

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA - JIJEL –



FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Support de Cours
CAPTEURS ET CHAINES DE MESURE
3^{eme} ANNEE LICENCE ELECTROMECHANIQUE

Ilhem HAFSAOUI Née BOUTANA

2019/2020

SOMMAIRE

1.	GENERALITES	3
2.	CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES DES CAPTEURS	6
3.	MESURE DE TEMPERATURE.....	11
4.	MESURE DE PRESSIONS	20
5.	MESURE DE NIVEAUX ET DE DEBITS	26
6.	MESURE DE DEPLACEMENTS ET DE VITESSES	40
	BIBLIOGRAPHIE.....	50

I.GENERALITES

1.1. Introduction

« On ne connaît bien un phénomène que lorsqu' il est possible de l'exprimer par un nombre » **d'après Lord Kelvin**

En effet la simple observation de phénomènes ne peut en donner qu'une idée vague. Pour arriver à une meilleure compréhension d'un phénomène, il faut recourir à l'expérience, au cours de laquelle, l'observation est effectuée à l'aide d'instruments de mesure, permettant de faire une étude quantitative du phénomène et, grâce à l'outil mathématique, d'en donner une interprétation théorique. L'évolution de tout phénomène physique dépend de paramètres : grandeurs.

Une grandeur est mesurable lorsqu'on sait définir le rapport de deux grandeurs de son espèce. Si on choisit une grandeur U prise comme référence ou unité, toutes les grandeurs G peuvent être exprimées en fonction de U sous la forme : $G = g.U$ où g représente la mesure de G avec l'unité U .

On appelle grandeurs extensives lorsqu'elles s'ajoutent comme la masse.

Les grandeurs intensives ne s'ajoutent pas comme la température.

1.2. Grandeurs fondamentales et grandeurs dérivées

On est amenée pour des raisons de commodités à choisir arbitrairement un certain nombre de grandeurs indépendantes comme grandeurs fondamentales, toutes les autres grandeurs seront exprimées en fonction de celles-ci et appelées grandeurs dérivées.

Les grandeurs fondamentales choisies sont:

- La longueur
- La masse
- Le temps
- L'intensité du courant électrique
- La température
- L'intensité lumineuse

Ainsi les unités fondamentales correspondantes sont:

- Le mètre (**M**)
- Le kilogramme (**Kg**)
- La seconde (**S**)
- L'ampère (**A**)
- Le degré Kelvin (**°K**)

- La candela

Les quatre premières unités fondamentales forment le système international (le système MKSA). A l'aide de ces unités, on peut définir toutes les autres unités dérivées à partir des lois générales de la physique.

1.3. Equations de dimensionnement

Toutes les grandeurs dérivées peuvent être exprimées en fonction des grandeurs fondamentales sous la forme : $[X] = M^\alpha L^\beta T^\gamma I^\delta$

C'est l'équation aux dimensions de la grandeur X.

Exemples :

- $F = m \cdot \gamma \rightarrow [F] = M \cdot L \cdot T^{-2}$
- $V = \frac{P}{I} \rightarrow [V] = M \cdot L^2 \cdot T^{-3} I^{-1}$

Toutes les formules de la physique sont homogènes. La vérification de l'homogénéité d'une équation permet d'éviter les erreurs de calcul. De plus, il est possible de retrouver une formule à partir de l'analyse dimensionnelle du phénomène.

1.4. Incertitudes et erreurs

Toute mesure de n'importe quelle grandeur physique comporte des erreurs, et un résultat expérimental n'a de valeur que si l'on a déterminé l'ordre de grandeur de l'erreur globale commise dues :

- Aux erreurs de manipulation de l'expérimentateur.
- Aux instruments de mesure.
- Aux imperfections causées au système.

Les erreurs sont exprimées sous deux formes:

1.4.1. Erreur absolue

Elle représente la valeur absolue de l'écart entre la vraie valeur X et la valeur mesurée X_{mes} : $\Delta X = |X - X_{mes}|$

1.4.2. Erreur relative

Elle donne la précision de la mesure et s'exprime par un nombre sans dimension qui est le rapport: $\varepsilon = \frac{\Delta X}{X}$

1.4.3. Théorème des erreurs

Soit une grandeur G , liée aux grandeurs x, y, z par une relation: $G = f(x, y, z)$.

Les grandeurs x, y, z sont supposées indépendantes.

On écrit la différentielle totale de cette fonction : $df = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \frac{\partial f}{\partial z} dz$

Où $\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z}$ représentent les dérivées partielles de f par rapport aux variables x, y, z .

Le principe de base du calcul d'erreurs est d'assimiler les erreurs absolues $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ aux valeurs absolues des différentielles dx, dy, dz . La relation fondamentale de l'erreur est donnée par : $\Delta f = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \Delta x + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \Delta y + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \right| \Delta z$.

1.5. Différentes erreurs

1.5.1. Erreurs systématiques

Ce sont des erreurs reproductibles dues à l'équipement et à la méthode utilisée et dépendent de la totalité des conditions de mesure et sont reliées à leur cause par une loi physique,

1.5.2. Erreurs aléatoires

Ce sont des erreurs, non reproductibles, qui obéissent à des lois statistiques.

1.5.3. Erreurs accidentelles

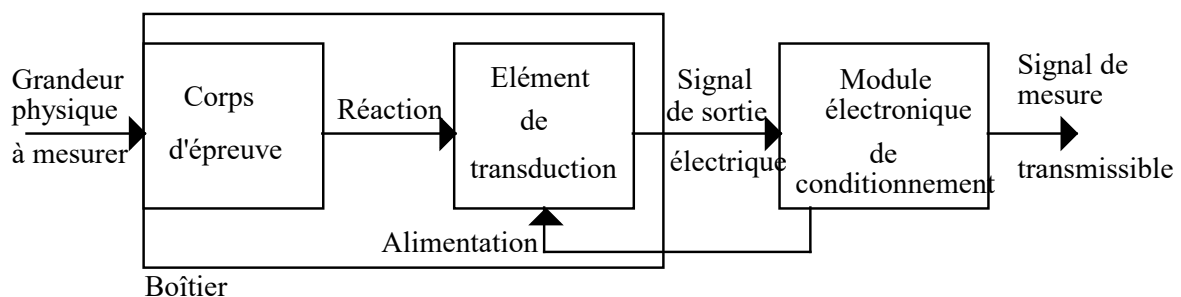
Elles résultent d'une fausse manœuvre, d'un mauvais emploi ou de dysfonctionnement de l'appareil. Elles sont imprévisibles et incontrôlables.

II. CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES DES CAPTEURS

2.1. 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.

2.2. 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,...)

2.3. 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

2.4. 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.

2.5. Caractéristiques métrologiques d'un capteur

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

2.5.1. Etendue de mesure

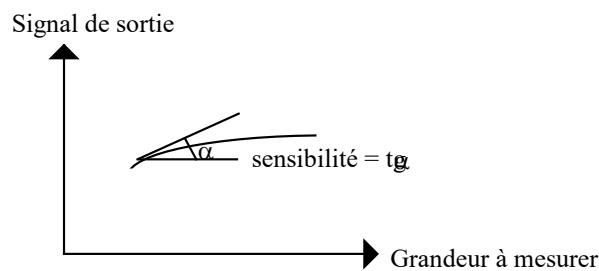
Domaine de mesure pour lequel les indications du capteur ne doivent pas être entachées d'une erreur supérieure à l'erreur maximale tolérée. On appelle les valeurs limites du domaine, « portée minimale » et « portée maximale ».

2.5.2. 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 à 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

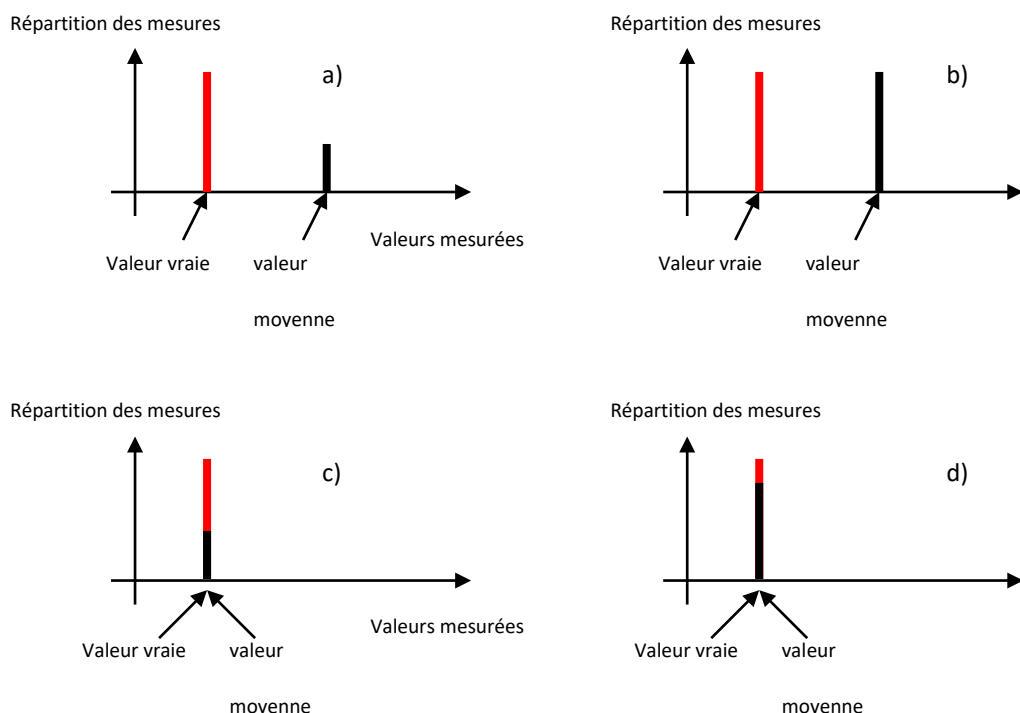


2.5.3. Précision

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

2.5.4. 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.



2.5.5. 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.

2.5.6. Stabilité

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

2.5.7. Répétabilité et Reproductibilité

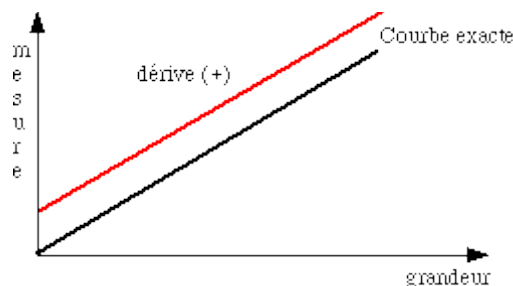
- La **répétabilité** est l'étroitesse de l'accord entre les résultats de mesures successifs d'une même grandeur effectuée avec la même méthode, par le même observateur, avec les mêmes instruments de mesure et à des intervalles de temps assez courts.
- La **Reproductibilité** est l'étroitesse de l'accord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

2.5.8. 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.

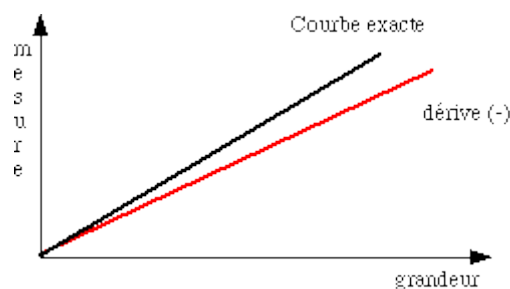
2.5.9. Erreurs de mesure

- **L'erreur de zéro (offset)**



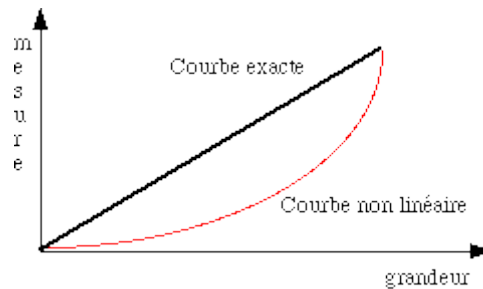
- **L'erreur d'échelle (gain)**

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



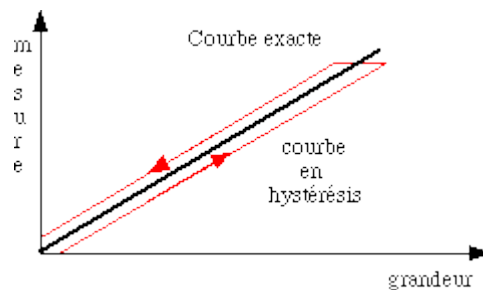
- **L'erreur de linéarité**

La caractéristique n'est pas une droite.



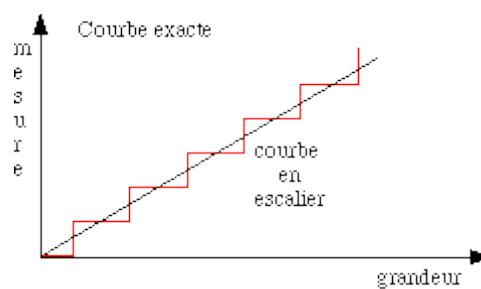
- **L'erreur due au phénomène d'hystérésis**

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.



III.MESURE DE TEMPERATURE

3.1. Introduction à la thermométrie

3.1.1.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.

3.1.2. Les échelles de température

3.1.2.1. 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.

3.1.2.2. Echelle Celsius

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

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

3.1.2.3. Autres échelles

Les pays anglo-saxons utilisent une échelle de température différente : l'**échelle Fahrenheit**, définie par : $1[^\circ\text{F}] = \frac{9}{5}\theta[^\circ\text{C}] + 32$

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

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

Zéro thermodynamique: 0 °R;

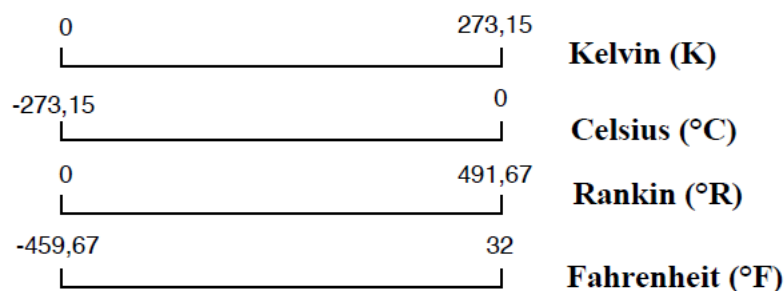


Figure III.1 : Echelles de température

3.2. 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

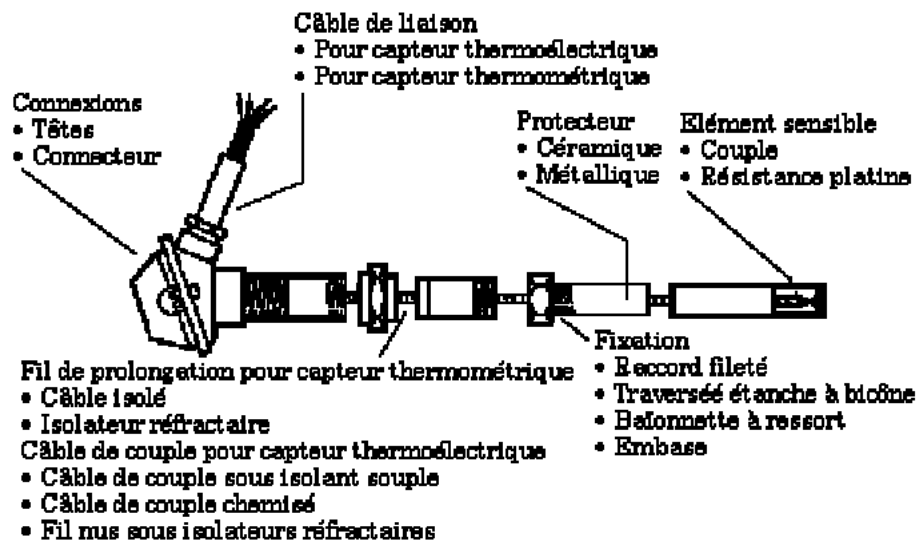


Figure III.2 : Structure d'un capteur électrique de température industriel

3.2.1. Thermomètres à résistance

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

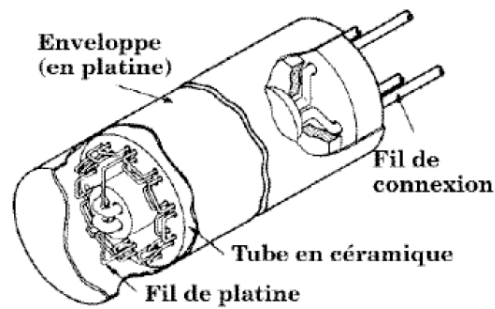


Figure III.3 : Sonde PT100

- 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.

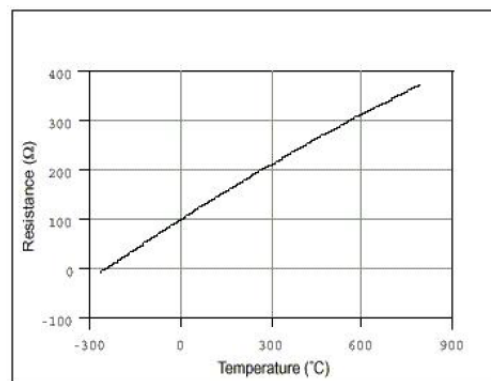


Figure III.4 : Courbe résistance/température pour PT100

3.2.2. 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 :

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

Il existe deux types de thermistances :

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

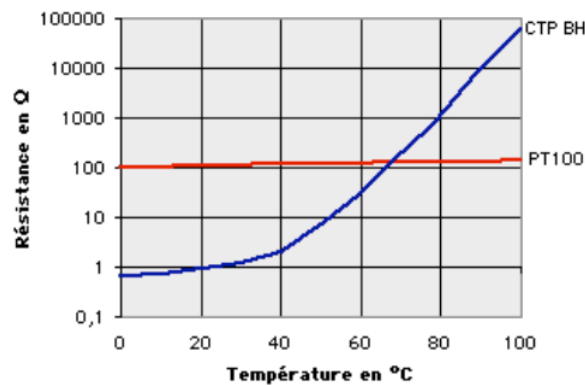


Figure III.5 : Comparaison entre la résistance d'une thermistance CTP et une sonde PT100

- 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.

3.2.3. Thermocouples

3.2.3.1. 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.

3.2.3.2. 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 : $V_M - V_N = P_{AB}^\theta$

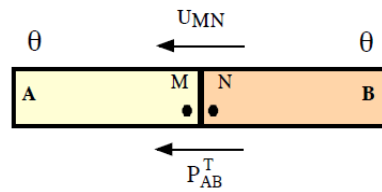


Figure III.6 : Effet Peltier

3.2.3.3. Loi de Volta

Dans un circuit isotherme, constitué de conducteurs différents, la somme des f.e.m. de Peltier est nulle. On a donc : $P_{AB}^{\theta} + P_{BC}^{\theta} = P_{AC}^{\theta}$

3.2.3.4. 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 : $T_A^{\theta_M \theta_N} = \int_{\theta_N}^{\theta_M} h_A \cdot d\theta$

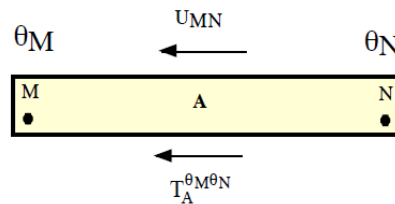


Figure III.7 : Effet Thomson

3.2.3.5. 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 : $S_{AB}^{\theta_2 \theta_1} = T_B^{\theta_2 \theta_1} - T_A^{\theta_2 \theta_1} + P_{AB}^{\theta_2} + P_{AB}^{\theta_1}$

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".

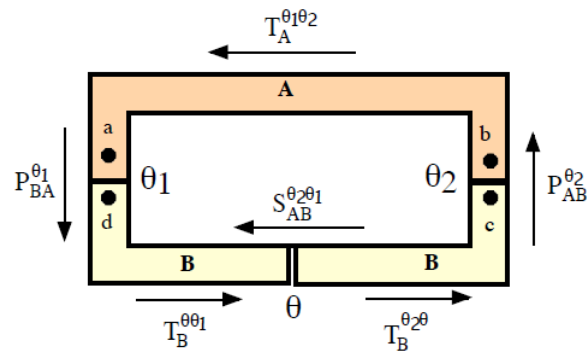


Figure III.8 : Effet Seebeck

3.2.3.6. Différents types de thermocouples

Tableau 1 : Caractéristiques des thermocouples les plus connus

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

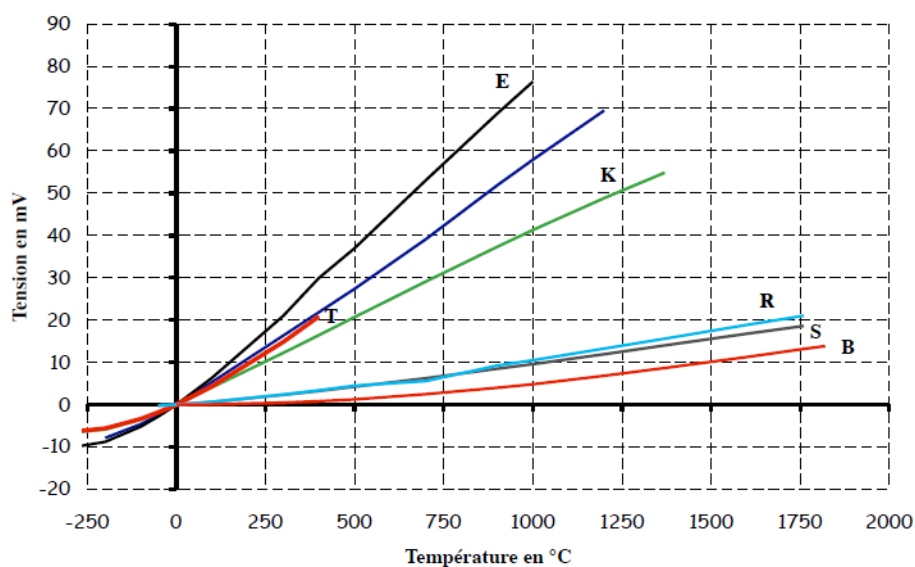


Figure III.9 : FEM en fonction de la température des différents thermocouples

3.2.3.7. 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.

3.2.3.8. Câbles de compensation

On utilise les câbles de compensation dans deux cas :

- Lorsque les métaux formant le couple sont d'un prix très élevé.
- Lorsque la distance entre la prise de température et la jonction de référence est grande.

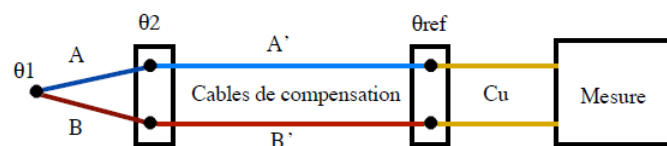


Figure III.10 : Câbles de compensation

3.2.3.9. Méthodes de mesure

Le thermocouple est donc le siège de la FEM de Seebeck, qui permet de mesurer la température.

Deux méthodes sont généralement utilisées :

- Méthode du millivoltmètre.
- Méthode d'opposition : pour laquelle le courant dans le thermocouple est annulé.

3.2.4. Thermomètres à semi-conducteurs

La tension aux bornes d'un semi-conducteur ainsi que le courant qui le traverse dépendent de la température :

$$I = I_0 \cdot \exp\left(\frac{q \cdot V}{k T}\right)$$

Ce sont des capteurs dit intégrés et qui ont l'avantage, à courant constant I , la mesure de V est linéaire en fonction de la température et se présente sous la forme : $V = a \cdot T + b$

Où a dépend de l'élément sensible.

Ce type de capteurs utilisant, des diodes et des transistors ont l'avantage d'être simple à fabriquer et à mettre en œuvre, peu coûteux et très linéaire. Mais du fait de leur conception, ils ont une étendue de mesure limitée ($-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $150\text{ }^{\circ}\text{C}$) et sont affectés par un champs magnétique.

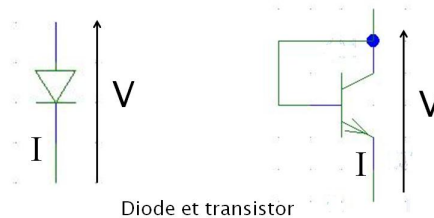


Figure III.11 : Thermomètres à diodes ou transistor

3.3. Pyromètres optiques

3.3.1. Principe

Les pyromètres optiques se basent sur la relation entre la température d'un corps et le rayonnement optique que ce corps émet. Ils permettent la détermination d'une température sans contact avec l'objet. C'est donc une méthode appropriée quand les conditions expérimentales n'autorisent pas l'utilisation des capteurs thermométriques classiques.



Figure III.12 : Pyromètre optique

3.3.2. Applications

- mesure de températures élevées
- Plage de 300 à $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Précision de $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$
- mesures à de grandes distances
- environnement très agressif
- Localisation des points chauds
- Pièce en mouvement

3.3.3. Types de pyromètres optiques

Suivant qu'on utilise les grandeurs spectrales à une longueur d'onde déterminée ou les grandeurs intégrales sur l'ensemble du spectre visible et infrarouge, les résultats obtenus n'ont pas la même signification physique. On distingue :

- Les pyromètres monochromatiques.

- Les pyromètres bi-chromatiques.
- Les pyromètres mesureurs d'énergie à radiation totale : On retrouve un thermocouple ou un RTD au niveau du point focal

3.3.4. Caractéristiques

- Plage de 300 à 3000 °C;
- Précision de ± 5 °C (dépend de l'utilisateur);
- Fonctionnement automatique possible.
- Capteur infrarouge avec thermocouple.

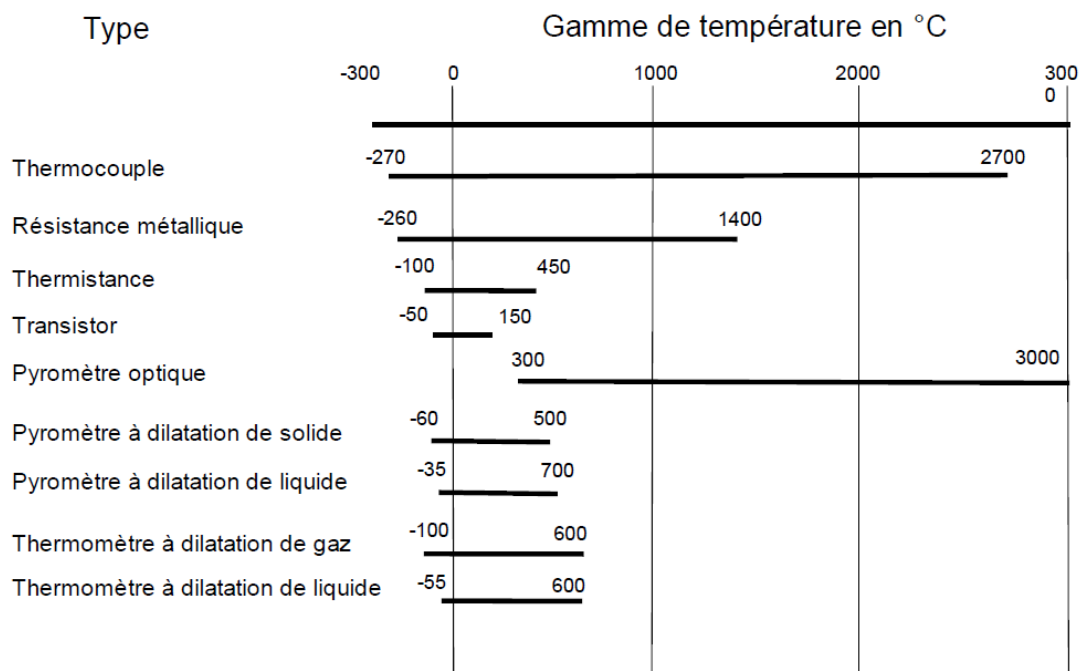
3.4. Conclusion

Le type de mesure définit le type de capteur à utiliser. Le choix du capteur adéquat dépend de différents critères :

- l'application
- l'étendue de mesure
- la précision
- la fidélité
- le temps de réponse
- prix
- durée de vie (la robustesse).
- sa forme

Un tableau récapitulatif des différences de gammes est donné comme suit :

Tableau 2 : Comparaison entre les différents capteurs thermométriques selon la gamme de température



IV.MESURE DE PRESSIONS

4.1. Définitions

4.1.1.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 : $P[P_a] = \frac{F[N]}{S[m^2]}$

4.1.2.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

4.1.3.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.

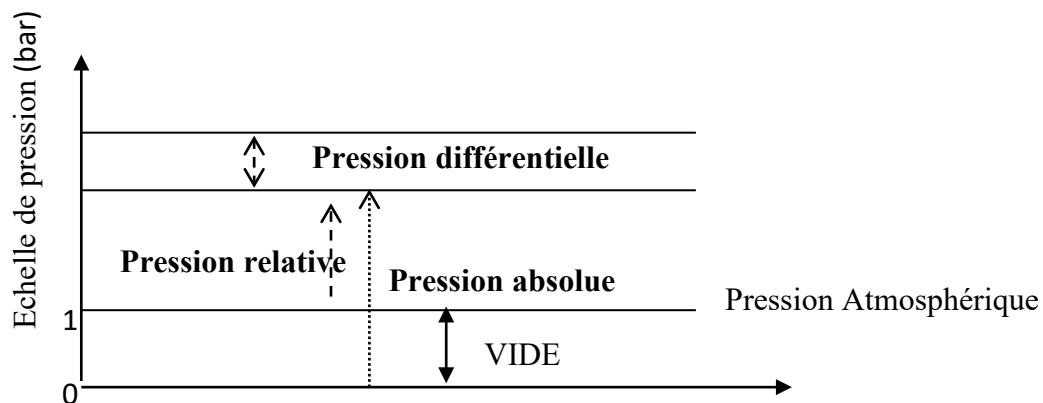


Figure IV.1 : Les différentes pressions

4.1.4. 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 : $P [P_a] = \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot g \left[\frac{m}{s^2} \right] \cdot h [m]$
- **Pression dues aux forces extérieure** : Un fluide qui se déplace avec une vitesse V , crée une pression supplémentaire : $P [P_a] = \frac{1}{2} \cdot \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot V^2 \left[\frac{m}{s} \right]$
- **Pression totale** : C'est la somme de la pression hydrostatique et de la pression due aux forces extérieures.

4.2. Capteurs électriques

4.2.1. Capteurs passifs

4.2.1.1. Capteurs résistifs

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

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

Avec :

ρ : Résistivité du matériau.

L : Longueur du conducteur.

S : Section du conducteur.

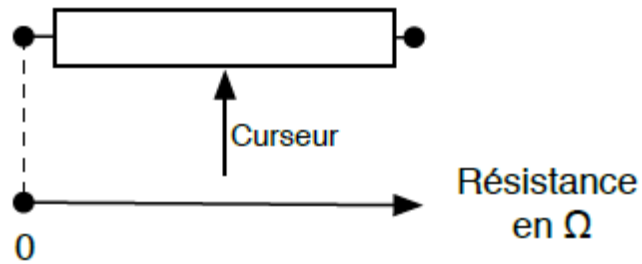


Figure IV.2 : Capteur résistif rectiligne

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

4.2.1.2. Capteurs capacitifs

Un condensateur est composé de deux conducteurs séparés par un isolant. La capacité d'un condensateur est: $C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S}{e}$

Avec :

- 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

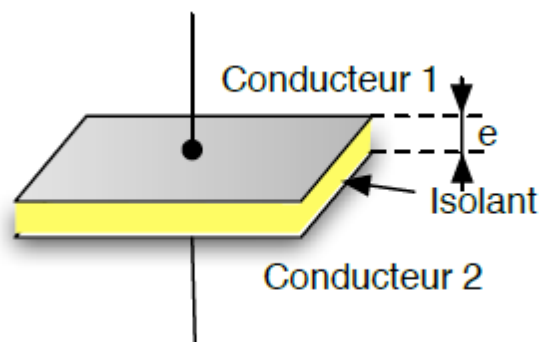


Figure IV.3 : Condensateur

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.

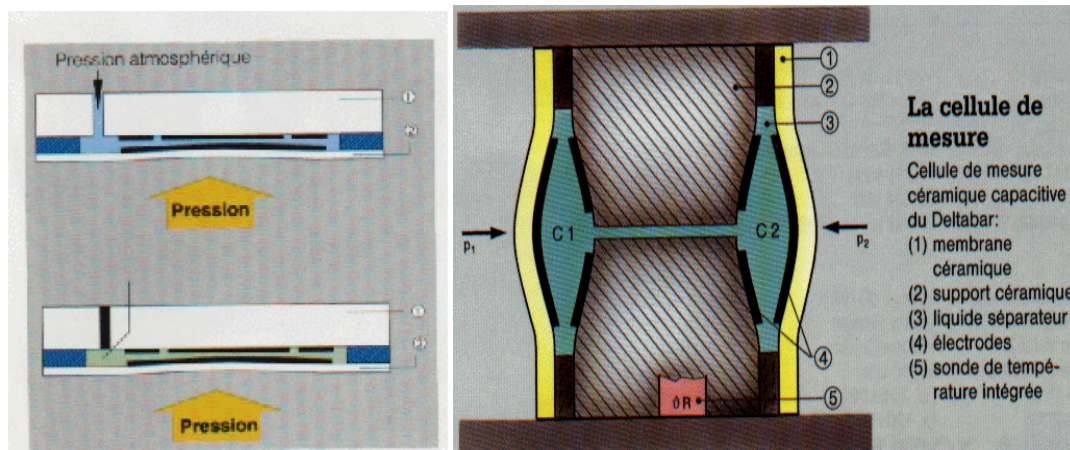


Figure IV.4 : Capteur capacitif de pression

4.2.1.3. 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 IV. 5). On peut écrire : $N \cdot I = R \cdot \phi$

Avec :

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

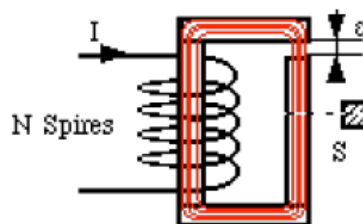


Figure IV.5 : Lignes de champs dans une inductance

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.

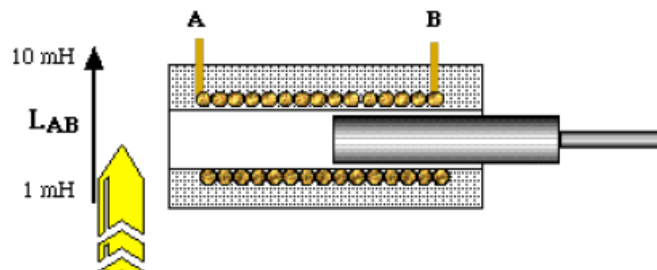


Figure IV.6 : Capteur inductif

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

4.2.1.4. 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.

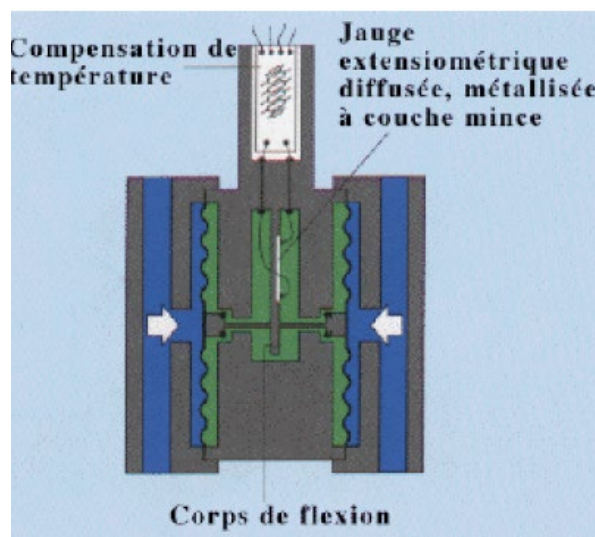


Figure IV.7 : Capteur de pression avec jauge extensiométrique

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

4.2.2. 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 IV.8).

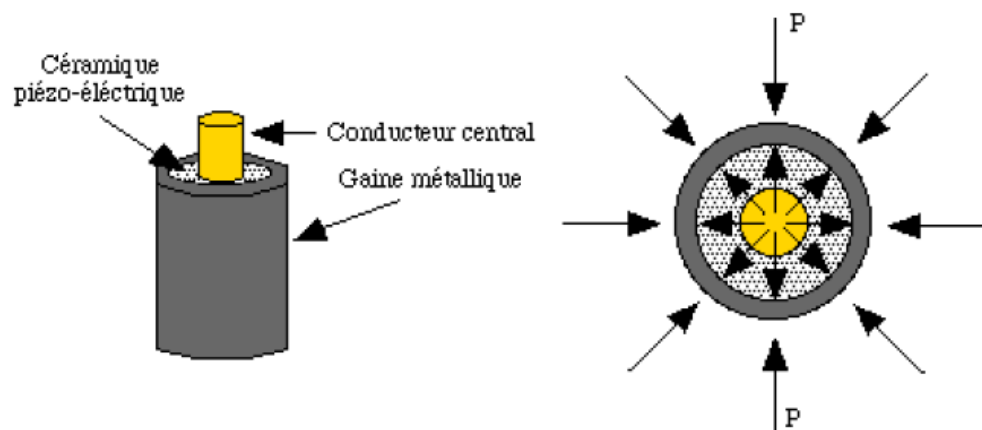


Figure IV.8 : Capteur piézoélectrique

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

V. CAPTEURS DE NIVEAUX ET DE DEBITS

5.1. Capteurs de niveaux

5.1.1. Introduction

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

5.1.2. Capteurs à flotteurs

5.1.2.1. 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 :

$$P [P_a] = \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot g \left[\frac{m}{s^2} \right] \cdot L [m]$$

5.1.2.2. 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.

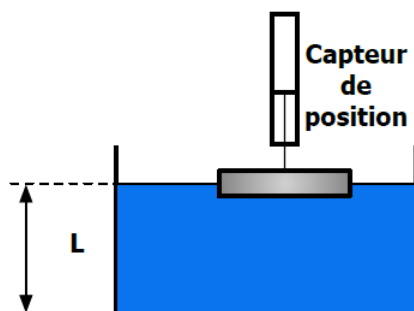


Figure V.1 : Mesure de niveau par flotteur



Figure V.2 : Flotteur industriel

5.1.2.3. 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:

$$F [N] = P [P_a] - \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot g \left[\frac{m}{s^2} \right] \cdot S [m^2] \cdot L [m]$$

Avec :

P : le poids du plongeur.

S : La section

$g \cdot S \cdot L$: La poussée d'Archimède s'exerçant sur le volume immergé du plongeur

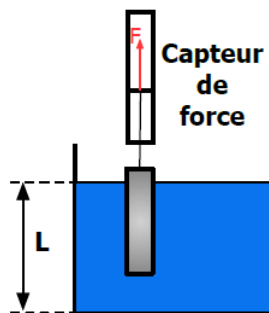


Figure V.3 : Mesure de niveau par plongeur



Figure V.4 : Photo d'un plongeur

5.1.2.4. Mesure de niveau par capteur de pression

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

$$L[m] = \frac{P[P_a]}{\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] g \left[\frac{m}{s^2} \right]}$$

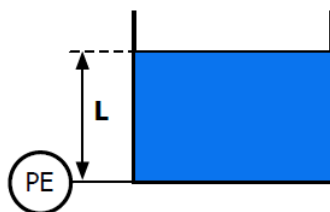


Figure V.5 : Mesure de niveau par capteur de pression



Figure V.6 : Capteur de pression

5.1.2.5. Mesure de niveau par bullage

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

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

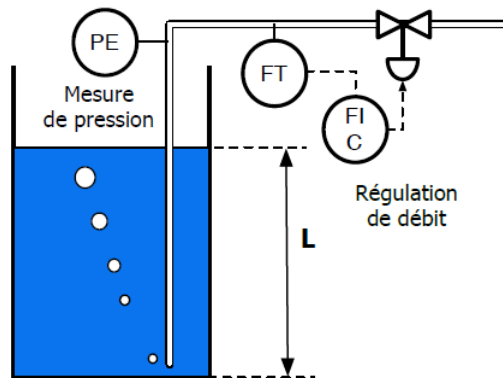


Figure V.7 : Mesure de niveau par bullage

- 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.

5.1.2.6. Capteur de pression différentielle

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

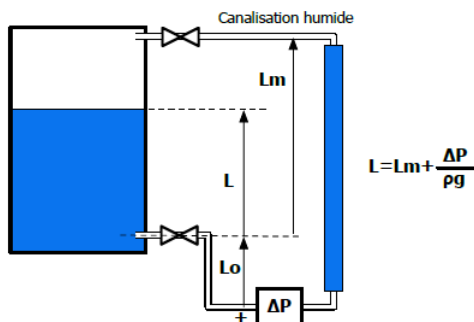


Figure V.8 : Réservoir avec condensation

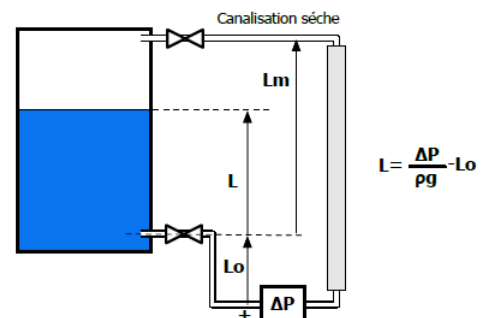


Figure V.9 : Réservoir sans condensation

5.1.2.7. 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 V.10).

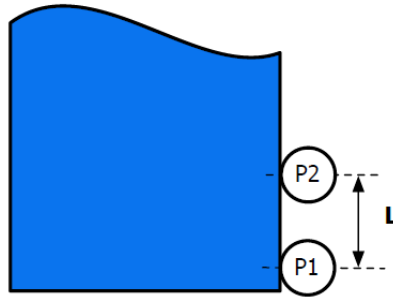


Figure V.10 : Mesure de masse volumique

5.1.3. Capteurs électriques

5.1.4. 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.

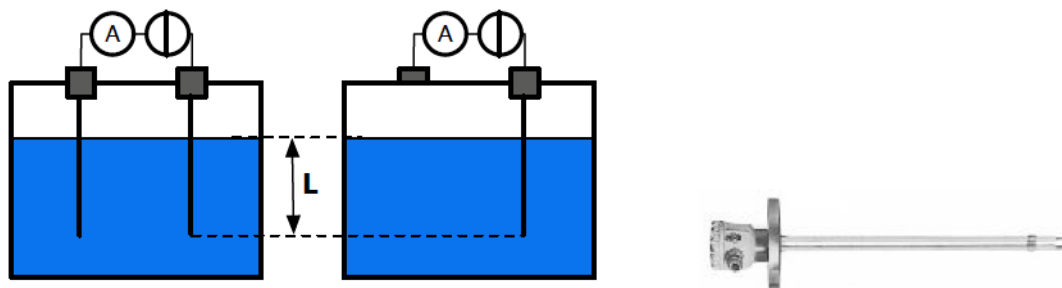


Figure V.11 : Capteurs conductimétriques

5.1.5. 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.

5.1.6. 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.

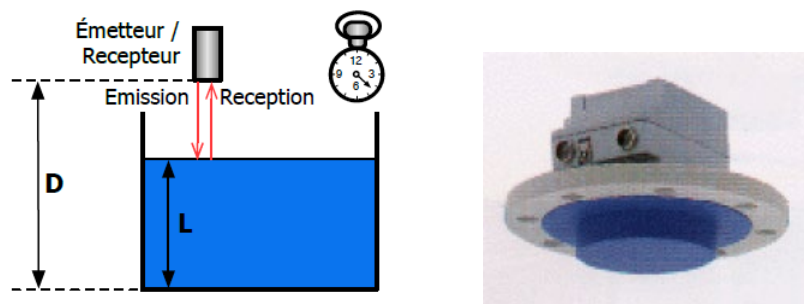


Figure V.12 : Capteur de niveau acoustique

- 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.

5.1.7. 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.

5.1.8. 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 une chambre d'ionisation ou un ou plusieurs tubes Geiger-Muller. La Mesure est fiable et sans contact.

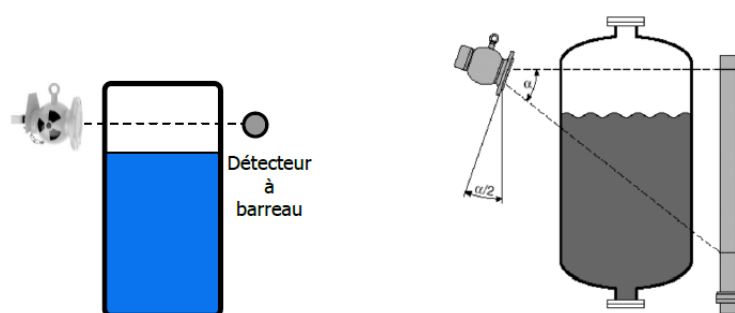


Figure V.13 : Principes de mesure de niveau par Gammamétrie

5.1.9. 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

5.2. Capteurs de débits

5.2.1. Définitions

5.2.1.1. 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 :

$$Q_m [kg/s] = \rho [kg/m^3] \cdot Q_v [m^3/s]$$

5.2.1.2. 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.

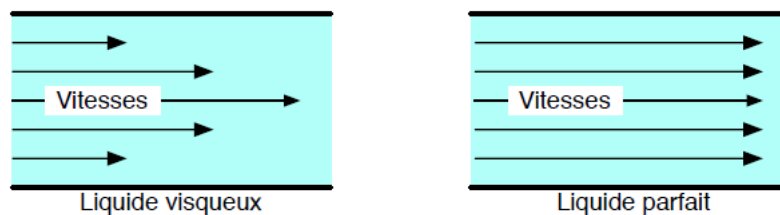


Figure V.14 : Différence entre fluide parfait et fluide réel

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.

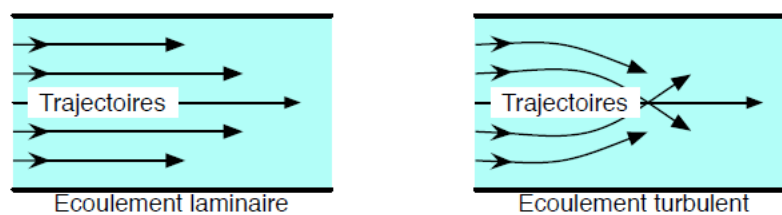


Figure V.15 : Régime laminaire et régime turbulent

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

$$\mathfrak{R}_e = \frac{\rho[kg/m^3] \cdot V[m/s] D[m]}{\mu \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right]} = \frac{V[m/s] D[m]}{\nu[m^2/s]}$$

Avec :

- ρ : Masse volumique du fluide.
- V : La vitesse du fluide.
- D : Diamètre de la canalisation
- μ : Viscosité dynamique du fluide.
- ν : Viscosité cinématique $\nu = \frac{\mu}{\rho}$.

Un écoulement est turbulent pour $\mathfrak{R}_e > 2200$. 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 :

$$Q_v [m^3/s] = V[m/s] \cdot S[m^2]$$

5.2.2. Capteurs de débit volumique

5.2.2.1. 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 :

$$V[m/s] = \sqrt{\frac{2(P_{totale} - P_{statique})[Pa]}{\rho[kg/m^3]}}$$

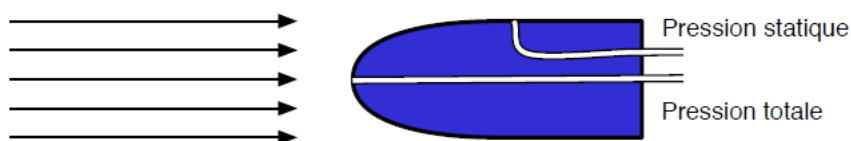


Figure V.16 : Débitmètre à tube de picot

5.2.2.2. 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 :

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho g z + p = \text{constante}$$

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:

$$Q_v [m^3/s] = k[m^2] \cdot \sqrt{\frac{\Delta P [Pa]}{\rho [kg/m^3]}}$$

Avec k une constante fonction de l'organe.

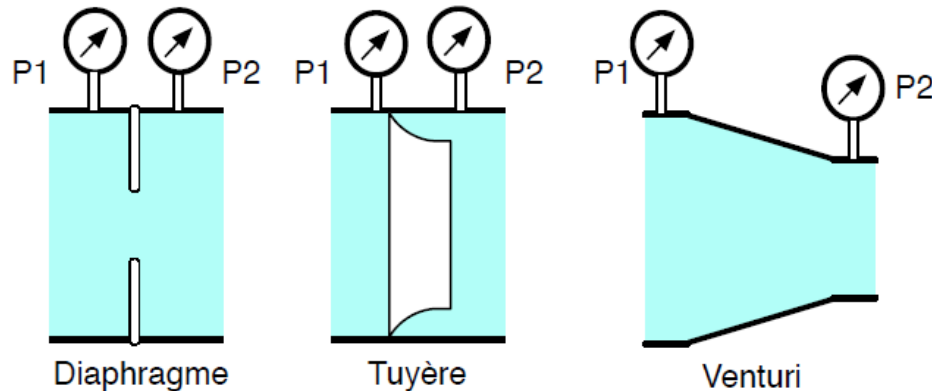


Figure V.17: Les différents organes déprimogènes

5.2.2.3. 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 :

$$Q = K.S \sqrt{2g \frac{V_f}{S_f} \left(\frac{\rho_f}{\rho} - 1 \right)}$$

Avec :

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



Figure V.18: 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.

5.2.2.4. 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 : Dynamotachymétrique, 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.

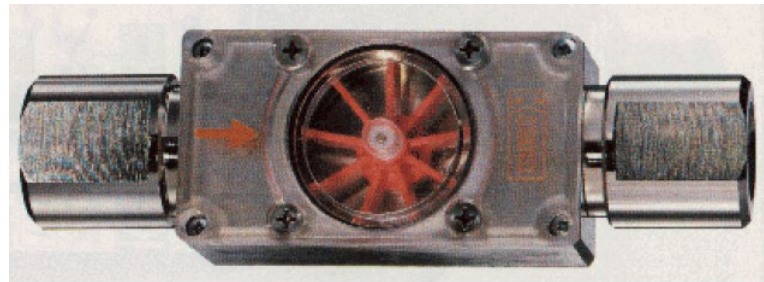


Figure V.19: Débitmètre à turbine

5.2.2.5. 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 V.20: Débitmètre à palette

5.2.2.6. 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.

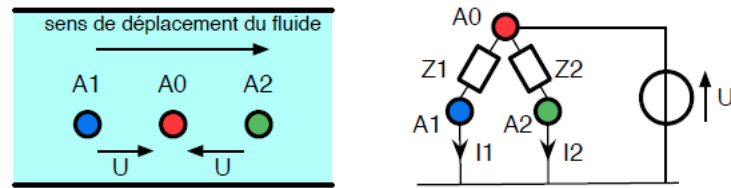


Figure V.21: Débitmètre ionique

5.2.2.7. 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 :

$$t = \frac{L}{c + U \cos \alpha}$$

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 quelques mm de diamètre à plusieurs mètres.
 - Mesure dans les deux sens.

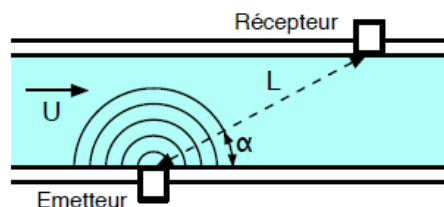


Figure V.22: Débitmètre ultrasonique

5.2.3. Capteurs de débit massique

5.2.3.1. 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 :

$$\vec{E} = \vec{V} \wedge \vec{B}$$

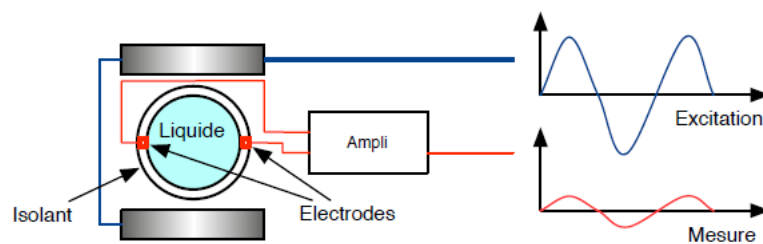


Figure V.23: Capteur électromagnétique

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.

5.2.3.2. Capteur thermique

Deux capteurs de température sont placés aux points A et B, de part et d'autre d'un élément chauffant (Figure V.24). La différence de température, $T_b - T_a$ est proportionnelle au débit massique.

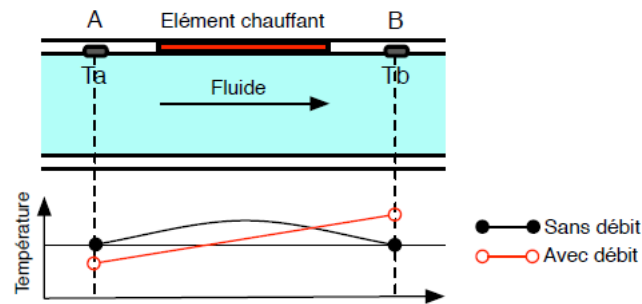


Figure V.24: Capteur thermique

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

5.2.3.3. Débitmètre à effet Coriolis

Le capteur une portion de canalisation horizontale en forme de U (Figure V.25). 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.

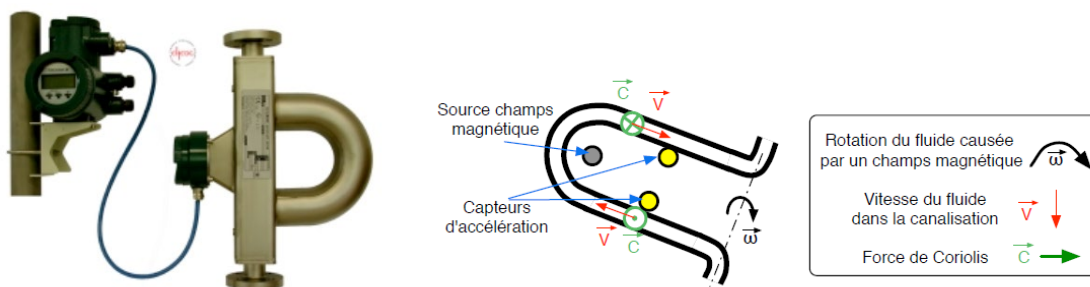


Figure V.25: Capteur à effet Coriolis

- 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.

VI. MESURE DE DEPLACEMENTS ET DE VITESSE

6.1. Capteurs de déplacements

6.1.1. Introduction

Les capteurs de déplacement et position sont d'un emploi très général, d'une part, parce que le contrôle des positions et déplacements est un élément important pour le fonctionnement correct des machines et d'autre part, parce qu'un certain nombre de grandeurs physiques sont mesurables par les déplacements qu'elles imposent à des corps : forces, pressions, accélération.

6.1.2. Les capteurs pneumatiques

6.1.2.1. Principe

D'utilisation limitée, les capteurs pneumatiques sont habituellement associés à des détecteurs électriques. Appelés généralement "*capteurs à fuites*", ils sont utilisés surtout pour détecter des pièces à faible distance, sans contact et donc sans usure. L'orifice **A** est relié à la distribution pneumatique tandis que l'orifice **B** est associé à un capteur électrique.

En absence de pièce, l'air sous pression s'évacue et aucune pression résiduelle ne revient par **B**. En présence de pièce, une pression résiduelle revient par **B** actionnant un micro rupteur.

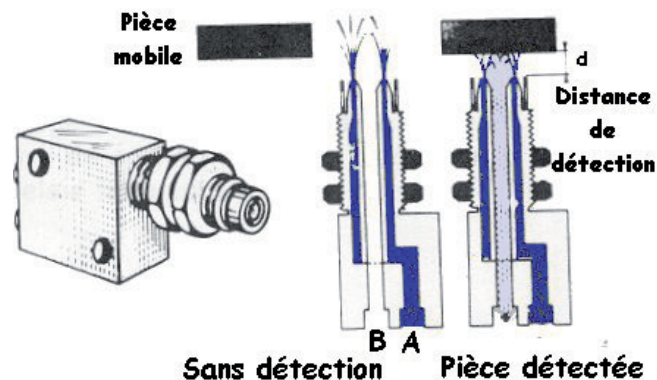


Figure VI.1 : Capteur pneumatique

6.1.2.2. Caractéristiques

- Précision de la détection
- Choix en fonction de la distance à détecter, de la pression maximale et minimale et de l'encombrement
- Indice de protection
- Ils nécessitent un réglage
- Ils nécessitent une source d'énergie pneumatique
- Ils sont bruyants

6.1.3. Les capteurs mécaniques

En perte de vitesse, les capteurs mécaniques à contact sont les seuls encore largement utilisés. L'action mécanique sur la partie mobile du capteur permet d'établir ou d'interrompre un contact électrique.

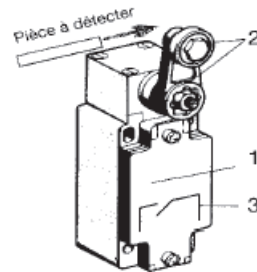


Figure VI.2 : Capteur mécanique

Caractéristiques :

- Pouvoir de coupure et type de contact (3)
- Taux moyen de bon fonctionnement
- Encombrement
- Indice de protection
- Type de palpeur (2)

6.1.4. Les capteurs résistifs

Essentiellement utilisés pour mesurer des déplacements ou des rotations. Ils utilisent le principe du montage potentiométrique permettant d'obtenir une relation directe entre déplacement et tension.

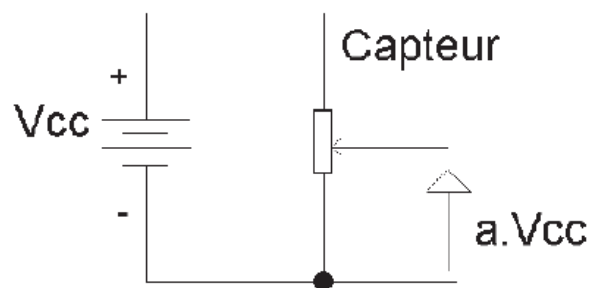


Figure VI.3 : Capteur résistif

Caractéristiques :

- Longueur ou angle de la course
- Résistance totale
- Linéarité
- Force de déplacement
- Durée de vie
- Répétabilité

6.1.5. Les capteurs inductifs

Les capteurs inductifs sont parmi les plus utilisés sur les systèmes automatisés. Plusieurs types de capteurs cohabitent mais ils reposent tous sur un phénomène magnétique.

6.1.5.1. Les détecteurs inductifs

Ces capteurs se composent d'un oscillateur ayant pour fonction de générer un champ magnétique de fréquence 100 à 600Hz. Lorsqu'une pièce métallique pénètre dans ce champs, elle est le siège de courants induits circulaires qui se développent à sa périphérie.

Ces courants constituent une surcharge pour le système oscillateur et entraînent de ce fait une réduction de l'amplitude des oscillations au fur et à mesure de l'approche de l'objet métallique, jusqu'à blocage complet. La détection est effective lorsque la réduction de l'amplitude des oscillations est suffisante pour provoquer un changement d'état de la sortie du détecteur.

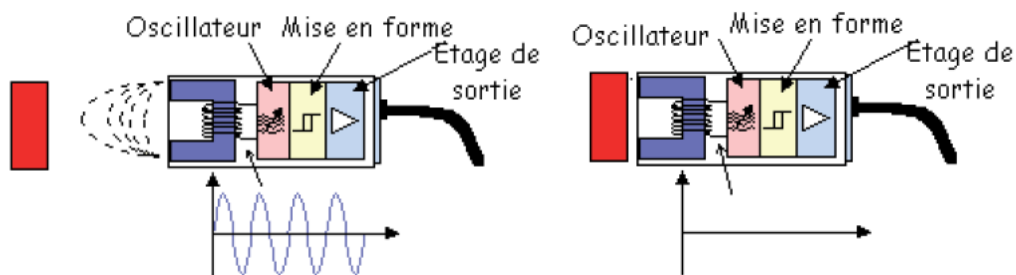


Figure VI.4 : Fonctionnement d'un détecteur inductif

Caractéristiques :

- Tension d'alimentation
- Consommation
- Courant de sortie
- Portée nominale de détection
- Ils ne peuvent détecter que des matériaux métalliques

6.1.5.2. Capteur à effet Hall

Lorsqu'un matériau semi conducteur est parcouru par un courant I_{ch} et soumis normalement aux grandes faces à un champ d'induction magnétique B , on constate, entre les deux faces parallèles à la direction du courant, l'existence d'une tension appelée tension de Hall (V_h). L'amplitude de cette tension dépend à la fois du courant, du champ B , d'une constante dépendant des caractéristiques du semi-conducteur et de l'angle entre le champs B et la normale de la surface. Un capteur à effet Hall est basé sur ce fonctionnement.

$$V_h = B \cdot I_{ch} \cdot l \cdot \sin \alpha$$

Pour sa mise en œuvre, soit la sonde de Hall est fixée sur un aimant et on détecte la présence d'une pièce mécanique, ou alors on détecte directement la présence de l'aimant.

Les capteurs à effet hall sont beaucoup utilisés en raison de leur mise en œuvre aisée, de leur petite dimension et de leur précision.

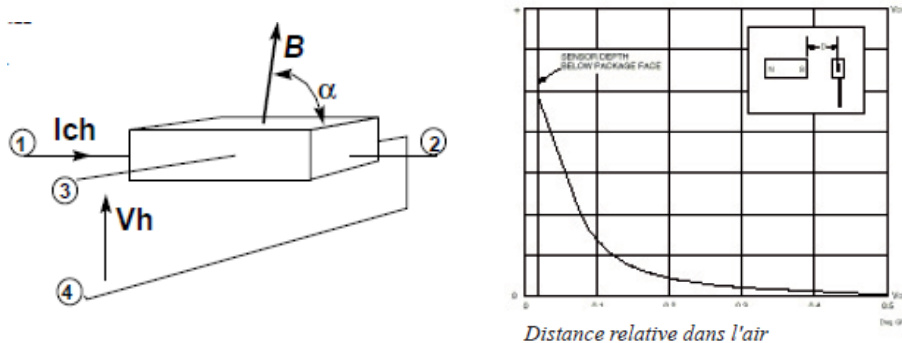


Figure VI.5 : Capteur à effet Hall

Caractéristiques :

- Tension d'alimentation
- Courant de sortie
- Polarité de l'aimant (s'il est associé à un aimant)
- Sensibilité (en V/G)
- Gamme de mesure (en Gauss)

6.1.6. Les capteurs capacitifs

Un capteur capacitif permet de détecter la présence d'un objet métallique ou non. Lorsqu'un objet de nature quelconque ($\epsilon_r > 2$) se trouve en regard de la face sensible du détecteur, ceci se traduit par une variation du couplage capacitif (C_1). Cette variation de capacité ($C_1 > C_0$) provoque le démarrage de l'oscillateur. Après mise en forme, un signal de sortie est délivré.

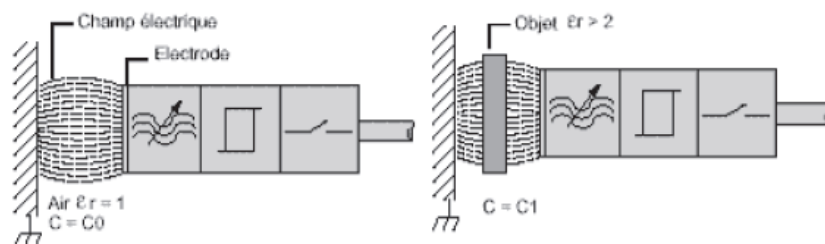


Figure VI.6 : Capteur capacitif

Avantages:

- Pas de contact physique avec l'objet à détecter.
- Cadences de fonctionnement élevées.
- Portée nominale 2 à 5 mm

- Détection d'objets de toutes natures, conducteurs ou non conducteurs, tels que : métaux, minerais, bois, plastique, verre, carton, cuir, céramique, fluides, etc...

6.1.7. Les capteurs à ultrasons

L'ultrason est une onde acoustique dont la fréquence est trop élevée pour être audible par l'être humain. Il peut dans certaines applications, remplacer avantageusement le capteur inductif ou capacitif et il peut détecter des objets jusqu'à plusieurs mètres.

L'émetteur et le récepteur sont situés dans le même boîtier. L'émetteur envoie un train d'ondes qui va se réfléchir sur l'objet à détecter et ensuite revenir à la source. Le temps mis pour parcourir un aller-retour permet de déterminer la distance de l'objet par rapport à la source. Plus l'objet sera loin plus il faudra longtemps pour que le signal revienne.

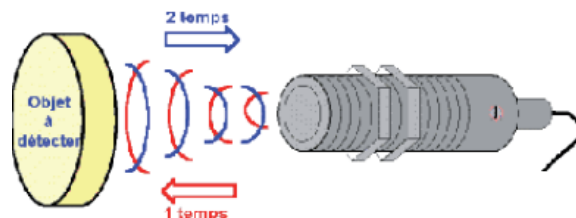


Figure VI.7 : Capteur à ultrasons

Caractéristiques

- Le capteur permet de détecter tout type de matériau sauf les objets absorbants les ondes sonores tel que la ouate, le feutre,...
- Le signal est transmis grâce à la présence de l'air, il faut donc éviter les courants d'air qui détourneraient le signal de leurs destinations.
- Aucun fonctionnement possible dans le vide.
- Le signal n'est pas influencé par la poussière et les environnements brumeux.
- Il faut éviter de détecter des objets dont l'angle d'inclinaison est trop grand car le signal risque de ne plus revenir, ce qui rendrait toute détection impossible.

6.1.8. Les capteurs optiques

Ces capteurs reposent sur l'émission et la réception d'un faisceau lumineux.

- **Système barrage** : Emetteur et récepteur sont séparés. Particulièrement adapté pour la détection des matériaux opaques, les environnements pollués (pluie, poussière...) et les longues distances.

Contrainte : détection de matériaux non transparents et nécessite d'un alignement rigoureux.

- **Système reflex** : Emetteur et récepteur sont dans le même boîtier. L'objet empêche le retour du faisceau lumineux. Adapté pour les applications où la détection n'est possible que d'un côté et les environnements relativement propres

Contrainte : Ne convient pas pour les objets réfléchissants.

- **système de proximité** : Emetteur et récepteur sont dans le même boîtier. L'objet permet le retour du faisceau lumineux. Adapté pour les applications où la détection n'est possible que d'un coté et les objets transparents et translucides.
- **Contrainte** : les portées dépendent de la capacité des objets à réfléchir la lumière et à éviter dans les environnements pollués.

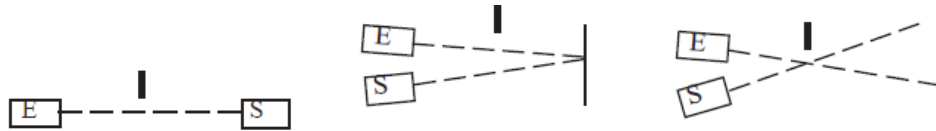


Figure VI.8 : Capteurs optiques

6.1.9. Les codeurs

Les codeurs sont des capteurs rotatifs, placés sur l'axe d'une pièce tournante qui restituent un code numérique en fonction de la position. Essentiellement deux types de codeurs sont disponibles.

6.1.9.1. Les codeurs absolus

Grâce à un circuit perforé associé à des capteurs optiques, il restitue, en parallèle ou en série, un code numérique qui spécifie l'angle de rotation de l'axe. Le nombre de bits détermine la précision de la mesure.

Par exemple : codeur 10bits donne 1024 positions soit une précision de $360/1024=0,35^\circ$



Figure VI.9 : Codeur absolu

6.1.9.2. Les codeurs incrémentaux

Ces codeurs fournissent 3 signaux logiques qui caractérisent la rotation angulaire :

- **A** : signal impulsionnel de n impulsions par tour (ou n caractérise la précision)
- **B** : signal impulsionnel de n impulsions par tour déphasé de 90° par rapport à A
- **top (ou z)** : signal actif une fois par tour lors du passage par le 0° . Ce signal dure $1/4$ de période du signal A

Le déphasage entre A et B permet de déterminer le sens de rotation. Dans un sens, lors du front montant de A, B est à "0", dans l'autre sens pendant le front montant de A, B est à "1".

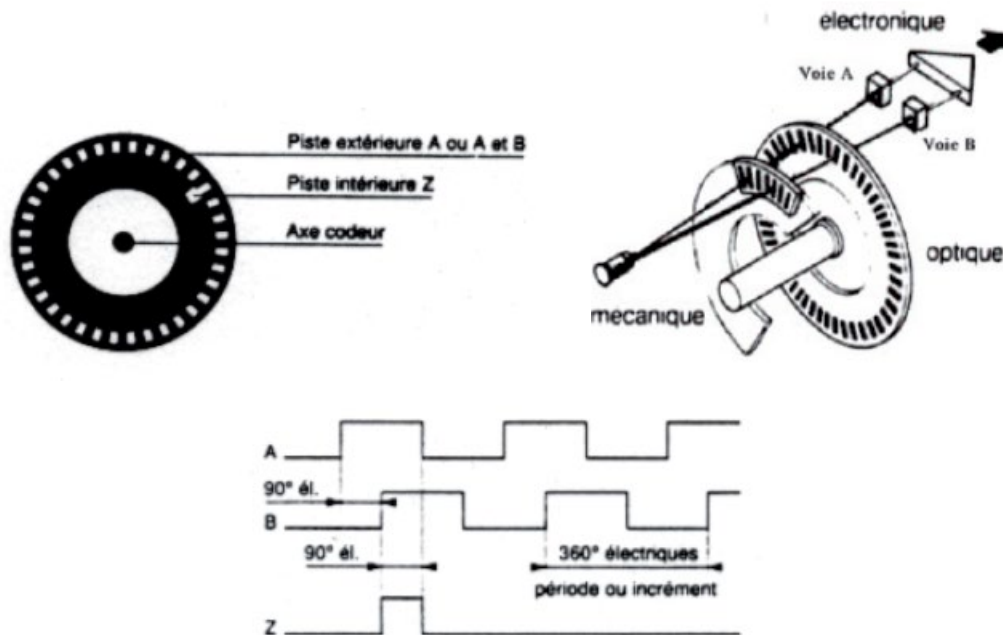


Figure VI.10 : Codeurs incrémentaux

6.2. Capteurs de vitesse

Les capteurs de vitesse portent également le nom plus industriel de tachymètres.

Le type de déplacement est soit rectiligne, soit angulaire ; la sortie est analogique ou numérique.

6.2.1. Tachymètres linéaires à fil

Ce type de capteur se présente sous l'aspect d'un boîtier muni à son extrémité d'un fil ou câble que l'on doit fixer à l'objet dont on veut mesurer la vitesse.

Ce câble s'enroule sur un tambour, muni d'un ressort de rappel, à l'intérieur du boîtier. Le tambour entraîne en rotation une génératrice tachymétrique. On mesure alors une vitesse angulaire.

Caractéristiques :

- Pas de source de tension extérieure
- Bonne fiabilité
- Précision moyenne
- Course moyenne

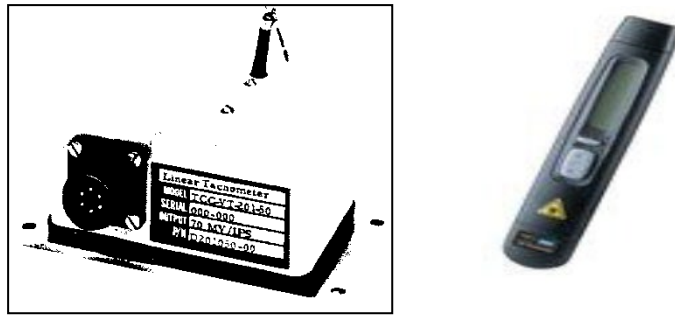


Figure VI.11 : Tachymètres de vitesse linéaire

6.2.2. Tachymètres électromagnétiques

Ce type de capteur comporte un noyau magnétique (aimant permanent) mobile dans une bobine fixe. L'aimant, entraîné par l'objet à mesurer, induit dans la bobine une tension proportionnelle à la vitesse de celui-ci.

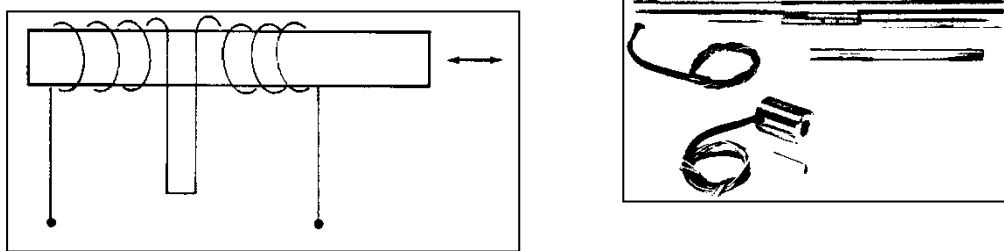


Figure VI.12 : Tachymètres électromagnétiques

Ils sont basés sur la loi de Faraday : $e = \frac{d\Phi}{dt}$ Ils peuvent être à courant continu (les plus courants) ou à courant alternatif (synchrone ou asynchrone).

6.2.2.1. Génératrice tachymétrie à courant continu

Le principe de fonctionnement est le même que celui d'une machine à courant continu. L'inducteur est le plus souvent un aimant permanent (pas d'alimentation) et l'induit (siège de la force électromotrice est un bobinage).

L'expression de la force électromotrice E en fonction de la vitesse N est : $E = k \cdot N$.

Ce procédé de mesure permet de détecter le sens de rotation. Si le courant prélevé est très faible, il n'y a pas de réaction magnétique d'induit et c'est une fonction quasi linéaire de la vitesse.

Pour ces capteurs, on rencontre trois types d'induits: le rotor bobiné (comme dans une machine à CC classique), le rotor en cloche (un fil bobiné sur un rotor creux tournant autour d'un noyau fixe) ou le rotor discoïdal (c'est est un disque sur lequel sont collés des fils). Ces capteurs sont anciens et sont remplacés par les tachymètres à courant alternatif.



Figure VI.13 : Tachymètre à courant continu

Caractéristiques :

- Large gamme d'étendue de mesure
- Donne le sens de rotation
- Niveau de signal élevé
- Bonne linéarité
- Bonne précision
- Haute fiabilité
- Usure au collecteur
- Pièce a vie limitée
- Risque de parasites de commutation

6.2.2.2. Génératrice tachymétrique à courant alternatif

Le tachymètre de courant alternatif peut être construit avec un enroulement fixe et un champ tournant des aimants permanents. Ils génèrent la tension et fréquence qui sont proportionnelles à la vitesse de rotation. Le principal intérêt est de ne pas avoir de collecteur et de balais. L'entretien est donc moindre et la durée de vie plus importante. Les deux types de machines sont utilisés (synchrone et asynchrone). Dans les deux cas, on ne connaît pas le sens de rotation sauf en triphasé où on peut le retrouver par l'ordre de succession des phases.



Pour les génératrices synchrones la valeur de la vitesse peut être obtenue à partir de :

- l'amplitude du signal prélevé sur la machine après redressement et filtrage.

- la fréquence des signaux prélevés sur la machine.

Pour les génératrices asynchrones, il faut une excitation extérieure sinusoïdale de fréquence fixe. La valeur de la vitesse est obtenue après redressement et filtrage.

Caractéristiques :

- Caractéristiques générales moyennes
- Bonne durée de vie
- Signal de sortie de plusieurs types
- Gamme d'étendue de mesure limitée
- Linéarité moyenne
- Circuits associés complexes
- Pas d'informations sur le sens de rotation

6.2.3. Capteurs à impulsions

Le corps d'épreuve est constitué d'un disque solidaire de l'arbre dont on veut mesurer la vitesse de rotation. La surface (ou la circonférence) de ce disque porte un certain nombre de repères disposés périodiquement (trou, fente, denture). A chaque passage de l'un de ces repères devant un détecteur approprié (détection de proximité), celui-ci délivre une impulsion électrique.

La fréquence du signal obtenu, en fonction de la vitesse de rotation N , est : $f = p \cdot N$

Caractéristiques :

- La simplicité
- La robustesse
- Immunité du signal aux bruits et parasites
- Facilité de la conversion et du traitement sous forme numérique
- Sensibilité à l'environnement (vibrations, poussières, températures, champs magnétiques, etc...) selon les types.
- Encombrement pour étendue de mesure élevée:

6.2.3.1. Capteur à réluctance variable

La variation de la réluctance par la variation du circuit magnétique (passage des dents) entraîne des variations de flux et donc l'apparition d'une force électromotrice sous forme impulsionnelle (succession d'impulsions positives et négatives). Plus la vitesse est grande, plus les variations de flux sont rapides. La force électromotrice est donc plus importante.

6.2.3.2. Capteur optique

Le principe est le même que celui des codeurs incrémentaux. Pour faire la mesure, une piste est suffisante. La différence est dans l'utilisation de l'information obtenue.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Techniques de l'ingénieur : R 2 515 : Mesure des températures
- Techniques de l'ingénieur : R 2 570 : Thermomètres à résistance métallique
- Techniques de l'ingénieur : R 2 520 : Étalonnage et vérification des thermomètres
- Techniques de l'ingénieur : R 2 590 : Couples thermoélectriques
- George Asch et Coll, « les capteurs en instrumentation industrielle », 6ème édition Dunod, 2006.
- Pascal Dassonville, « Les capteurs : 50 exercices et problèmes corrigés », Dunod, 2004.
- Georges Asch, Patrick Renard, Pierre Desqoutte, Zoubir Mammeri, Eric Chambérod, Jean Gunther, « Acquisition de données », 3ème édition, Dunod, 2011.
- Fèrid Bélaïd, « Introduction aux capteurs en instrumentation industrielle », Centre de Publication Universitaire 2006.
- J. P. Bentley, "Principles of measurement systems", Pearson education 2005.
- J. Niard et al, « Mesures électriques », Nathan, 1981.
- Ressources internet sur le fonctionnement des capteurs :
 - Site d'un professeur en BTS CIRA : <http://perso.club-internet.fr/gatt/>
 - Site sur les capteurs par ancien chercheur CNRS