**COURS DE**

**L’INSTRUMENTATION et capteur**



« 3 ANNEE LICENCE GENIE CHIMIQUE »



# CHAPITRE I

## Les capteurs

* 1. NOTIONS DE BASE

*la métrologie* :

C’est la science de la mesure.

Le mesurage :

C’est l’ensemble des opérations expérimentales dont le but est de déterminer la valeur numérique d’une grandeur.

Le mesurande :

C’est la grandeur physique particulière qui fait l’objet du mesurage.

L’incertitude :

Le résultat de la mesure x d’une grandeur X ne peut pas être entièrement défini par un seul nombre. Il faut le caractériser par un couple (x, dx) où dx représente l’incertitude sur x due aux différentes erreurs liées au mesurage: x  dx  X  x  dx .

L’erreur absolue :

C’est la différence entre la vraie valeur du mesurande et sa valeur mesurée. *Elle s’exprime en unité de la mesure*.

L’erreur relative :

C’est le rapport de l’erreur absolue au résultat du mesurage. *Elle s’exprime en pourcentage de la grandeur mesurée.*

* + 1. Le système d’unités internationales (SI) et ses symboles

Le système d’unités internationales comporte 7 unités de base indépendantes du point de vue dimensionnel, des unités dérivées et des unités complémentaires. Les grandeurs les plus fréquemment utilisées, ainsi que leurs unités sont présentées dans le tableau suivant.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Unités de base | | |
| **Grandeur** | **Unité (SI)** | **Symbole** |
| Longueur (notée l) | mètre | m |
| Masse (notée m) | Kilogramme | kg |
| Temps (noté t) | seconde | s |
| Courant électrique (noté i) | Ampère (André Marie Ampère, 1775-1836) | A |
| Température (notée T) | Kelvin (Lord Kelvin, Angleterre, 1824-1907) | K |
| Quantité de matière | mole | mol |
| Intensité lumineuse (notée I) | la candela | cd |
| Unités dérivées | | |
| **Grandeur** | **Unité (SI)** | **Symbole** |
| Aire (notée A ou S) | mètre carré | m² |
| Volume (noté V) | mètre cube | m3 |
| Fréquence (notée f) | Hertz (Heinrich Hertz, Allemagne, 1857-1894) | Hz |
| Vitesse (notée v) | mètre par seconde | m/s |
| Force (notée F) | Newton (Issac Newton, Angleterre, 1642-1727) | N |
| Moment d’une force (noté *M*) | mètre - Newton | mN |
| Moment d’un couple (noté *T*) | mètre - Newton | mN |
| Viscosité dynamique (notée ) | poiseuille | Pi |
| Tension électrique (notée U) | Volt (Alexandro Volta, Italie, 1745-1827) | V |
| Force électromotrice (notée E) | Volt | V |
| Résistance électrique (notée R) | Ohm (Georges Ohm, Allemagne, 1789-1854) |  |
| Réactance (notée X) | Ohm |  |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Impédance (notée Z) | Ohm |  |
| Résistivité (notée ) | Ohm-mètre | m |
| Capacité électrique (notée C) | Farad (Michael Faraday, Angleterre, 1791-1867) | F |
| Perméabilité électrique (notée ) | Henry par mètre | H/m |
| Flux lumineux | lumen | lm |
| Eclairement lumineux | lux | lx |
| Longueur d’onde (notée ) | mètre | m |
| Vitesse angulaire (notée ) | radian par seconde | rad/s |
| Accélération (notée g) | mètre par seconde² | m/s² |
| Accélération angulaire (notée ) | radian par seconde² | rad/s² |
| Energie, Travail (noté W) | Joule (James Joule, Angleterre, 1818-1889) | J |
| Puissance (notée P) | Watt (James watt, Ecosse, 1736-1819) | Watt |
| Puissance apparente (notée S) | Volt-Ampère | VA |
| Puissance réactive (notée q) | Volt-Ampère-Réactif | VAR |
| Pression (notée P) | Pascal (Blaise Pascal, France, 1623-1662) | Pa |
| Quantité d’électricité (notée Q) | Coulomb (Charles Coulomb, France, 1736-1806) | C |
| Inductance (notée L) | Henry (Joseph Henry, Etats-Unis, 1797-1878) | H |
| Champ magnétique (noté H) | Ampère par mètre | A/m |
| Induction magnétique (notée B) | Tesla (Nicolas Tesla, Yougoslavie, 1857-1943) | T |
| Flux d’induction magnétique (noté ) | Weber (Wilhelm Weber, Allemagne, 1816-1892) | Wb |
| Unités complémentaires | | |
| **Grandeur** | **Unité (SI)** | **Symbole** |
| Angle plan | radian | rad |
| Angle solide | stéradian | Sr |

* + 1. Les multiples et les sous-multiples des unités

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Multiples | | |
| **Multiple** | **Préfixe** | **Symbole** |
| 1024 | yotta | Y |
| 1021 | zetta | Z |
| 1018 | exa | E |
| 1015 | peta | P |
| 1012 | téra | T |
| 109 | giga | G |
| 106 | méga | M |
| 103 | kilo | k |
| 102 | hecto | h |
| 10 | déca | da |
| Sous-multiples | | |
| **Multiple** | **Préfixe** | **Symbole** |
| 10-1 | déci | d |
| 10-2 | centi | e |
| 10-3 | milli | m |
| 10-6 | micro |  |
| 10-9 | nano | n |
| 10-12 | pico | p |
| 10-15 | femto | f |
| 10-18 | atto | a |
| 10-21 | zepto | z |
| 10-24 | yocto | y |

* + 1. Liens entre les unités SI et les unités anglo-saxonnes Distance :
       - pouce (inch) : 1 in = 2.54 cm
       - pied (foot) : 1 ft = 12 in = 30.48 cm
       - mile (miles) : 1 mile = 5280 ft = 1.609 km

Volume :

* + - * pinte (pint) : 1 pint = 0.94 l
      * gallon (US gallon) : 1 US gal = 4 pintes = 3.786 l
      * baril (US barel): 1 bbi = 42 USgal = 159 l

Masse :

* + - * once (ounce) : 1 oz = 28.35 g
      * livre (pound) : 1 lb = 0.454 kg

Puissance :

* + - * cheval vapeur (horsepower) : 1 hp = 0.736 kW
  1. CLASSIFICATION DES CAPTEURS

Un capteur est un dispositif qui produit, à partir d’une grandeur physique, une grandeur électrique utilisable à des fins de mesure ou de commande. Cette grandeur électrique (tension ou courant) doit être une représentation aussi exacte que possible du mesurande considéré. On distingue les capteurs actifs et les capteurs passifs.

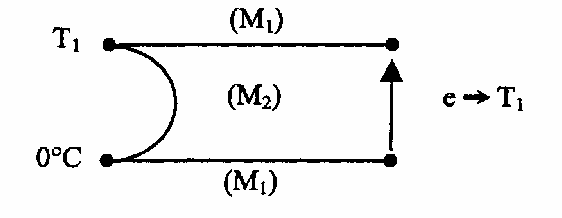
* + 1. Les capteurs actifs

Ils se comportent comme des générateurs. Ils sont basés sur un effet physique qui permet de transformer l’énergie du mesurande (énergie mécanique, thermique ou de rayonnement), en énergie électrique. La réponse en sortie d’un capteur actif peut être un courant, une tension ou une charge. Parmi ces effets, les plus importants sont :

##### L’effet thermoélectrique :

Un circuit formé de deux conducteurs de nature chimique différente, dont les jonctions sont à des températures T1 et T2, est le siège d’une force électromotrice e = f(T1,T2).

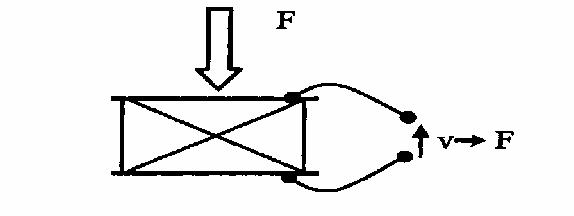
*Exemple d’application :* la mesure de e permet de déterminer une température inconnue T1, lorsque la température T2 est connue (principe du thermocouple).



##### L’effet piezo-électrique :

L’application d’une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézo- électriques (le quartz par exemple) entraîne une déformation qui provoque l’apparition de charges électriques égales et de signes contraires sur les faces opposées du matériau.

*Exemple d’application :* la mesure de force, de pression ou d’accélération à partir de la tension que provoquent aux bornes d’un condensateur associé à l’élément piézo-électrique les variations de sa charge.



##### L’effet photo-électrique :

Un rayonnement lumineux ou plus généralement une onde électromagnétique dont la longueur d’onde est inférieure à une valeur seuil, caractéristique du matériau considéré, provoquent la libération de charges électriques dans la matière.

*Exemple d’application :* la mesure de la tension de sortie permet de déterminer le flux par rayonnement.

##### L’effet pyro-électrique :

Les cristaux pyro-électriques (le sulfate de triglycine par exemple) ont une polarisation électrique spontanée qui dépend de leur température, ils portent en surface des charges électriques proportionnelles à cette polarisation et de signes contraires sur leurs faces opposées.

*Exemple d’application :* la mesure de la charge aux bornes d’un condensateur associé à un cristal pyro-électrique permet de déterminer le flux lumineux auquel il est soumis.

##### L’effet d’induction électromagnétique :

Lorsqu’un conducteur se déplace dans un champ d’induction fixe, il est le siège d’une force électro-motrice proportionnelle à sa vitesse de déplacement. Ainsi, lorsqu’un circuit électrique est soumis à un flux d’induction variable du à son déplacement ou à celui de la source de l’induction (par exemple, un aimant), la

f.e.m dont il est le siège est de valeur égale et de signe opposé à la vitesse de variation du flux d’induction.

*Exemple d’application :* la mesure de la f.e.m d’induction permet de connaître la vitesse du déplacement qui en est l’origine.

##### L’effet Hall :

Lorsqu’un matériau est parcouru par un courant I et soumis à un champ B formant un angle  avec le courant, il apparaît une tension de Hall VH dans une direction qui leur est perpendiculaire ( VH  KH .I.B.sin  , où KH est une constante qui dépend du matériau considéré).

*Exemple d’application :* la mesure de la tension VH permet de déterminer la position d’un objet qui est lié à un aimant.

##### L’effet photovoltaïque :

Un rayonnement lumineux sur l’assemblage de semi-conducteurs de types opposés P et N provoque la libération d’électrons (charges négatives) et de trous (charges positives) au voisinage de la jonction illuminée. Leur déplacement dans le champ électrique de la jonction modifie la tension à ses bornes.

*Exemple d’application :* la mesure de la tension de sortie permet de déterminer le flux par rayonnement.

Les principes physiques de base et les modes d’application de ces effets sont regroupés dans le tableau suivant :

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Grandeur physique à mesurer** | **Effet utilisé** | **Grandeur de sortie** |
| Température | Thermo-électrique | Tension |
| Flux par rayonnement | Photo-électrique | Tension |
| Photovoltaïque | Tension |
| Pyro-électrique | Charge |
| Force | Piézo-électrique | Charge |
| Pression | Piézo-électrique | Charge |
| Accélération | Piézo-électrique | Charge |
| Vitesse | Induction électromagnétique | Tension |
| Position | Hall | Tension |

* + 1. Les capteurs passifs

Les capteurs passifs sont des impédances intégrées dans un circuit électrique (conditionneur), dont l’un des paramètres déterminants est sensible au mesurande. La variation d’impédance résulte de l’effet de la grandeur à mesurer sur :

* + - * Soit les caractéristiques géométriques ou dimensionnelles qui peuvent varier si le capteur comporte un élément mobile ou déformable. Dans le premier cas, à chaque position de l’élément mobile correspond une valeur de l’impédance dont la mesure permet de connaître la position (principe des capteurs de déplacement ou de position tel que le potentiomètre). Dans le second cas, la déformation appliquée au capteur entraîne une modification de l’impédance (principe des capteurs de déformation tels que les jauges de contraintes).
      * Soit les propriétés électriques des matériaux (résistivité , perméabilité magnétique , constante diélectrique ), qui peuvent être sensibles à différentes grandeurs physiques (température, humidité, éclairement …). Si on fait varier une de ces grandeurs en maintenant les autres constantes, il s’établit une relation entre la valeur de cette grandeur et celle de l’impédance du capteur. La courbe d’étalonnage traduit cette relation et permet, à partir de la mesure de l’impédance, de déduire la valeur de la grandeur physique variable, qui est en fait le mesurande. Le tableau présente un aperçu des principaux mesurandes permettant de modifier les propriétés électriques des matériaux utilisés pour la fabrication des capteurs passifs.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Mesurande** | **Type de matériaux utilisés** | **Caractéristique électrique sensible** |
| Température | Métaux, Semi-conducteurs | Résistivité |
| Flux par rayonnement | Semi-conducteurs | Résistivité |
| Déformation | Alliages de nickel | Résistivité |
| Alliages ferromagnétiques | Perméabilité magnétique |
| Position | Matériaux magnéto-résistants | Résistivité |
| Humidité | Chlorure de Lithium | Résistivité |
| Polymères | Constante diélectrique |
| Niveau | Liquides isolants | Constante diélectrique |

* + 1. Les grandeurs d’influence

En raison des conditions d’utilisation, le capteur peut se trouver soumis non seulement à l’influence du mesurande, mais également à d’autres grandeurs physiques qui peuvent entraîner une variation de la grandeur électrique de sortie qu’il n’est pas possible de distinguer de l’action du mesurande. Ces grandeurs physiques « parasites » auxquelles la réponse du capteur peut être sensible représentent les grandeurs d’influence, dont les plus importantes sont :

* + - * La température qui modifie les caractéristiques électriques, mécaniques et dimensionnelles des composants du capteur.
      * La pression, l’accélération et les vibrations qui peuvent provoquer des déformations et des contraintes qui altèrent la réponse du capteur.
      * L’humidité qui peut modifier certaines propriétés électriques du capteur et qui peut dégrader l’isolation électrique entre ses composants ou entre le capteur et son environnement.
      * Les champs magnétiques qui peuvent créer des f.e.m d’induction qui se superposent au signal utile.
      * La tension d’alimentation dont la variation de l’amplitude ou de la fréquence peut perturber la grandeur électrique de sortie du capteur.
      * La lumière ambiante qui peut s’ajouter au flux lumineux à mesurer.

Afin de pouvoir déduire de la valeur mesurée, les valeurs correspondant à ces grandeurs parasites, il faut :

* + - * Réduire l’importance des grandeurs d’influence au niveau du capteur en le protégeant par un isolement adéquat.
      * Stabiliser les grandeurs d’influence à des valeurs parfaitement connues et étalonner le capteur dans ces conditions de fonctionnement.
      * Utiliser éventuellement des montages électriques permettant de compenser l’influence de ces grandeurs, comme par exemple un pont de Wheatstone avec un capteur identique placé dans une branche adjacente au capteur.
  1. LA CHAINE DE MESURE

La chaîne de mesure est constituée d’un ensemble de dispositifs (y compris le capteur), permettant de déterminer, de la manière la plus précise que possible, la valeur du mesurande considéré.

A l’entrée de la chaîne de mesure, le capteur, soumis à l’action du mesurande, permet (de manière directe s’il est actif ou par le moyen de son conditionneur s’il est passif), d’injecter dans la chaîne le signal électrique qui est le support de l’information liée au mesurande.

A la sortie de la chaîne de mesure, les informations sont délivrées sous une forme appropriée à leur exploitation.

Sous sa forme la plus simple, la chaîne de mesure peut se réduire au capteur et à son conditionneur éventuel, associé à un appareil de lecture (par exemple, un thermocouple et un voltmètre). Mais de nos jours, compte tenu des possibilités importantes offertes par l’électronique et l’informatique, la quasi-totalité des chaînes de mesure sont des chaînes électroniques.

Dans sa structure de base, une chaîne de mesure doit pouvoir assurer, au moyen de dispositifs appropriés, les fonctions suivantes :

Grandeur à mesurer

Capteur

Conditionneurs du signal

Unité de visualisation et/ou d’exploitation

* L’extraction de l’information et la traduction de la grandeur physique à mesurer en signal électrique par le capteur.
* Le conditionnement du signal afin d’éviter sa dégradation par le bruit ou par des signaux parasites : amplification, filtrage.
* La conversion du signal sous forme numérique adaptée au calculateur chargé de l’exploiter :échantillonneur bloqueur, convertisseur analogique-digital.
* La visualisation et/ou l’utilisation des informations recueillies afin de lire la valeur de la grandeur mesurée et/ou de l’exploiter dans le cas d’un asservissement : microprocesseur, microcontrôleur.

# Chapitre II :

## Les capteurs de température

II.1TH ERMOMETRE A DELATATION

La température est une grandeur différente des autres grandeurs physiques (longueur, masse, …) qui sont des grandeurs extensives qu’on peut définir numériquement par rapport à une grandeur de même nature prise comme référence. La température est une grandeur intensive, multiplier ou diviser une température n’a pas, à priori, de signification physique évidente.

La température est une grandeur abstraite, elle définie est définie en termes de changement de comportement des matériaux lorsqu’ils sont soumis à un changement de température. Du nombre important de propriétés de la matière et de phénomènes physiques sensibles à la température, résulte une grande diversité de méthodes de mesure de la température.

Dans ce chapitre, c’est la dilatation des corps sous l’effet de l’augmentation de la température qui sera l’image de la grandeur thermométrique. La dilatation étant un phénomène réversible, elle fournit un mode pratique de mesure des températures. Ce phénomène se retrouve de manière analogue, mais avec une ampleur différente pour les liquides, les gaz et les solides. D’où les trois types de thermomètres à dilatation qui font l’objet de ce chapitre.

* 1. 1.1LE THERMOMETRE A DILATATION DE LIQUIDE
     1. Description

Il est constitué d’un réservoir surmonté d’un capillaire de section faible et régulière (l’ordre de grandeur est de 0.2 mm) se terminant par une ampoule de sécurité. Il est réalisé en verre. Sous l’effet des variations de température, le liquide se dilate de manière plus ou moins importante. Son niveau est repéré à l’aide d’une échelle thermométrique gravée sur l’enveloppe.

* + 1. 1.2.Loi de variation

La loi de variation du volume du liquide en fonction de la température s’écrit :

V  V0 1  aT

avec :

* + - * V0 le volume du liquide à 0°C
      * V le volume du liquide à T(°C)
      * a le coefficient de dilatation du liquide (°C-1)
    1. Liquides thermométriques

Le liquide le plus utilisé est le mercure mais d’autres liquides sont quelquefois employés :

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Liquide** | **Domaine d’emploi (°C)** | **a (°C-1)** |
| Pentane | -200 à +20 | - |
| Alcool éthylique | -110 à +100 | 1.17 |
| Toluène | -90 à +100 | 1.03 |
| Mercure | -38 à +650 | 0.182 |

L’espace libre au dessus du liquide peut être vide mais pour empêcher la colonne de liquide de se fractionner facilement et pour permettre la mesure des hautes températures, l’espace libre est rempli d’un gaz neutre (azote ou argon) et mis sous une pression fonction de la température à mesurer. Par exemple, pour un thermomètre à mercure prévu pour mesurer une température de 600°C, la pression de l’azote est de 20 bars. La chambre d’expansion évite les trop fortes variations de pression.

* + 1. Nature de l’enveloppe

Le matériau constituant l’enveloppe du thermomètre dépend de la température à mesurer :

* + - * jusqu’à 450°C : verre d’Iena
      * jusqu’à 630°C : verre Supremax
      * jusqu’à 1000°C : silice pure fondue

.

Si on note v le volume correspondant à une graduation, le volume V à la température ambiante T a pour expression :

V  (h  n)v

Ces thermomètres sont très simples à utiliser, ils peuvent être également précis mais ils présentent deux inconvénients, leur temps de réponse est élevé et ils sont à lecture directe, ce qui nécessite la présence d’un opérateur pour réaliser les mesures. Ils ne sont pas adaptés à l’enregistrement et à l’acquisition de données et ne peuvent pas être utilisés pour des mesures sur une longue période de temps ou pour de la régulation. Ce dernier inconvénient est commun à tous les thermomètres à dilatation.

* 1. 1.2.LE THERMOMETRE A DILATATION DE GAZ
     1. Principe

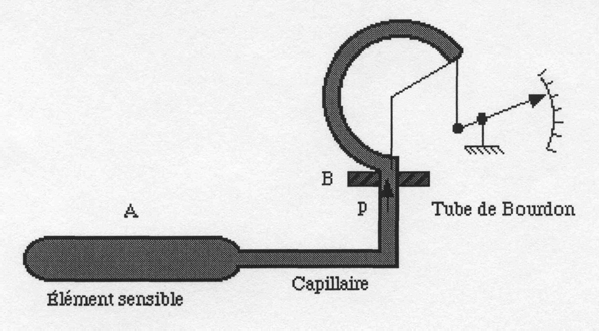
L’équation d’un gaz parfait s’écrit : PV  nRT , avec :

* + - * P la pression (Pa)
      * T la température (K)
      * R la constante des gaz parfaits (8.31 J.mol-1.K-1)
      * n le nombre de moles

Si on enferme une certaine quantité de gaz dans une enveloppe de volume constant V, la pression développé par le gaz est proportionnel à la température, c’est le principe sur lequel repose le thermomètre à dilatation de gaz.

* + 1. Description

De manière schématisée, un thermomètre à gaz est composé d’une sonde A qui représente l’enveloppe dans laquelle est enfermé le gaz thermométrique. Cette sonde est reliée par un tube de raccordement de faible section à l’extrémité B fixe d’un tube de Bourdon, appelé également spirale de mesure. La longueur du tube de raccordement ne doit pas dépasser 100 m.



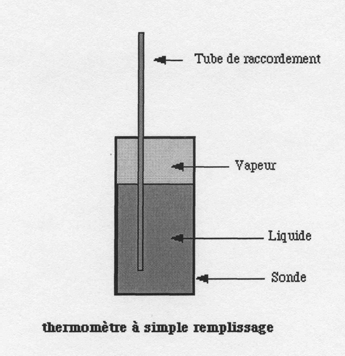
Sous l’effet de la variation de la température du milieu dans lequel est placée la sonde, la pression du gaz varie, ce qui modifie l’extrémité libre du tube de Bourdon. Cette variation de pression se traduit par un mouvement de rotation de l’index indicateur qui se déplace devant un cadran portant des graduations thermométriques. Les gaz les plus employés sont l’hélium, l’hydrogène, l’azote et le gaz carbonique.

L’avantage des thermomètres à gaz est leur précision, qui est de l’ordre de 1% en mesures industrielles. Ils sont très adaptés pour mesurer les très basses températures (jusqu’à -268°C pour l’hélium et -240°C pour l’hydrogène). Certains de ces thermomètres sont de véritables instruments de précision auxquels on a recours pour les déterminations des températures de référence, tels que le thermomètre à hydrogène. Leur principal inconvénient est que la dimension de la sonde est d’assez grande dimension.

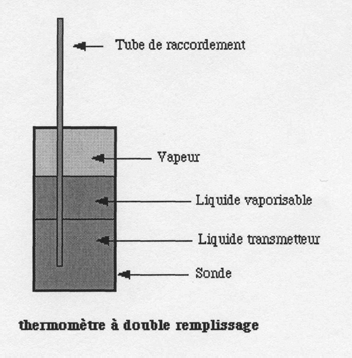
* 1. 1.3.LE THERMOMETRE A TENSION DE VAPEUR
     1. Principe

On appelle tension de vapeur d’un liquide pur, la pression sous laquelle ce liquide est en équilibre avec sa vapeur saturante. Pour un liquide donné, la tension de vapeur n’est fonction que de la température. La mesure de la tension de vapeur d’un liquide permet donc de connaître sa température, la mesure thermométrique se fait donc par l’intermédiaire d’une mesure de pression.

La réalisation la plus simple est celle du thermomètre à simple remplissage présenté sur la figure ci-dessous. L’élément sensible est une sonde analogue à celle du thermomètre à gaz mais le tube de raccordement est plongé dans la sonde. La sonde, le tube de raccordement et l’élément de mesure sont remplis de liquide vaporisable. Lorsque la sonde est placée dans une enceinte chaude, une partie du liquide se vaporise. Un équilibre liquide/vapeur, fonction de la température, s’établit. En même temps, la pression augmente pour se fixer à la valeur de la tension de vapeur du liquide. Cette pression est transmise par le liquide à un manomètre de mesure.



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



L’avantage de ces thermomètres est qu’ils sont très sensibles, l’inconvénient est que la position de la sonde par rapport au capteur peut influencer la mesure.

* + 1. Liquides de remplissage et domaines d’utilisation

Ils sont rassemblés dans le tableau suivant :

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

* 1. 1.4.LE THERMOMETRE A DILATATION DE SOLIDE
     1. Principe

Lorsqu’une tige métallique est soumise à une variation de température, sa longueur

varie. Cette loi de variation s’écrit sous la forme : L  L0 1  T , avec :

* + - * L la longueur de la tige à la température T (°C)
      * L0

la longueur de la tige à 0°C

* + - *  le coefficient de dilatation linéaire du métal (°C-1)

La dilatation linéaire du métal peut donc servir de grandeur thermométrique, c’est le principe sur lequel reposent les thermomètres à dilatation de solide. Les métaux les plus utilisés sont le platine (  =9.10-6 °C-1), le Zinc (  =30.10-6 °C-1) et l’Invar qui est un alliage de Fer et de Nickel (  =2.10-6 °C-1).

### II.2. LES THERMOMETRES ELECTRIQUES

Les thermomètres électriques présentent l’avantage d’une grande souplesse d’emploi et d’exploitation (le signal électrique délivré est transmissible et enregistrable), tout en étant suffisamment précis, aussi bien pour des utilisations industrielles qu’en laboratoire.

Leur fonctionnement est basé sur la variation de la résistance d’un métal ou d’un semi- conducteur en fonction de la température. Les lois de variation étant très régulières, il est possible de les utiliser pour déterminer les températures par des mesures de résistance. Cependant, ces lois étant très différentes selon qu’il s’agisse d’un métal ou d’un semi-conducteur, deux types de capteurs ont été distingués selon les appellations respectives de thermomètre à résistance (*Resistance Temperature Detector RTD*) d’une part, et de thermistance (*Thermistor*) d’autre part.

* 1. 2.1 LES THERMOMETRES A RESISTANCE
     1. Principe

La résistance électrique d’un conducteur métallique augmente avec la température. Cette variation étant parfaitement réversible, on peut établir une relation R=f(T) entre la résistance R et la température T(°C) sous la forme :

R  R 1  aT  bT2  cT3 

0

avec :

* R0 la résistance à 0°C
* a, b et c des coefficients de température positifs, spécifiques au métal considéré.

Les coefficients a, b et c de la loi de variation de R ayant été préalablement déterminés par un ensemble de mesures à températures connues, la mesure de R permet de déduire la température.

Pour de petites variations T autour de la température T, la loi de variation de la température peut être linéarisée :

En écrivant dR  R(T  T)  R(T) , on obtient R(T  T)  R(T).1  T



dT T R

avec R 

1 dR R(T) dT

la **sensibilité thermique du capteur** à la température T.

* + 1. Critères de choix du métal

Selon le domaine d’application et les qualités particulières recherchées, les résistances sont réalisées en platine, en nickel, et plus rarement en cuivre ou en tungstène :

* + - * Le platine peut être obtenu avec une très grande pureté (99.999%), ce qui lui confère des propriétés mécaniques et électriques très stables.
      * Le nickel possède une sensibilité thermique élevée mais ses propriétés électriques et mécaniques beaucoup moins stables limitent son utilisation à des températures inférieures à 250°C.
      * L’avantage du cuivre est la linéarité de la loi de variation de la résistance, mais il ne peut pas être employé au delà de 180°C pour des raisons de stabilité.
      * La sensibilité thermique du tungstène est supérieure à celle du platine au dessus de 100K et il est utilisable à des températures plus élevées que le platine avec une linéarité supérieure, mais sa stabilité est inférieure à celle du platine.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Métal | Résistivité à 0°C (.cm) | Point de fusion (°C) | Domaine d’application |
| Cuivre | 7 | 1083 | -190 à +150°C |
| Nickel | 6.38 | 1453 | -60 à +180°C |
| Platine | 9.81 | 1769 | -250 à +1100°C |
| Tungstène | 1.72 | 3380 | -269 à +27°C |

Le matériau le plus utilisé est le platine,qui est généralement encapsulé avec de la céramique et placé dans une gaine d’acier étanche. La résistance est de 100 à 0°C, ces thermomètres sont donc généralement appelés des sondes Pt 100.

* 1. 2.2. LES THERMISTANCES
     1. Principe

Les thermistances sont des capteurs de température dont la sensibilité thermique est très élevée,de l’ordre de 10 fois celle des capteurs à résistance. Leurs coefficients de température sont généralement négatifs et dépendent fortement de la température.

Elles sont constitués à partir de mélanges d’oxydes métalliques semi-conducteurs tels que les oxydes de Nickel, de Cobalt ou de Manganèse. Contrairement aux métaux, la résistance des semi-conducteurs diminue lorsque la température augmente.

Les thermistances sont disponibles sous des formes variées : disques, petits cylindres, anneaux, perles, l’élément sensible pouvant être ou non protégé par enrobage ou encapsulage. Les valeurs élevées de la résistivité des matériaux employés permettent d’obtenir des résistances de valeurs appropriées avec de faibles quantités de matière et donc des dimensions réduites (de l’ordre du mm). Il en résulte un faible encombrement permettant la mesure quasi-ponctuelle de la température.

### II.3. LES THERMOCOUPLES

* 1. PRINCIPE

Un thermocouple constitué de deux conducteurs A et B de nature différente, dont les jonctions sont à des températures T1 et T2 délivre une f.e.m V0 qui dépend d’une part de la nature de A et B, et d’autre part des températures des deux jonctions. En général, la température de l’une des jonctions est fixe, connue et sert de référence (T1=Tref), tandis que l’autre jonction est placée dans le milieu dont on cherche à mesurer la température. La jonction à la température T1 est également appelée soudure froide et celle à la température T2 soudure chaude.

**Conducteur A**

T1 T2

**V0**

**Conducteur B**

* 1. LES EFFETS THERMOELECTRIQUES

Le fonctionnement des thermocouples est basé sur plusieurs phénomènes thermo- électriques.

* + 1. L’effet Peltier

T T



**B**

**N**

**M**

**A**

T

A / B

P

A la jonction de deux conducteurs A et B différents mais à la même température T, s’établit une différence de potentiel qui ne dépend que de la nature des conducteurs et de leur température, c’est la f.e.m de Peltier :

V  V  PT

M N A / B

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

V  V  PT

M N A / B

* + 1. L’effet Thomson

TM TN



**M**

**A**

**N**

TM TN

A

*T*

Entre deux points M et N de températures différentes TM et TN qui se trouvent à l’intérieur d’un conducteur A homogène, s’établit une force électromotrice, qui ne dépend que la nature du conducteur et des températures TM et TN, c’est la f.e.m de Thomson :

*T* TMTN 

A

TM

 hAdT TN

# CHAPITRE III

#### MESURE DES DEBTS ,**DES VITESSES ET DES PRESSIONS**

* 1. Mesure de débit:
     1. **Le Débit :**

Le débit, c'est la quantité de fluide qui s'écoule ou qui est fournie par unité de temps. Exemple : Le débit d'un cours d'eau, d'une pompe, d’une vanne...

Il existe deux types de débits, le **débit massique *Qm*** (kg/s) et le **débit volumique *Qv***

**(**m3/s). Ils sont reliés par [5] :

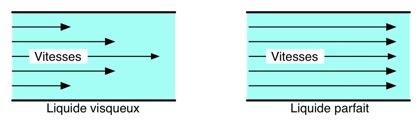
*Q* (*kg* / *s*)  **(*kg* / *m*3 ) *Q* (*m*3 / *s*)

*v*

*m*

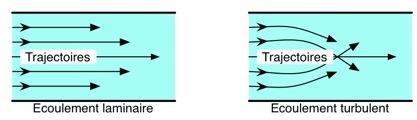
* + 1. Régime laminaire et régime turbulent :

***La Viscosité*** : C'est la résistance d'un fluide à son écoulement uniforme et sans turbulence. En fonction de la viscosité du fluide, la répartition de la vitesse du fluide n'est pas la même sur toute la surface.



.

***Le régime laminaire*** d'un fluide s'effectue par glissement des couches de fluide les unes sur les autres sans échange de particules entre elles, par opposition au régime turbulent.



**Fig III.2** – Ecoulement laminaire ou turbulent.

Dans le cas d'un écoulement incompressible et isotherme, le nombre de Reynolds suffit pour déterminer le type d'écoulement :

*R*  *V* (*m* / *s*) *Q*(*m*)

*e *(*m*2 / *s*)

*V* : vitesse du fluide en *m/s.*

*L* : longueur caractéristique de la canalisation en *m.*

*υ* : la viscosité cinématique du fluide en *m2/s.*

La viscosité cinématique est égale à la viscosité dynamique divisée par la masse volumique.

**  **

**

*µ* : viscosité dynamique en kg/ms ou N/m2s ou Pas.

*ρ* : masse volumique en kg/s.

Un écoulement est **turbulent** pour Re > 2 300. Dans le cas contraire, l'écoulement et laminaire.

* + 1. La Vitesse :

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

*Q*(*m*3 / *s*)  *V* (*m* / *s*) *S* (*m*2 )

Avec :

*Q* : le débit du fluide, *V :* la vitesse du fluide et *S :* la section de la canalisation.

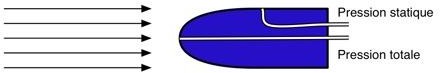
* 1. Débitmètres Volumiques :

Pour un écoulement laminaire (figure III.2), la connaissance de la vitesse du fluide et de la section de la canalisation suffit pour déterminer le débit du fluide (figure III.3).

Lors de la mise en place de ces capteurs, on s'attachera à les placer dans des parties droites de la canalisation et à une distance respectable (en général plusieurs fois le

diamètre de la canalisation) de dispositif générant des pertes de charges importantes (coude, restriction, vannes, etc...).

* + 1. Débitmètre à Tube de Pitot :



**Fig III.3** – Tube de Pitot [5]

Dans un tube de Pitot (figure III.3), la mesure des pressions statique et totale permet de connaître la vitesse du fluide.

*V* (*m* / *s*) 

2(*Ptotal*(*Pa*)  *Pstatique*(*Pa*)

**(*kg* / *m*3 )

* + 1. Débitmètres à Organe Déprimogène :

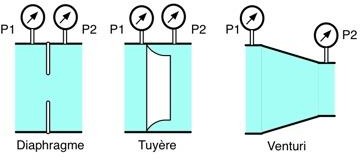
Un resserrement de la conduite ou un changement de direction créent entre amont et aval une différence de pression ΔP liée au débit par une relation de la forme :

*Q* (*m*3 / *s*)  *k*(*m*2 )

*P*(*Pa*)

**(*kg* / *m*3 )

*v*

Avec *ρ* : est la masse volumique du fluide et *k* une constante fonction de l'organe. Cette équation est vérifiée dans une certaine gamme du nombre de Reynolds. Les principaux organes déprimogènes sont représentes sur la ﬁgure III.4 :

**Fig III.4** – Les différents organes déprimogènes [5]

Le diaphragme est l'organe déprimogène le plus utilisé.

* + - 1. Caractéristiques métrologiques :

Ces dispositifs permettent des mesures dans une très large gamme de mesure ; d'une fraction de m3/h à 105 m3/h. Les mesures sont approximativement de classe 1.

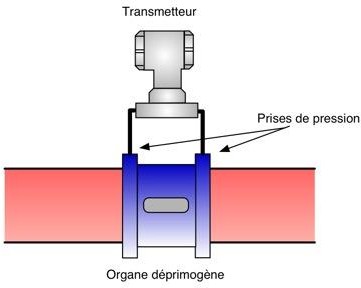
Ces dispositifs entraînent des pertes de charges non négligeables, elles sont fonction du *β=d/D*, le rapport entre le petit et le grand diamètre de l'organe utilisé

* + - 1. Montage du transmetteur de pression différentielle :

Pour mesurer le débit à l’aide d’un organe deprimogene, on utilise un transmetteur de pression diﬀérentielle (voir montage ﬁg III.6). En réglant le transmetteur de pression conformément au tableau 1.

|  |  |
| --- | --- |
| Unité physique primaire | kPa |
| Valeur basse étendue de mesure en unité physique primaire Valeur haute étendue de mesure en unité physique primaire | 0  50 |
| Unité physique secondaire | m3/h |
| Valeur basse étendue de mesure en unité physique primaire | 0 |
| Valeur haute étendue de mesure en unité physique primaire | 20 |
| Type de sortie | directe |
| Fonction de sortie | racine |

**Tableau III.1** - Exemple de réglage d’un transmetteur de pression intelligent [5]



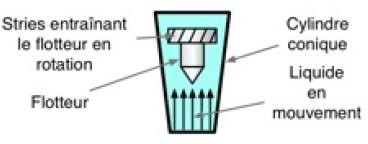
**Fig III.6** – Montage du transmetteur de pression différentielle [5]

En réglant le transmetteur de pression, on réalise alors les relations entre les grandeurs physiques représentées sur la figure.



Fig III.7 – Relation entre les grandeurs physiques d’une mesure de débit par organe déprimogéne [5].

* + 1. Débitmètre à Ludion:



**Fig III.8** – Débitmètre à ludion [5]

Un flotteur tiens en équilibre dans une canalisation conique (fig III.8). Quand le flotteur est en équilibre on peut écrire (équation d’´equilibre) :

*SCxU* 2

2*g*

*SCx*

(*M*  *V* )

*Mg*  *Vg*  **

 *U* 

2

*ρ*: la masse du fluide

*g* : l'accélération de la pesanteur

*Cx* : coefficient de trainée du flotteur selon l’axe x

*S* : le maître couple (sa surface projetée sur le plan yz) en m2

*U* : la vitesse du fluide en m/s

*M* : la masse du flotteur en kg

Le diamètre du conduit varie linéairement en fonction de la hauteur z : D = Do + az Le débit Q vérifie :

*Q*  ** ((*D*  *az*)2  *D*2 )*U*

4 0 0

*D*2

*Si S*  0 *et az*  *D*0 , *on a*

4

2*g* (*M*  *V* )

*Cx*

*Q*  *az*

* + - 1. Caractéristiques métrologiques

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 `a 10% de l’´etendue de la mesure. La température du fluide peut approcher 400°C sous 25 bars. Le rotamètre introduit des pertes de charge.

* + 1. Débitmètre à coupelle, à hélice ou à turbine :



**Fig III.9** – Débitmètre à turbine [5] .

Ce type d'anémomètre, désigné aussi comme moulinet, comprend un corps d'épreuve formé d'un ensemble de coupelle ou d'une hélice qui est mise en rotation par le fluide en mouvement (figure III.9). La vitesse de rotation est mesurée par un dispositif tachymètrique [5] .

* + - 1. Montage de Mesure :

On utilise les capteurs classiques de vitesse de rotation :

* + La dynamo-tachymètrique ;
  + Le capteur optique ;
  + Le capteur inductif.

La dynamo-tachymètrique

C'est une machine à courant continu qui fournit une tension proportionnelle à la vitesse de rotation de son rotor. L'inconvénient de ce type de mesure est que la dynamo-tachymètrique diminue la sensibilité de notre capteur [5] .

Le capteur optique et le capteur inductif

On transforme la vitesse de rotation en une suite d'impulsions électriques dont la fréquence est proportionnelle à cette vitesse. On utilise un procédé optique ou inductif.

* + - 1. Domaine d'utilisation :

Des précisions de l'ordre de 1 % peuvent être atteintes. Cependant, la réponse peut être faussée par de fortes turbulences et par des variations de vitesses importantes.

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.

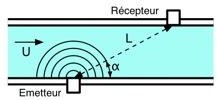
* + 1. Débitmètre à palette :

Une palette est soumise à la force aèro ou hydrodynamique de l'écoulement, à son poids, et éventuellement à l'action d'un ressort de rappel (figure III.10). La position d'équilibre est mesurée à l'aide d'un montage potentiomètrique. L'intérêt de ce type de débitmètre est sa simplicité. Il entraîne des pertes de charges [5] .



**Fig III.10** – Débitmètre à palette [5].

* + 1. Débitmètres ultrasoniques :

Un émetteur ultrasonique émet des trains d'ondes. La mesure du temps mis par le signal pour parcourir la distance L entre l'émetteur et le récepteur nous permet de connaître la vitesse du fluide. Le temps mis par l'onde ultrasonore pour aller de l'émetteur vers le récepteur est :

*t*  *L*

*c*  *U* cos **

Avec

t : temps en s ;

c : vitesse de propagation du son dans le fluide en m/s ; U : vitesse du fluide en m/s ;

Α : angle entre U est la direction définie par le couple émetteur / récepteur

* + - 1. Caractéristiques métrologiques :

L'intérêt de ce dispositif est que l'ensemble du dispositif est à l'extérieur de la canalisation. Il est donc insensible à l'agressivité du fluide et n'entraîne aucune perte de charge. Il permet des mesures de débit compris entre 0,1 m3/h et 105 m3/h, selon le diamètre de la conduite qui peut être compris entre quelques millimètres et plusieurs mètres. Ce débitmètre est utilisé par exemple pour mesurer les débits des hydrocarbures. Il existe des systèmes semblables utilisant l'effet Doppler à partir d'une source lumineuse (laser) dans les gaz