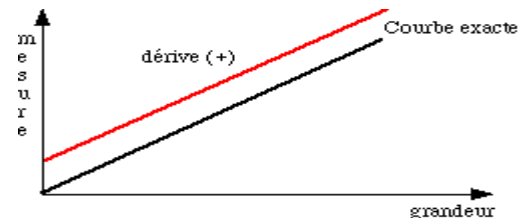
- La **répétabilité** est l'étroitesse de l'accord entre les résultats de mesures successifs d'une même grandeur effectuée avec la même méthode, par le même observateur, avec les mêmes instruments de mesure et à des intervalles de temps assez courts.
- La **Reproductibilité** est l'étroitesse de l'accord entre les résultats de mesures successifs d'une même grandeur dans le cas où les mesures sont effectuées dans les conditions différentes que pour la répétabilité.

2.2.8. Bruit de fond

C'est une variation parasite, souvent aléatoire, du signal de sortie, dont la valeur moyenne est nulle et qui vient se superposer à la valeur à mesurer.

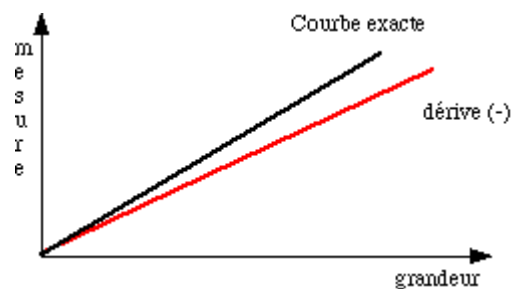
2.2.9. Erreurs de mesure

- **L'erreur de zéro (offset)**



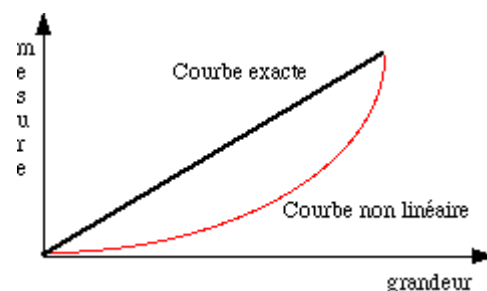
- **L'erreur d'échelle (gain)**

C'est une erreur qui dépend de façon linéaire de la grandeur mesurée.



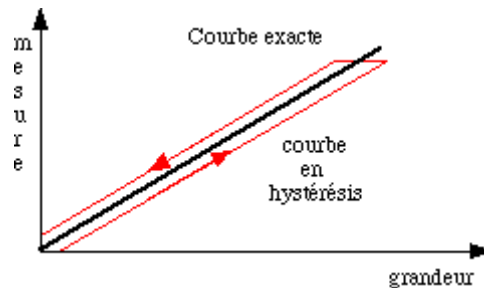
L'erreur de linéarité

La caractéristique n'est pas une droite.



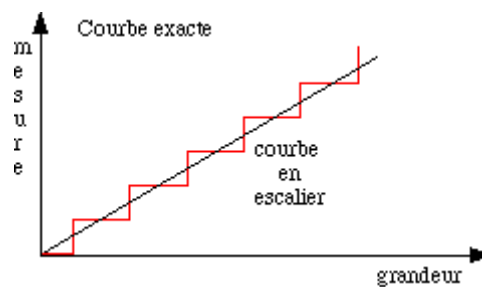
- **L'erreur due au phénomène d'hystérésis**

Il y a phénomène d'hystérésis lorsque le résultat de la mesure dépend de la précédente mesure.



- **L'erreur de mobilité**

La caractéristique est en escalier, cette erreur est souvent due à une numérisation du signal.



EX3

Une jauge de contrainte possède une caractéristique de linéarité de 0,5% pleine échelle pour une mesure de 0 à 50 Kg. Pour une mesure de 20Kg, quelles sont la valeur de l'erreur absolue maximale, et la valeur de l'erreur relative?

EX4

Un manomètre étalon d'incertitude pratiquement nulle donne 80 KPa comme mesure de pression qu'un autre manomètre indique 80,2 KPa. Calculer l'erreur absolue et l'erreur relative sur la mesure du dernier manomètre.

II. CAPTEURS DE TEMPERATURE

2.1. Introduction à la thermométrie

2.1.1. Définition

La température n'est pas une variable d'état, c'est une grandeur intensive (ne dépend pas de la taille du système), 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.

2.1.2. Les échelles de température

2.1.2.1. 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.

2.1.2.2. Echelle Celsius

Elle est définie à partir de l'échelle Kelvin par :

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

2.1.2.3. Autres échelles

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

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

L'échelle **Rankine**, est définie par :

Zéro thermodynamique: 0 °R;

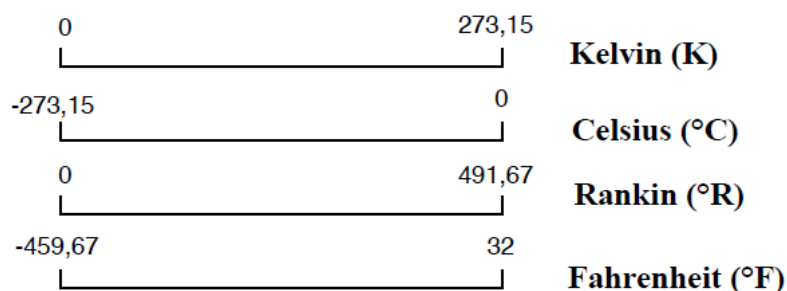


Figure IV.1 : Echelles de température

2.2. Thermomètres électriques

Les capteurs électriques de température ont l'avantage d'une plus grande souplesse d'emploi tout en gardant une précision suffisante pour l'utilisation industrielle. On distingue deux catégories :

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

2.2.1. Thermomètres à résistance

Le fonctionnement de ces capteurs passifs, se base sur l'influence de la température sur la résistance électrique d'un conducteur.

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).

EX5

On désire mesurer la température par une résistance thermométrique de nickel dont le comportement avec la température T exprimée en °C est donné par :

$$R(T) = R_0(1 + AT + BT^2)$$

avec $R_0 = 100 \, \Omega$, $A = 5,49167.10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ et $B = 6,66667.10^{-6}/^{\circ}\text{C}^2$. La résistance thermométrique est montée en série avec une résistance fixe R et le tout est alimenté par une source de tension de fem $V_g = 1 \, \text{V}$ et de résistance interne $R_g = 50 \, \Omega$.

5.1 Donner l'expression de la tension de mesure $V_{mes}(T)$ prise aux bornes de la résistance thermométrique.

5.2 On choisit comme référence de température $T_0 = 0 \, ^{\circ}\text{C}$ et on limite l'étendue de mesure à $E.M. = \pm 10 \, ^{\circ}\text{C}$. Donner l'expression de la variation $\Delta R(T)$ de la valeur de la résistance thermométrique pour une température T à partir de la référence prise pour T_0 .

5.3 En déduire la variation ΔV_{mes} correspondante.

5.4 Quelle valeur donner à R pour avoir un maximum de sensibilité (on ne considérera pour cela que la partie linéaire $\Delta V_{mes,lin}$ de l'expression ΔV_{mes} ?

5.5 Donner dans ce cas l'expression de la sensibilité en fonction de A , B et T .

5.6 Que devient cette sensibilité dans le cas d'une approximation linéaire du fonctionnement ?

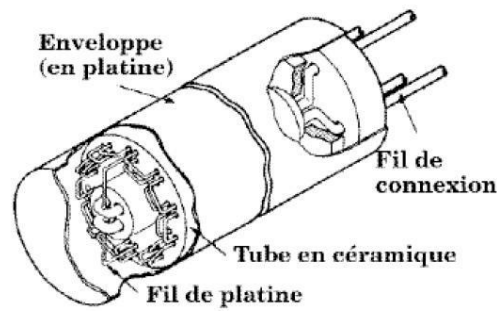


Figure IV.3 : Sonde PT100

- Avantages et inconvénients

Populaires pour leur stabilité, les capteurs de température à résistance (Resistance Temperature Detectors) RTD présentent le signal le plus linéaire de tous les capteurs électroniques en matière de température. Toutefois, ils coûtent, généralement, plus cher que leurs équivalents, à cause de leur construction plus délicate et le recours au platine.

Les RTD se caractérisent aussi par un temps de réponse lent et par une faible sensibilité. En outre, parce qu'ils nécessitent une excitation en courant, ils sont sujets à une élévation de température. Les RTD peuvent mesurer des températures pouvant atteindre 850°C.

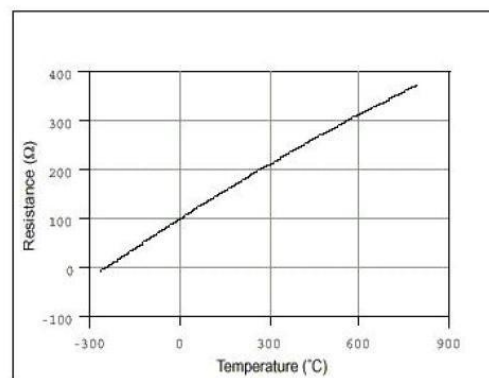


Figure IV.4 : Courbe résistance/température pour PT100

2.2.2. 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 :

—

Il existe deux types de thermistances :

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

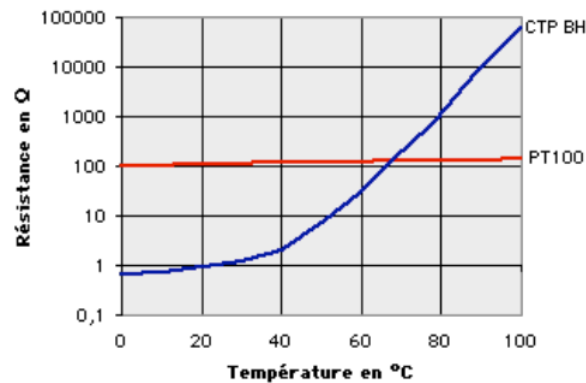


Figure IV.5 : Comparaison entre la résistance d'une thermistance CTP et une sonde PT100

- 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.

2.2.3. Thermocouples

2.2.3.1. Principe

Le principe du thermocouple repose sur la conversion de l'énergie thermique en tension électrique qui découle des phénomènes suivants de la thermoélectricité : Effet Peltier, Effet Thomson et Effet seebeck.

2.2.3.2. Effet Peltier

A la jonction de deux conducteurs A et B différents mais à la même température, s'établit une différence de potentiel qui ne dépend que de la nature des conducteurs et de leur température :

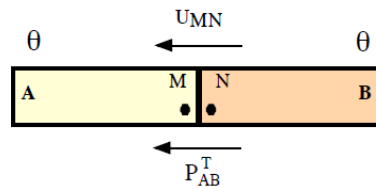


Figure IV.6 : Effet Peltier

2.2.3.3. Loi de Volta

Dans un circuit isotherme, constitué de conducteurs différents, la somme des f.e.m. de Peltier est nulle. On a donc :

2.2.3.4. Effet Thomson

Entre deux points M et N à températures différentes, à l'intérieur d'un conducteur homogène A s'établit une force électromotrice qui ne dépend que de la nature du conducteur et des températures aux points M et N. C'est la force électromotrice de Thomson, h_A est le coefficient de Thomson du conducteur A :

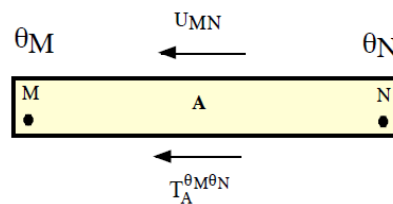


Figure IV.7 : Effet Thomson

2.2.3.5. Effet Seebeck

Soit un circuit fermé, constitué de deux conducteurs A et B dont les jonctions sont à des températures θ_1 et θ_2 . Ce circuit constitue un couple thermoélectrique. Ce couple est le siège d'une force électromotrice dite de Seebeck qui résulte des effets de Peltier et de

Thomson :

Comme la F.E.M. dépend de la différence de température entre les 2 jonctions, il faut s'assurer de connaître la température de l'une d'entre elle pour déduire la température de l'autre. La jonction dont la température est connue est dite "jonction de référence".

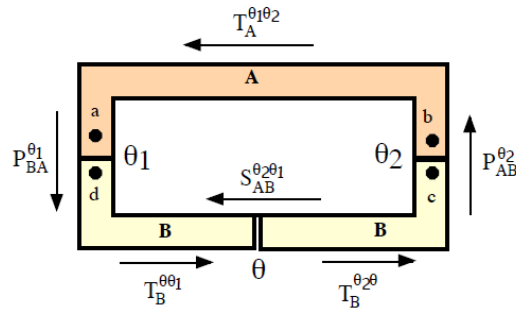


Figure IV.8 : Effet Seebeck

2.2.3.6. Différents types de thermocouples

Tableau 1 : Caractéristiques des thermocouples les plus connus

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

2.2.3.7. Caractéristiques

- Les thermocouples permettent de mesurer de hautes températures.
- Les températures mesurées ponctuelles.
- Très grande rapidité.
- Pas d'auto échauffement.
- Peuvent mesurer des températures de surfaces à l'aide des peintures métalliques.

III. CAPTEURS DE PRESSION

3.1. Définitions

3.1.1. 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 : —

3.1.2. Différentes unités de pression

D'après la relation précédente, 1Pa est l'unité internationale de la pression absolue s'exerçant sur une surface de 1m² par une force perpendiculaire de 1N.

Tableau 1 : Les différentes unités de pression

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

3.1.3. Différentes pressions

- **La pression atmosphérique** : La pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer, à 15 °C, est de 1013 mbar. Elle peut varier en fonction de l'altitude.
- **La pression absolue** : C'est la pression réelle, dont on tient compte dans les calculs.
- **La pression relative** : C'est la différence de pression par rapport à la pression atmosphérique.
- **La pression différentielle** : C'est une différence entre deux pressions, dont l'une sert de référence. Une pression différentielle peut prendre une valeur négative.

- **Le vide** : C'est une pression inférieure à la pression atmosphérique. Le vide parfait correspond théoriquement à une pression absolue nulle. Il ne peut être atteint. Quand on s'en approche, on parle alors de vide poussé.
- **Pression de service** : C'est la force par unité de surface exercée sur une surface par un fluide s'écoulant parallèlement à la paroi d'une conduite.

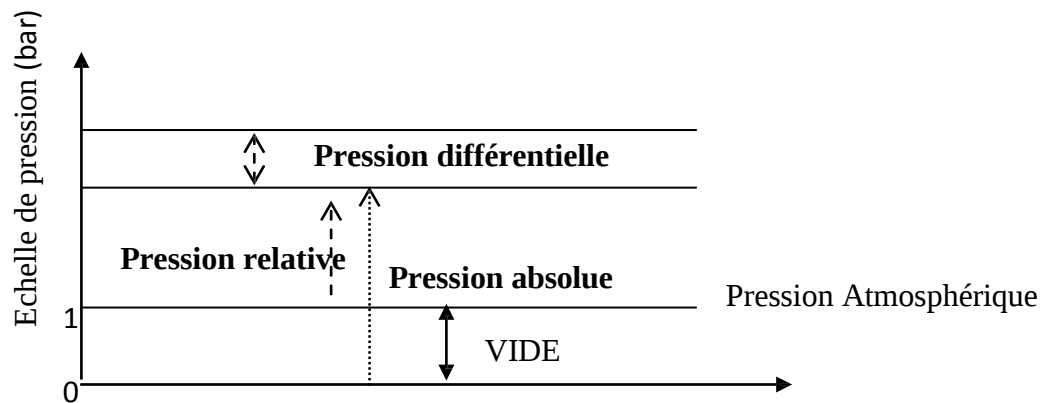


Figure V.1 : Les différentes pressions

3.1.4. Pressions des fluides

- **Pression hydrostatique** : A l'intérieur d'une colonne de fluide se crée une pression due au poids du fluide sur la surface considérée : — —
- **Pression dues aux forces extérieure** : Un fluide qui se déplace avec une vitesse V , crée une pression supplémentaire : — —
- **Pression totale** : C'est la somme de la pression hydrostatique et de la pression due aux forces extérieures.

3.2. Capteurs électriques

3.2.1. Capteurs passifs

3.2.1.1. Capteurs résistifs

Ce type de capteurs se base sur la variation de la résistance sous l'effet d'une pression exercée :

—

Avec :

ρ : Résistivité du matériau.

L : Longueur du conducteur.

S : Section du conducteur.

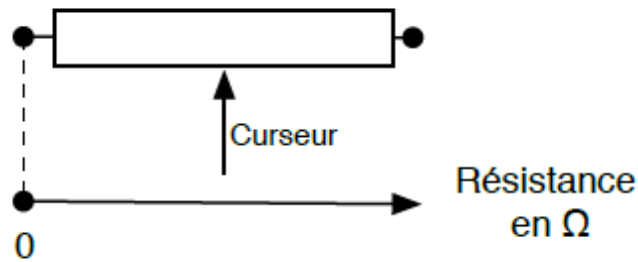


Figure V.2 : Capteur résistif rectiligne

- Avantages :
 - Signal de sortie élevé.
 - Utilisable sans conditionneur.
 - Possibilité d'adapter à une variation non linéaire.
- Inconvénients :
 - Durée de vie ;
 - Sensibilité aux vibrations.

3.2.1.2. Capteurs capacitifs

Un condensateur est composé de deux conducteurs séparés par un isolant. La capacité d'un condensateur est: _____

Avec :

- ϵ_0 : permittivité du vide = $8,85 \cdot 10^{-12}$;
- ϵ_r : permittivité relative de l'isolant ;
- S : surface en regard en m^2 ;
- e : épaisseur de l'isolant en m

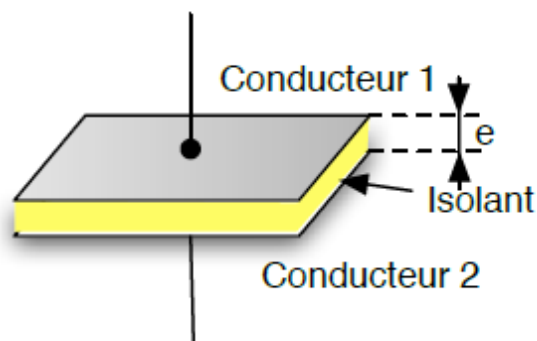


Figure V.2 : Condensateur

Le capteur capacitif se base sur la variation de la capacité due à la variation de l'épaisseur sous l'effet d'une différence de pression.

- Avantages
 - faible masse ;
 - peu sensible aux accélérations.
- Inconvénients
 - sensibilité à la température (sauf montage différentiel).
 - sortie haute impédance.

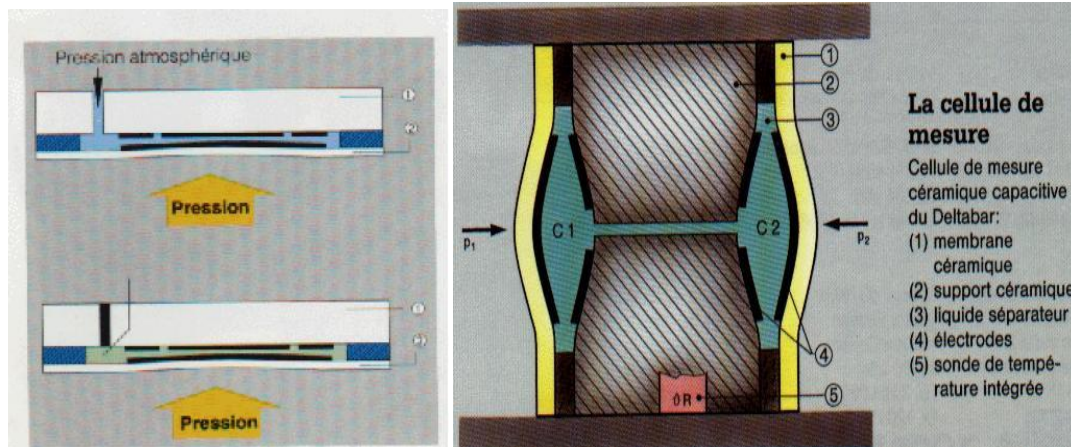


Figure V.3 : Capteur capacitif de pression

3.2.1.3. Capteurs inductifs

Un bobinage de fils conducteurs, parcouru par un courant électrique, crée un champs magnétique B. On peut canaliser les lignes de champs en ajoutant un circuit magnétique (figure V. 4). On peut écrire :

Avec :

- N : nombre de spires ;
- I : courant en A;
- R : reluctance du circuit magnétique en H^{-1} ;
- Φ : flux traversant les spires en Wb.

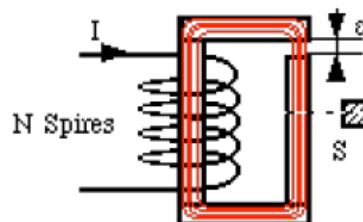


Figure V.4 : Lignes de champs dans une inductance

Le principe de fonctionnement d'un capteur inductif de pression se base sur le déplacement d'un noyau magnétique à l'intérieur d'une bobine, du à la pression exercée. Ce déplacement entraine une variation de l'inductance de la bobine.

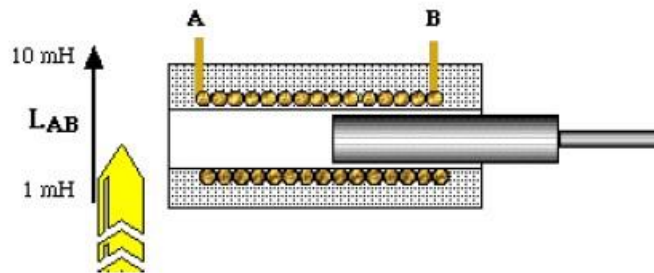


Figure V.5 : Capteur inductif

- Avantages :
 - Faible hystérésis ;
 - Très bonne résolution ;
 - Signal de sortie élevé.
- Inconvénients :
 - Sensible aux chocs et aux vibrations.

3.2.1.4. Jauges

Des jauges de contraintes sont collées sur le corps d'épreuve. Elles sont montées sur un pont de Wheatstone, par deux, ce qui permet une compensation des grandeurs d'influences.

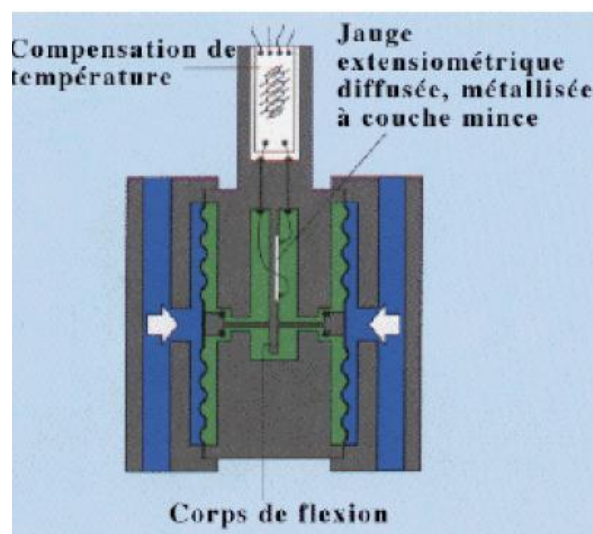


Figure V.6 : Capteur de pression avec jauge extensiométrique

- Avantages :
 - Précision ;
 - Peut sensible aux vibrations.
- inconvénients :
 - Faiblesse du signal de sortie ;
 - Fluage des colles

3.2.2. Capteurs actifs

Les structures piézoélectriques utilisées comme corps d'épreuve assurent directement la transformation de la contrainte, produite par l'application d'une force F , en une charge électrique Q . Des structures piézo-électriques tubulaires ont été développées sous forme de câble coaxial blindé. Elles permettent la mesure de faibles variations de pressions en milieu haute pression ou pour le contrôle de trafic (figure V.7).

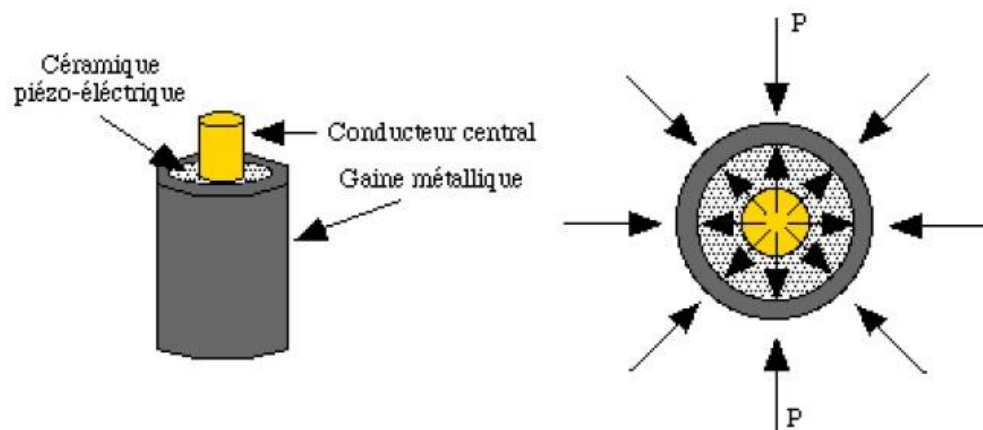


Figure V.7 : Capteur piézoélectrique

- Avantages:
 - excellente réponse en fréquence ;
 - miniaturisation.
- Inconvénients :
 - Sensibilité à la température ;
 - nécessite un câble de liaison de faible bruit.

IV. CAPTEURS DE NIVEAUX ET DE DEBIT

4.1. Capteurs de niveaux

4.1.1. Introduction

Une mesure fréquemment faite en milieu industriel est la mesure de niveau de matériaux solides et liquides. Les capteurs de niveau peuvent être classifié selon la méthode de mesure.

Cette mesure peut être soit visuelle, à l'aide de tubes en verre soit hydrostatique, basée sur les principes d'Archimède ou sur la pression hydrostatique.

D'autres capteurs de niveau utilisent des principes électriques basés sur des variations d'impédance.

4.1.2. Capteurs hydrostatiques

4.1.2.1. Principe

Pour un liquide homogène, la pression relative en fond d'un réservoir est proportionnelle au niveau de celui-ci mais elle dépend de la masse volumique du liquide :

— —

4.1.2.2. Flotteur

Le flotteur se maintient à la surface du liquide. Il est solidaire d'un capteur de position qui délivre un signal électrique correspondant au niveau. Sa position est peu dépendante de la masse volumique du liquide.

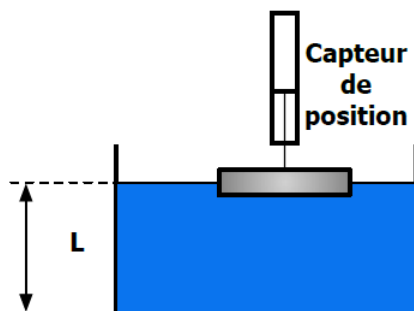


Figure VI.1 : Mesure de niveau par flotteur



Figure VI.2 : Flotteur industriel

4.1.2.3. Plongeur

Le plongeur est un cylindre immergé 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 , fonction de la hauteur L du liquide:

Avec :

P : le poids du plongeur.

S : La section

: La poussée d'Archimède s'exerçant sur le volume immergé du plongeur

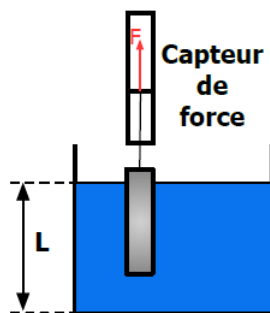


Figure VI.3 : Mesure de niveau par plongeur



Figure VI.4 : Photo d'un plongeur

4.1.2.4. Mesure de niveau par capteur de pression

Le capteur de pression mesure la pression relative au fond du réservoir :

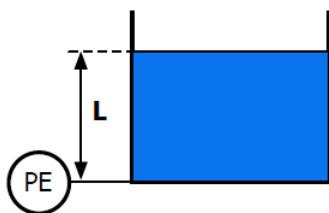


Figure VI.5 : Mesure de niveau par capteur de pression



Figure VI.6 : Capteur de pression

4.1.2.5. Mesure de niveau par bullage

Pour mesurer la pression, on peut utiliser un système à bulle (Figure VI.7).

Ce système permet de mesurer la pression au bout de la canne, en régulant le débit qui doit être très faible.

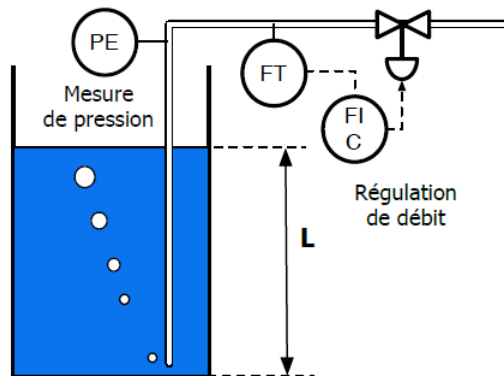


Figure VI.7 : Mesure de niveau par bullage

- Caractéristiques
 - Sensible aux variations de densité et de température;
 - Le capteur de pression ne touche pas au liquide;
 - Très bonne précision (± 2 mm);
 - Très simple et économique;
 - Consommation d'air d'environ 0.015 m³/h;
 - Plage de 60 m.

4.1.2.6. Capteur de pression différentielle

Si le réservoir est fermé, on utilise un capteur de pression différentielle. Il existe alors deux montages différents (Figures VI.8-9), (avec condensation $\Delta P < 0$, ou sans condensation $\Delta P > 0$).

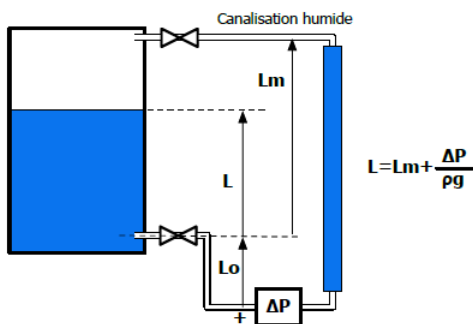


Figure VI.8 : Réservoir avec condensation

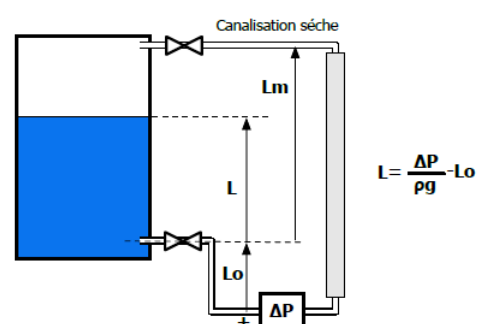


Figure VI.9 : Réservoir sans condensation

4.1.2.7. Par mesure de masse volumique

La mesure de la différence de pression ($P_1 - P_2$) permet de déterminer la masse volumique du liquide à l'intérieur du réservoir (Figure VI.10).

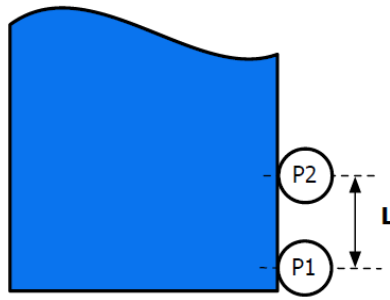


Figure VI.10 : Mesure de masse volumique

4.1.3. Capteurs électriques

4.1.4. Capteurs conductimétriques

La sonde est formée de deux électrodes cylindriques (l'une d'elles peut être assurée par le réservoir s'il est métallique).. La sonde est alimentée par une faible tension (10 V) alternative afin d'éviter la polarisation des électrodes. En continu, la sonde est placée verticalement et sa longueur s'étend sur toute la plage de variation de niveau.

Le courant électrique qui circule est d'amplitude proportionnelle à la longueur d'électrode immergée (donc proportionnelle au niveau), mais sa valeur dépend de la conductivité du liquide.

Ce type de capteur, est utilisable uniquement avec des liquides conducteurs, non corrosifs et n'ayant pas en suspension une phase isolante.

La pression est comprise entre le vide et 160 bar et la température comprise entre - 200°C et 250°C.

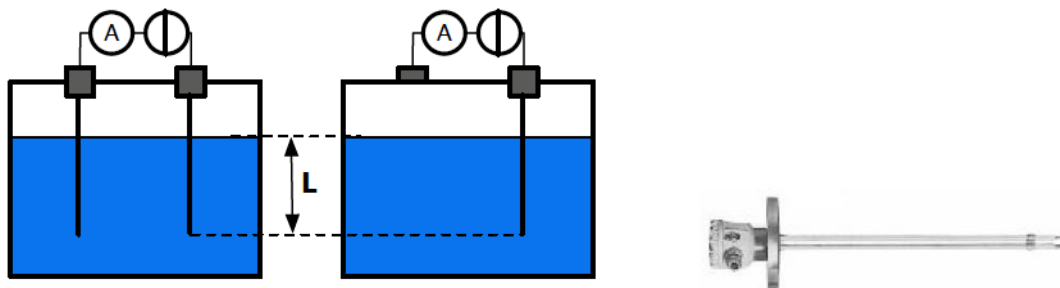


Figure VI.11 : Capteurs conductimétriques

4.1.5. Capteurs capacitifs

Lorsque le liquide est isolant, un condensateur est réalisé soit par deux électrodes cylindriques, soit par une électrode et la paroi du réservoir s'il est métallique. Le diélectrique est le liquide dans la partie immergée, l'air en dehors. La mesure de niveau se ramène à la mise en variation de capacité qui est d'autant plus importante que la constante diélectrique ϵ_r du liquide est supérieure à celle de l'air.

La variation de capacitance est linéaire avec le niveau de liquide.

- Caractéristiques :
 - Emploi assez répandu.
 - Applicable à presque tous les types de produits.
 - Insensible aux dépôts.
 - Sensible à la densité et à la température.
 - Sensible aux produits abrasifs.

4.1.6. Capteurs acoustiques

Ce transducteur, placé au sommet du réservoir émet des trains d'onde acoustiques qui après réflexion sur la surface du liquide retournent vers le transducteur qui les convertit en signal électrique. L'intervalle de temps Δt séparant l'émission de la réception du train d'ondes réfléchi est proportionnel à la distance du transducteur à la surface du liquide : il est donc fonction du niveau.

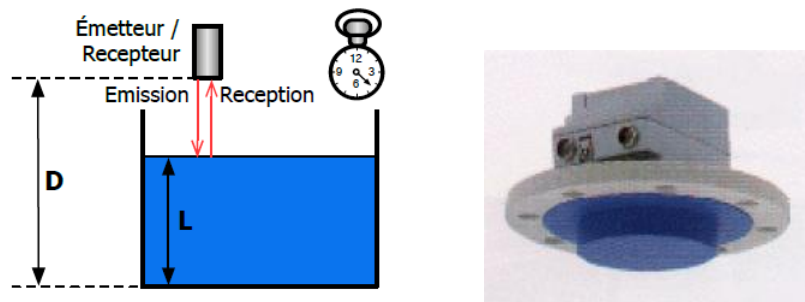


Figure VI.12 : Capteur de niveau acoustique

- Caractéristiques
 - Bonne étendue de mesure (de 0.1 - 60 m).;
 - Précis, robuste et fiable.
 - Pour tous produits liquides ou solides.
 - Sensible à la température (vitesse du son).
 - Sensible à l'agitation de surface.
 - Prix élevé.

4.1.7. Radar

Le principe de fonctionnement est le même que celui des ondes acoustiques, celle-ci sont remplacées par des ondes électromagnétiques, dont la vitesse est indépendante de la composition du gaz, de la température, de la pression, de la densité et des turbulences.

4.1.8. Capteurs de niveau par Gammamétrie (Par absorption de rayonnement gamma)

La source et le détecteur sont placés à l'extérieur, de part et d'autre du réservoir. Ces capteurs sont particulièrement adaptés au cas de liquides très corrosifs ou sous haute pression

ou à haute température. La source est un émetteur gamma. Le détecteur est soit une chambre d'ionisation soit un ou plusieurs tubes Geiger-Muller. La Mesure est fiable et sans contact.

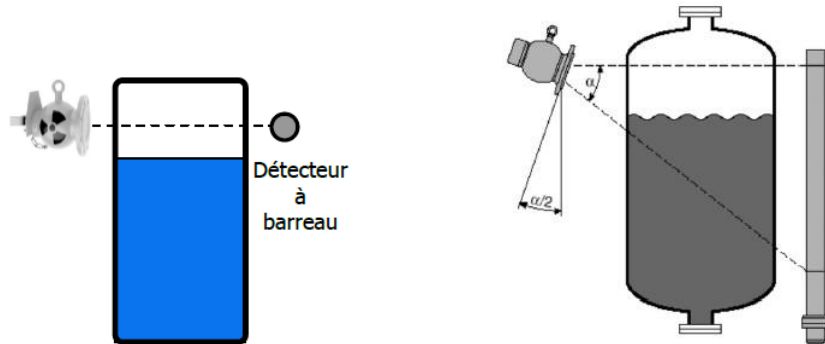


Figure VI.12 : Principes de mesure de niveau par Gammamétrie

4.1.9. Comparaison des différentes méthodes de mesure de niveau

	Flotteur	Plongeur	Capteur de pression	Capteur conductimétrique	Capteur capacitif	Capteur acoustique	Radar	Gammamétrie
Standard	++	++	++	++	++	-	-	-
Utilisable sur cuve synthétique	++	++	++	-	+	+	-	+
Insensible à la mousse	+	+	++	-	-	-	-	-
Indépendant du diélectrique	++	++	++	+	-	+	+	+
Indépendant de la densité	-	-	-	+	+	+	+	-
Economique	+	+	+	+	+	-	-	-
Facilité d'étalonnage	+	+	+	-	-	+	+	-
Pas de risque d'encrassement	-	-	-	-	-	+	+	+
Sans maintenance	-	-	-	+-	-	+	+	+
Montage économique	-	+	-	+	+	++	++	++
Pression maximale	4	4	350	50	50	3	64	1000
Température maximale	100	100	250	500	500	95	250	600

4.2. Capteurs de débit

4.2.1. Définitions

4.2.1.1. Débit

Le débit est défini par la quantité de fluide qui s'écoule par unité de temps. On distingue deux types de débits : Le débit massique et le débit volumique qui sont liés par la relation :

4.2.1.2. Régimes d'écoulement des fluides

En dynamique des fluides, il existe deux sortes de fluides :

- Le fluide parfait qui ne présente pas de résistance à l'écoulement.
- Le fluide réel qui est visqueux et présente donc une résistance à l'écoulement.

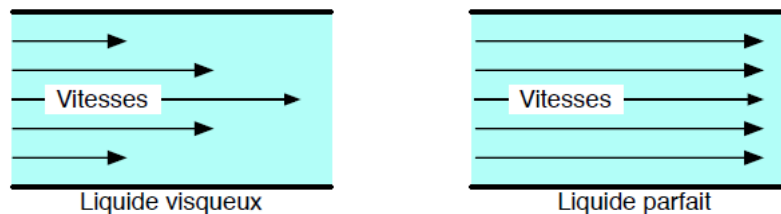


Figure VI.13 : Différence entre fluide parfait et fluide réel

Il existe deux régimes d'écoulement pour un liquide :

- L'écoulement laminaire qui est un régime d'écoulement où le fluide se rapproche du fluide idéal.
- L'écoulement turbulent où l'effet de la viscosité se fait sentir.

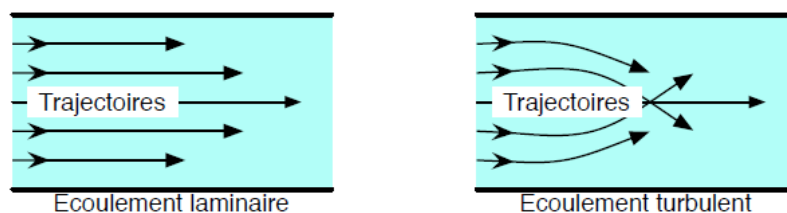


Figure VI.14 : Régime laminaire et régime turbulent

Pour déterminer le type d'écoulement, on utilise le nombre de Reynolds défini par :

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\eta}$$

Avec :

- : Masse volumique du fluide.
- V : La vitesse du fluide.
- D : Diamètre de la canalisation
- : Viscosité dynamique du fluide.
- : Viscosité cinématique —.

Un écoulement est turbulent pour . Dans le cas contraire, l'écoulement est laminaire.

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

4.2.2. Capteurs de débit volumique

4.2.2.1. Débitmètre à tube de Pitot

Dans un tube de Pitot, la mesure des pressions statique et totale permet de déterminer la vitesse et par conséquent le débit :

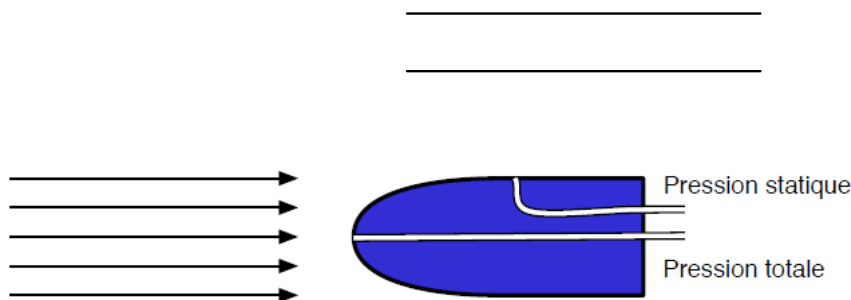


Figure VI.15 : Débitmètre à tube de picot

4.2.2.2. Débitmètres à organe déprimogène

La mesure de la vitesse d'écoulement d'un organe déprimogène est une méthode très utilisée dans la mesure d'un débit. Elle est basée sur la loi de Bernoulli :

—

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

—
 —

Avec k une constante fonction de l'organe.

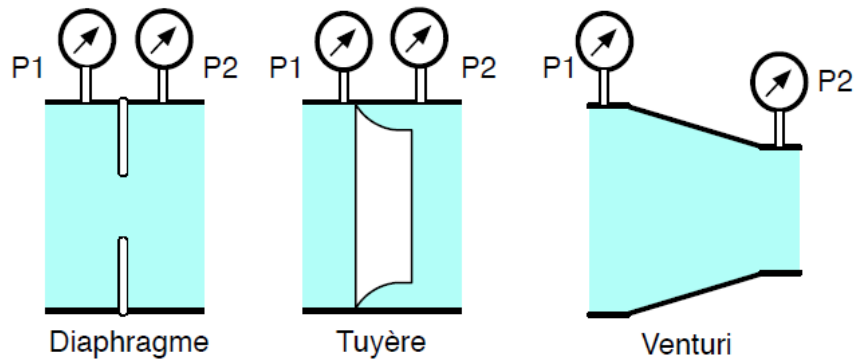


Figure VI.16: Les différents organes déprimogènes

4.2.2.3. Rotamètre

Un rotamètre est constitué d'un flotteur localisé dans une colonne en verre graduée. En l'absence de débit, le flotteur coule au fond de la colonne de verre. La force de gravité agissant sur le flotteur excède la force d'Archimède.

La relation entre le débit Q et la surface A , qui est la surface entre la paroi intérieure de la colonne et le flotteur, est exprimée par :

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{A \cdot v}{t}$$

Avec :

- : La surface du flotteur face au débit.
- : Volume du flotteur.
- : La masse volumique du flotteur



Figure VI.17: Rotamètre

- Caractéristiques :
 - La gamme de mesure va :

De 0,5 litre/h à 200 000 litres/h pour les gaz.

De 0,2 litre/h à 20 000 litres/h pour les liquides.

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

4.2.2.4. Débitmètre à coupelle, à hélice ou à turbine

Ce type de capteur permet de mesurer le débit par mesure de vitesse de rotation du corps d'épreuve (coupelle, hélice ou turbine) et cela par un dispositif tachymétrique : Dynamo-tachymétrique, Capteur optique ou Capteur inductif.

Des précisions de l'ordre de 1% peuvent être atteintes. Cependant, la réponse peut être faussée par les turbulences ou par les variations de vitesses. Leur domaine d'utilisation est de 0,1 à 30 m/s pour les gaz et de 0,05 à 10 m/s pour les liquides.

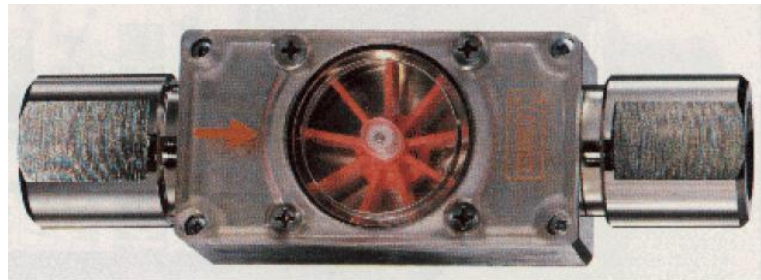


Figure VI.18: Débitmètre à turbine

4.2.2.5. Débitmètre à palette

Le fonctionnement de ce capteur est basé sur l'utilisation d'une palette qui est soumise à la force aérodynamique ou hydrodynamique de l'écoulement et à son poids.

La position d'équilibre est mesurée par un montage potentiométrique.



Figure VI.19: Débitmètre à palette

4.2.2.6. Débitmètre ionique

Trois conducteurs électriques sont placés perpendiculairement au déplacement du fluide. Le fils central est soumis à un potentiel élevé, les deux autres sont reliés à la masse. Ce champ électrique crée une ionisation du fluide.

Les courants électriques I_1 et I_2 sont identiques si la vitesse du fluide est nulle. Dans le cas contraire (fluide en mouvement), le système devient asymétrique. La différence des courants $I_2 - I_1$ est proportionnelle à la vitesse V .

Ce type de capteur est bien adapté aux faibles vitesses et permet la mesure du sens d'écoulement.

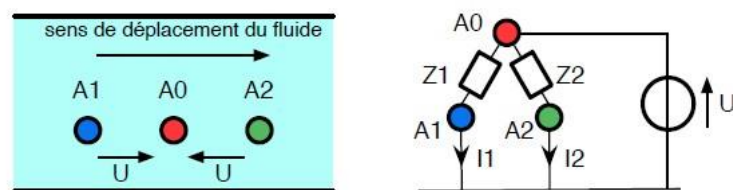


Figure VI.20: Débitmètre ionique

4.2.2.7. Débitmètres ultrasoniques

Un émetteur émet des ondes ultrasonores. La mesure du temps mis par les ondes pour parcourir la distance L entre l'émetteur et le récepteur permet de déterminer la vitesse du fluide :

Avec :

c : La vitesse du son dans le fluide

U : La vitesse du fluide.

α : L'angle entre U et la direction définie par le couple émetteur/récepteur.

- Caractéristiques
 - Echelle linéaire et réponse instantanée ;
 - Insensible à l'agressivité du fluide.
 - Mesure des débits entre $0,1 \text{ m}^3/\text{h}$ et $10^5 \text{ m}^3/\text{h}$.
 - Débits de 0.03 à 30 m/s .
 - Précision de l'ordre de 1% .
 - Mesure dans des conduites de de quelqueq mm de diamètre à plusieurs mètres.
 - Mesure dans les deux sens.

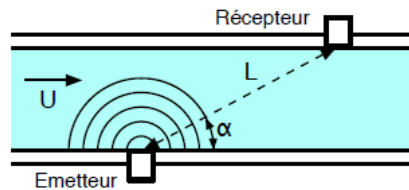


Figure VI.21: Débitmètre ultrasonique

4.2.3. Capteurs de débit massique

4.2.3.1. Capteur électromagnétique

Le principe du débitmètre électromagnétique est basé sur la loi de Lenz : Un conducteur en mouvement dans un champ magnétique constant est soumis à une force électromotrice proportionnelle à la vitesse de déplacement du conducteur :

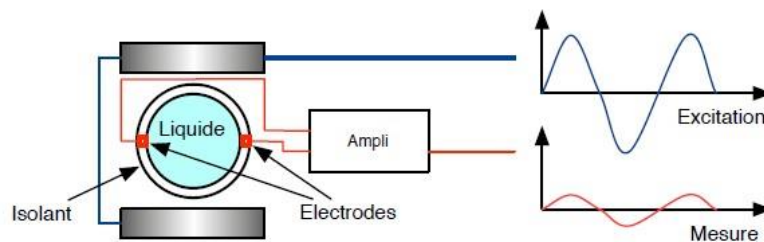


Figure VI.22: Capteur électromagnétique

L'induction magnétique, de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-2} T, est produite par deux bobines placées de part et d'autre de la conduite de mesure. La conduite est en matériaux amagnétiques et elle est revêtue sur sa surface intérieure d'une couche isolante. Deux électrodes de mesure sont placées aux extrémités du diamètre perpendiculaire au champ B. Les bobines sont alimentées par une tension alternative, afin d'éviter une polarisation des électrodes. Les liquides doivent avoir une conductivité minimale de l'ordre de quelques S/cm.

L'étendue de mesure est fonction du diamètre de la conduite, la vitesse d'écoulement peut varier de 1 à 10 m/s. La précision est de classe 1 et la constante de temps est de l'ordre de 1 s.

4.2.3.2. Capteur thermique

Deux capteurs de température sont placés aux points A et B, de part et d'autre d'un élément chauffant (Figure VI.23). La différence de température, $T_b - T_a$ est proportionnelle au débit massique.

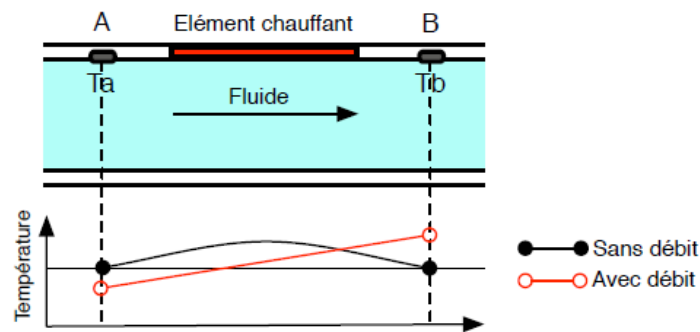


Figure VI.23: Capteur thermique

- Caractéristiques
 - Précision : Classe 0,5 à 1,5 ;
 - Constante de temps : De l'ordre de 2,5 s à 150 s.
 - Perte de charge : De l'ordre de 2 Pa.

4.2.3.3. Débitmètre à effet Coriolis

Le capteur est une portion de canalisation horizontale en forme de U (Figure VI.24). Un champ électromagnétique alternatif induit une rotation alternative selon l'axe de la conduite. Le fluide s'écoulant dans le tube est contraint de suivre cette rotation. Il se produit alors un phénomène alternatif de résistance ou d'aide à la rotation, entraînant deux vibrations en amont et en aval du coude. Ces vibrations sont en déphasage, dont l'amplitude est proportionnelle au débit massique du fluide.

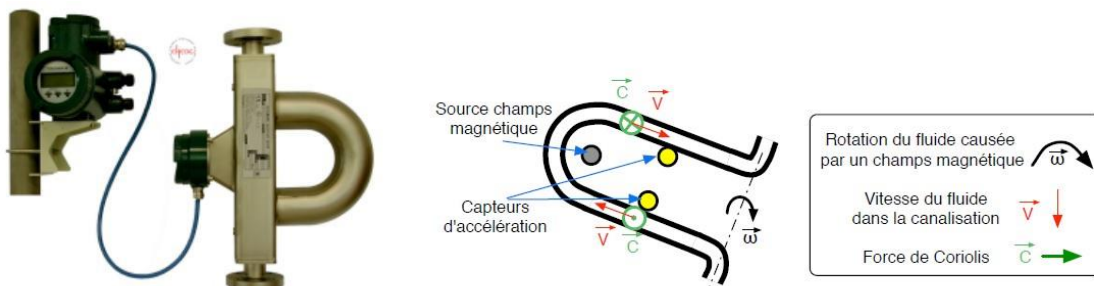


Figure VI.24: Capteur à effet Coriolis

- Caractéristiques
 - Précision de mesure pour liquide : Débit massique $\pm 0,15\%$, débit volumique : $\pm 0,3\%$.
 - Précision de mesure pour gaz : débit massique : $\pm 0,5\%$.
 - Dynamique de mesure 1000 :1.
 - Excellente reproductibilité.
 - Grande immunité aux parasites électromagnétiques.