

1. LES BASES THEORIQUES

Les états de la matière

1 - Introduction

La matière peut exister en général sous 3 états différents : solide, liquide et vapeur (ou gaz).

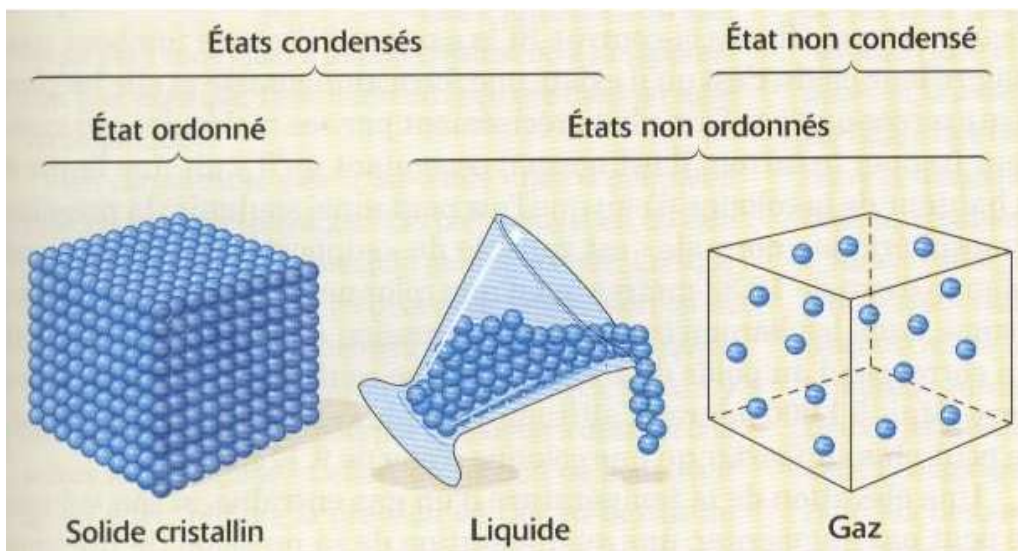
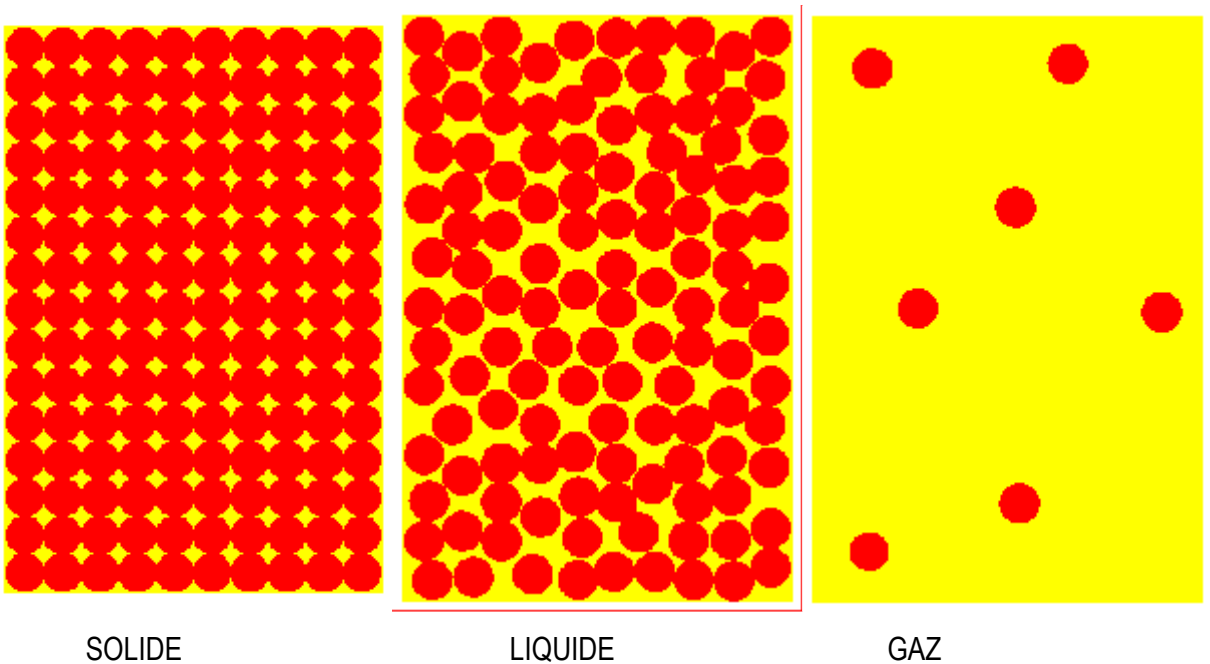
L'état sous lequel se trouve la matière dépend de 2 paramètres : la température et la pression

Ainsi, à la pression atmosphérique normale, l'eau est solide (glace) en dessous de 0°C , est liquide entre 0°C et 100°C et est de la vapeur d'eau au dessus de 100°C .

A 0°C l'eau change d'état et passe de l'état solide à l'état liquide (ou l'inverse).

A 100°C l'eau change à nouveau d'état et passe de l'état liquide à l'état gazeux (ou l'inverse).

Quand la matière passe d'un état à un autre on dit tout simplement qu'il y a changement d'état.



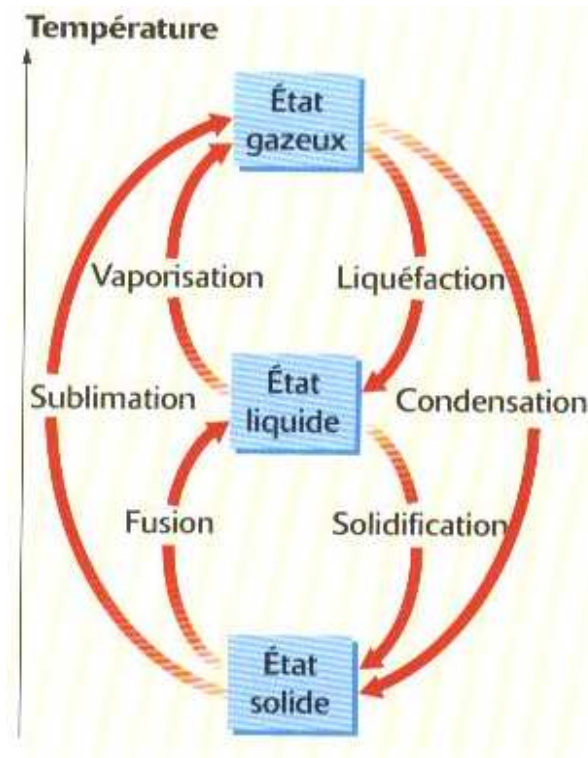
2 - Définition

Un fluide peut être considéré comme étant formé d'un grand nombre de particules matérielles, très petites et libres de se déplacer les unes par rapport aux autres. Un fluide est donc un milieu matériel continu, déformable, sans rigidité et qui peut s'écouler. Parmi les fluides, on fait souvent la distinction entre liquides et gaz.

3 - Les changements d'états de la matière

Définition: un changement d'état est le passage d'un état à un autre sous l'effet d'un changement de température ou de pression.

La matière peut en général, passer d'un état à l'autre:



La liquéfaction est le passage de l'état gazeux à l'état liquide.

La condensation est une liquéfaction sous forme de gouttelettes.

Exemples : l'eau qui chauffe dans une casserole, la buée sur les vitres.

La vaporisation est un phénomène général du passage de l'état liquide à l'état gazeux.

La vaporisation se fait soit par:

- *L'évaporation*, c'est-à-dire à la température ambiante quelle qu'elle soit (dans le cas de l'eau, même lorsqu'il gèle) car c'est un phénomène de surface où le liquide s'évapore au contact de l'air.
- *L'ébullition*, est un phénomène qui se réalise en profondeur. Tout le liquide est chauffé et des bulles se forment à l'intérieur du liquide. Chaque substance a une température d'ébullition qui lui est propre. Exemples : T° ébullition de l'eau pure est de 100°C, celle de l'alcool de 78°C, à pression atmosphérique standard.

La fusion est le passage de l'état solide vers l'état liquide.

Exemple: laisser fondre un glaçon.

La solidification est le passage de l'état liquide à solide.

Exemple: l'eau qui se transforme en glaçon dans le congélateur.

La sublimation est le passage de l'état solide à gazeux.

Exemple : la boule de mythe sublime dans l'air ambiant

4 - Liquides et gaz

Les liquides et gaz habituellement étudiés sont isotropes, mobiles et visqueux. La propriété physique qui permet de faire la différence entre les deux est la compressibilité.

- L'isotropie assure que les propriétés sont identiques dans toutes les directions de l'espace.
- Les liquides sont incompressibles et très peu dilatables (Masse volumique constante, on parlera d'écoulement isovolume).
- Les gaz sont compressibles, à l'inverse des liquides. Leur masse volumique dépend de leur température et de leur pression. Pour des vitesses faibles (variation de pression limitée) et pour des températures constantes on retrouve le cas de l'écoulement isovolume.
- La mobilité fait qu'ils n'ont pas de forme propre et qu'ils prennent la forme du récipient qui les contient.
- La viscosité caractérise le fait que tout changement de forme d'un fluide réel s'accompagne d'une résistance (frottements).
- Le fluide parfait est un fluide dont la viscosité est rigoureusement nulle. Cependant, le comportement d'un fluide est très différent de celui d'un fluide réel aussi petite soit la viscosité de ce dernier. En effet, le fluide parfait, parce qu'il n'a pas de viscosité, ne dissipe jamais l'énergie cinétique. Alors qu'un fluide réel même très peu visqueux, la dissipe efficacement grâce à la turbulence. Le seul exemple de fluide parfait est l'hélium superfluide (obtenu à la température de 2,17K soit -270,98°C à la pression atmosphérique).
- La masse volumique d'un corps c'est sa masse divisée par son volume. Elle est exprimée en kg/m^3 .
- La densité d'un corps c'est sa masse volumique divisée par la masse volumique de l'eau à 4°C. La masse volumique de l'eau est donnée à 1000 kg/m^3 . D'où la densité de l'eau qui vaut 1.
- La température en physique se mesure en Kelvin, on sait que $0\text{K} = -273,15^\circ\text{C}$ et que $0^\circ\text{C} = 273,15 \text{ K}$ d'où le principe de conversion :
$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15$$
$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15$$
Exemple : 20°C en Kelvin, $T(\text{K}) = 20 + 273,15 = 293,15\text{K}$

Caractéristiques d'un gaz

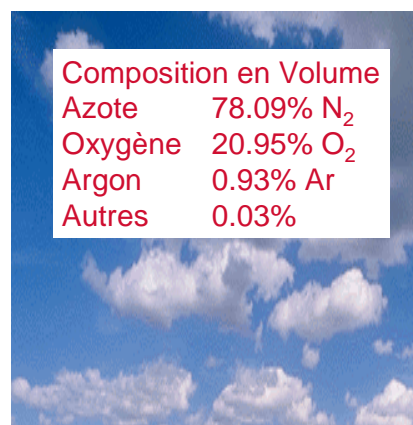
1. Propriétés physiques

L'air considéré comme gaz parfait répond aux lois régissant ces gaz : lois de **Boyle-Mariotte**, de **Gay-Lussac** et de **Laplace**.

Dans l'usage courant qui en est fait industriellement, seule la **Loi de Boyle-Mariotte** doit être rappelée.

2. Composition de l'air

Cet air, constitué à 78 % d'azote, 21 % d'oxygène et 1% d'hydrogène, de gaz carbonique et de gaz rares, est un fluide élastique qui se comporte comme un gaz parfait.



Composition en Volume	
Azote	78.09% N ₂
Oxygène	20.95% O ₂
Argon	0.93% Ar
Autres	0.03%

3. La pression atmosphérique

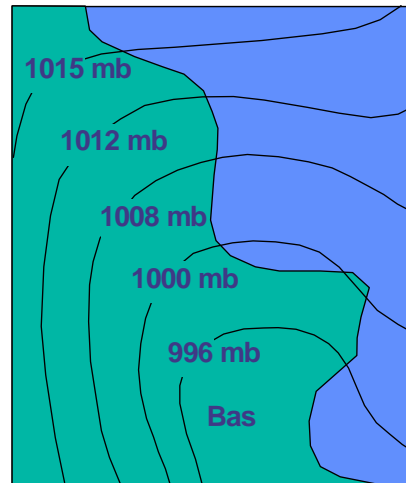
La pression atmosphérique est causée par le poids de l'air au dessus de nous. La pression diminue lorsque on gravit une montagne et augmente lorsque l'on descend dans une mine

Elle varie sous l'influence des conditions météorologiques

On voit les valeurs de la pression atmosphérique sur une carte météorologique

Les lignes appelées les isobares montrent les découpes des pressions en mbar.

Elles aident à prévoir la force et la direction du vent.



4. Atmosphère standard

Une atmosphère standard est définie par l'Organisation Internationale de l'Aviation Civile.

La pression et la température au niveau de la mer est de 1013.23 mbar à 15 °C (288K)



5. Atmosphère ISO

Recommandation ISO R 554

Atmosphère standard pour évaluer des composants ou les équipements

- 20°C, 65% d'humidité, 860 à 1060 mbar
- 27°C, 65% d'humidité, 860 à 1060 mbar
- 23°C, 50% d'humidité, 860 à 1060 mbar

Tolérances $\pm 2^{\circ}\text{C} \pm 5\%$ d'humidité

Tolérances réduites $\pm 1^{\circ}\text{C} \pm 2\%$ RH

La norme fait référence à l'atmosphère à laquelle les essais effectués à d'autres atmosphères peuvent être corrigés

- 20°C, 65% d'humidité, 1013 mbar

6. Baromètre de mercure

La pression atmosphérique peut être mesurée comme une colonne de fluide dans un tube vide

760 mm Hg = 1013.9 mbar approximativement

Pour un baromètre à eau la hauteur serait de 10 m.

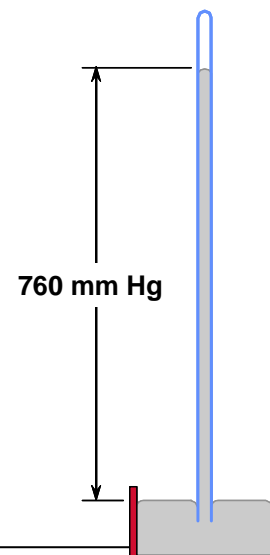
(Hg = 13.6 X densité de H₂O)

Le vide se mesure en Torr

1 mm Hg = 1 Torr

760 Torr = pression atmo.

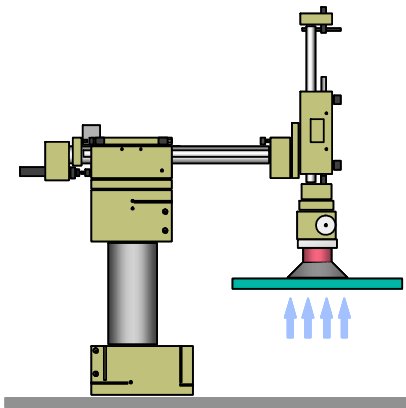
0 Torr = vide total



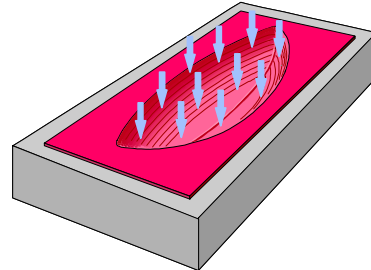
7. Le vide

L'utilité du vide est évidente dans les machines industrielles.

La préhension de pièces et le moulage sous vide en sont des exemples



Ventouses



Mise en forme de thermoplastiques

8. La pression

La pression constitue la première grandeur fondamentale de la pneumatique.

La mesure de la pression des fluides se fait souvent en relatif, c'est-à-dire en donnant la différence entre la pression du fluide et la pression atmosphérique.

Elle est appelée pression relative ou manométrique ; si l'on admet que la pression atmosphérique de référence est de 1 bar en absolu, alors on a la relation suivante :

$$P \text{ absolue} = P \text{ relative} + P \text{ atmosphérique}$$

$$P \text{ absolue} = P \text{ relative} + 1 \text{ avec } P \text{ en bars.}$$

Unités

$$1 \text{ pascal} = 1 \text{ N/cm}^2$$

$$1 \text{ bar} = 100000 \text{ N/m}^2 \text{ (Newtons par mètre carré)}$$

$$1 \text{ bar} = 10 \text{ N/cm}^2$$

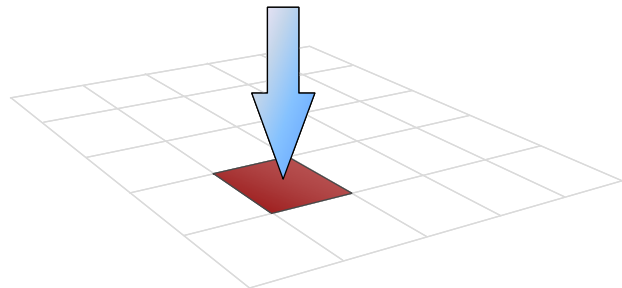
Pour des petites pressions on utilise le millibar mbar

$$1000 \text{ mbar} = 1 \text{ bar}$$

Le système anglo-saxon utilise la livre par pouce carré

$$1 \text{ psi} = 68.95 \text{ mbar}$$

$$14.5 \text{ psi} = 1 \text{ bar}$$



Il y a beaucoup d'unités de mesure de pression.

Certaines d'entre elles et leurs équivalents sont inscrits ci-dessous.

$$1 \text{ bar} = 100000 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ bar} = 14.50 \text{ psi}$$

$$1 \text{ bar} = 10197 \text{ kgf/m}^2$$

$$1 \text{ mm Hg} = 1.334 \text{ mbar approx.}$$

$$1 \text{ mm H}_2\text{O} = 0.0979 \text{ mbar approx.}$$

$$1 \text{ Torr} = 1 \text{ mmHg abs (pour le vide)}$$

Le tableau suivant donne les conversions pour toutes les autres unités usitées.

Cela signifie que lorsque nous lisons 6 bars sur un manomètre, il faut comprendre que c'est une valeur de pression relative.

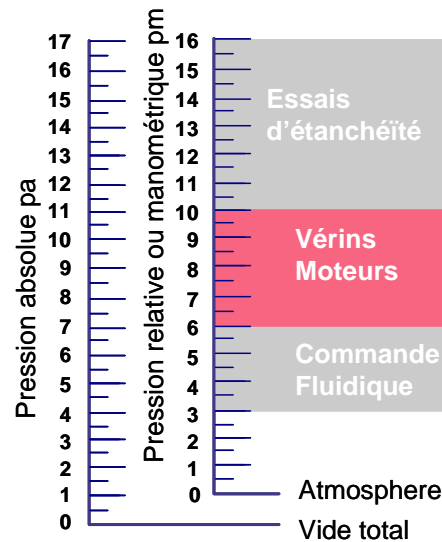
En pression absolue, sa valeur est $6 + 1 = 7$ bars

Figure 1. Tableau de conversion des unités de pression

bar	kg/cm ²	Atm	m d'eau	cm de mercure	PSI *
1	1,019	0,987	10,19	75	14,5
0,981	1	0,968	10	73,6	14,2
1,013	10,33	1	10,33	76	14,7
0,0981	0,10	0,0968	1	7,36	1,42
0,0133	0,0136	0,00132	0,136	1	0,193
0,0689	0,0703	0,0681	0,703	5,18	1
6,89	7,03	6,81	70,3	518	100

1 torr = 1,33 mbar * Utilisée aux États-Unis: *Pound per Square Inch*

Les pressions sont définies en pression relative (ou manométrique)
 Le zéro sur cette échelle correspond à la pression atmosphérique
 La pression relative = $p_a + p_{atm}$
 Pour des calculs rapides on suppose
 1 atmosphère = 1000 mbar
 Pour des calculs précis
 1 atmosphere = 1013 mbar

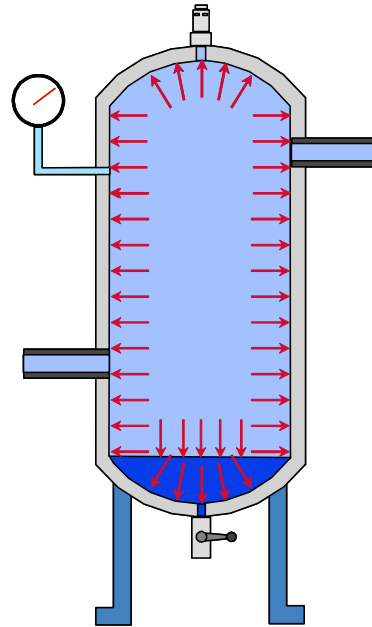


9. Pression et force

L'air comprimé génère une force de valeur constante sur chaque surface de contact interne d'un l'équipement

Le liquide dans un récipient sera pressurisé et transmettra cette force

Pour chaque bar de pression manométrique, 10 Newtons sont générés uniformément sur chaque centimètre carré.



La poussée développée par un piston sous l'action de la est la surface utile multipliée par la pression

$$\text{Poussée} = \frac{\pi D^2 \rho}{4} \text{ daN}$$

où

D = le diamètre du cylindre en cm

ρ = la pression en bar.

La force agissant latéralement sur un cylindre est la surface projetée multipliée par la pression

Cette force permet de dimensionner l'épaisseur du cylindre

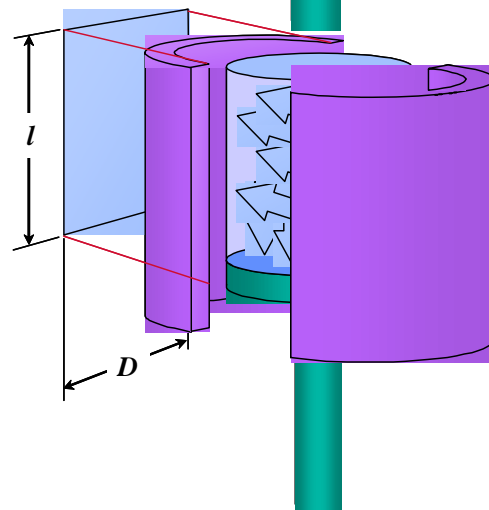
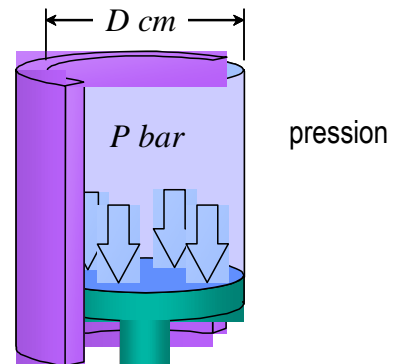
$$\text{Force} = D \cdot l \cdot \rho \text{ daN}$$

Où

D = diamètre du cylindre en cm

l = longueur de la chambre sous pression

ρ = pression en bar



Si les deux entrées d'un cylindre sont connectées à la même source de pression, la tige sortira en raison de la différence de surface de l'un ou de l'autre côté du piston

Si un par un vérin à double tige on applique la pression de cette façon il sera en l'équilibre et ne se déplacera dans aucune direction

10. Le volume

Les gaz étant compressibles, donner le volume d'une quantité d'air n'a aucun sens si l'on ne précise pas la pression et la température de ce volume.

Afin d'unifier cette valeur, on définit des conditions normales, à savoir une température de + 20°C et une pression atmosphérique.

Le volume se note alors Nm³ ou NI et se lit « normal mètre cube » ou « normal litre ».

On peut aussi trouver l'indication ANR qui signifie : « aux conditions de l'atmosphère normale de référence ».

Exemple : V (ANR) = 5 m³ (ANR).

11. Le débit volumique

La définition adoptée pour le volume normal s'étend aux débits.

Le débit est un volume d'air traversant une section par unité de temps.

On notera usuellement Nm³/h ou bien alors NI/min.

Exemple : Qv = 1300 NI/min (1300 normaux litres par minute).

12. Unités de débit

Le flux est mesuré comme un volume d'air libre par unité de temps

Les unités plus utilisées sont :

- Litres ou décimètres cubes par seconde L/s ou dm³/s
- Mètres cubes par minutes : m³/min
- Pied cubique par min. (anglo-saxon) scfm

$$1 \text{ m}^3/\text{mn} = 35.31 \text{ scfm}$$

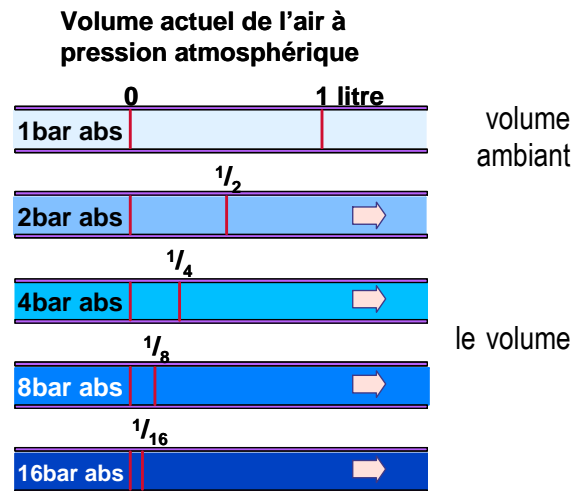
$$1 \text{ dm}^3/\text{s} = 0.06 \text{ m}^3/\text{mn}$$

13. Débit d'air

L'espace entre les traits représente le réel dans un cylindre occupé par 1 litre d'air aux pressions absolues respectives.

Le débit a lieu comme le résultat d'un différentiel de pression. A 1bar absolu (0 manométrique) il n'y a pas de débit

Si la vitesse reste la même à chaque cas, qui s'écoulera sera proportionnel à la pression.



Thermique

1. Les modes de transferts thermiques

Il y a trois modes de transfert :

- Conduction : la chaleur passe d'un corps à un autre, par contact.
- Convection : un corps qui se déplace emmène avec lui, la chaleur qu'il contient. La quantité de chaleur ainsi transportée peut être importante, notamment dans le cas d'un changement de phase.
- Radiation (Rayonnement) : tous les corps émettent de la lumière, en fonction de leur température, et sont eux-mêmes chauffés par la lumière qu'ils absorbent.

Remarque: Pour les deux premiers modes, la présence de matière est indispensable pour qu'il y ait un transfert thermique à l'inverse du mode de transfert par rayonnement qui peut s'effectuer dans le vide.

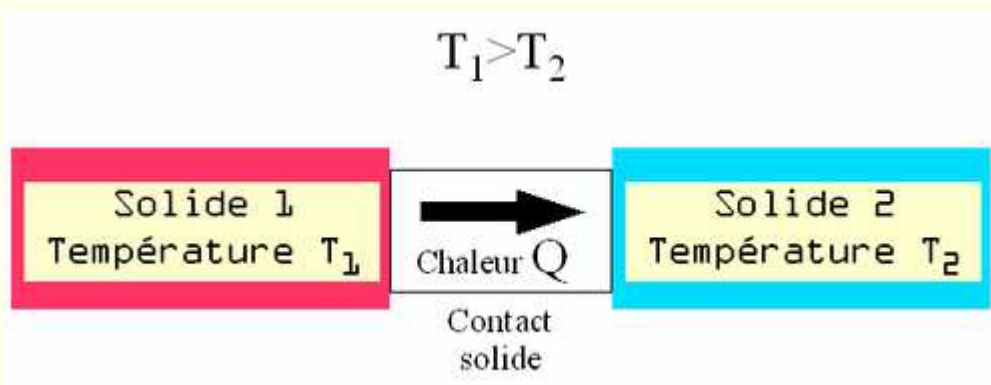
1.1. Conduction

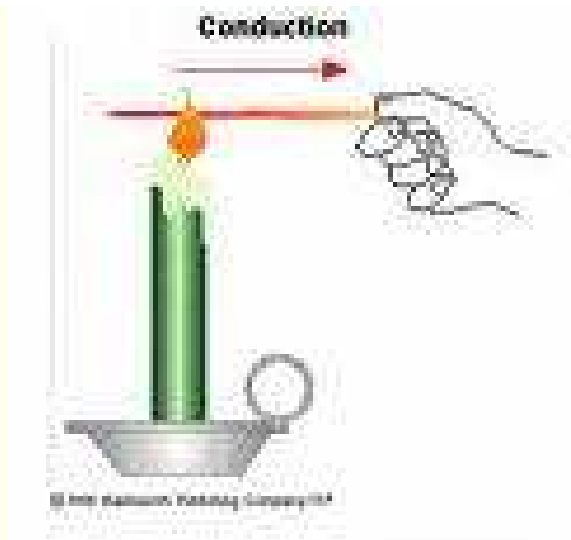
Le transfert par conduction est un échange d'énergie avec contact quand il existe un **gradient** de température (variation progressive de la température) au sein d'un système.

Dans un gaz ou un liquide, l'énergie se propage par contact direct entre **molécules** au gré des chocs aléatoires à l'échelle microscopique. Dans un **solide**, la vibration des atomes autour de leur position d'équilibre dans le solide, se transmet de proche en proche.

Dans le cas des **cristaux**, les vibrations du réseau cristallin peuvent être considérées comme des quasi-particules appelées **phonons** par analogie avec la lumière qui possède des propriétés similaires : elle se manifeste en effet, tantôt comme une onde, tantôt comme un paquet d'énergie $h\nu$, qui correspond à une particule élémentaire — non fictive cette fois — appelée **photon**. Ces phonons interagissent avec les **électrons** libres, ce qui explique que les **conductivités** thermique et électrique soient liées (par exemple, les **métaux** sont de bons conducteurs de l'électricité et de la chaleur).

Exemples de transfert par conduction : transfert à travers une paroi **diathermique** (par exemple les ailettes de refroidissement d'un moteur ou les radiateurs d'un chauffage central...) contrairement à une paroi **adiabatique** qui s'oppose au transfert de chaleur (par exemple, la paroi d'une bouteille thermos).





Représentation schématique du transfert thermique par conduction

D'une manière simple, le flux de chaleur qui passe dans un solide de manière monodirectionnel s'exprime de la manière suivante :

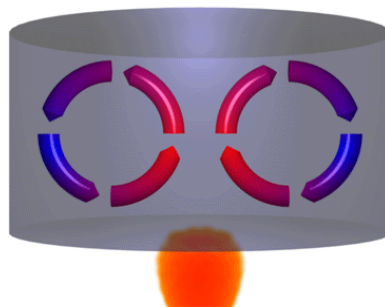
$$Q = \phi = \frac{\lambda}{e} S \Delta T$$

où

- Q = flux de chaleur en W
- λ = conductibilité thermique du matériau déterminée expérimentalement (en $W.m^{-1}.K^{-1}$)
- S = Surface perpendiculaire au flux de chaleur
- ΔT = différence de température
- e = épaisseur entre les deux parois

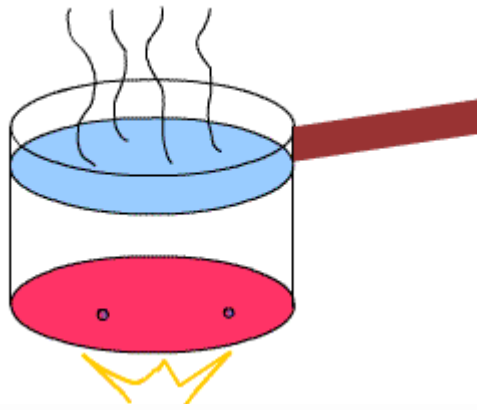
1.2. Convection

Définition : transfert d'énergie qui s'accompagne de mouvement de molécules dans un fluide



(liquide ou gaz).

Figure 2.



- Convection naturelle (ou libre) : l'échange de chaleur est responsable du mouvement. Le transfert thermique provoque le mouvement.
- Convection forcée : un dispositif mécanique entraîne les molécules vers le dispositif chauffant. Le mouvement favorise le transfert thermique.

Les lois sont très différentes dans les deux cas.

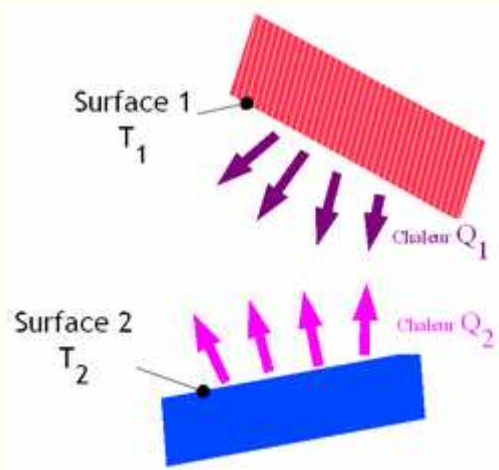
Exemples de transfert par convection: échange de chaleur dans des radiateurs à circulation d'eau ou d'air (convection forcée), refroidissement d'une tasse de liquide chaud en soufflant dessus (convection forcée), diffusion de l'air chaud au-dessus d'un radiateur électrique (convection naturelle s'il n'y a pas de soufflerie dans le radiateur).

Convection naturelle	Convection forcée
<p style="text-align: center;">$T_S > T_F$</p> <p style="text-align: center;">Représentation schématique de la convection naturelle</p>	<p style="text-align: center;">$T_S > T_F$</p> <p style="text-align: center;">Représentation schématique de la convection forcée</p>

$$Q = \phi = hS\Delta T$$

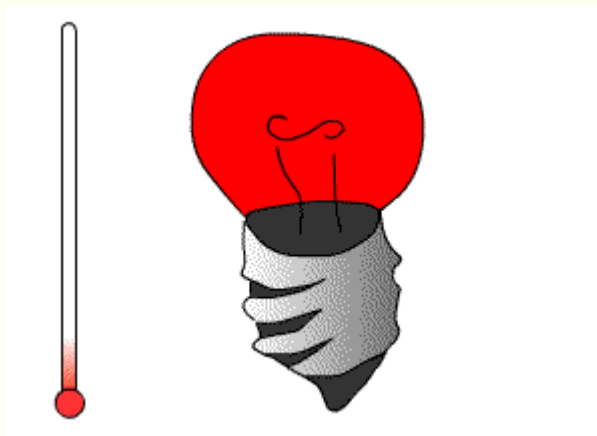
- Q = flux de chaleur en W
- h = coefficient de convection en W/m^2
- S = Surface de la paroi
- ΔT = écart de température entre la paroi et l'air

1.3. Rayonnement



Représentation schématique du transfert thermique par radiation

Définition : Le transfert se fait par rayonnement électromagnétique (par exemple : [infrarouge](#)). Le transfert peut se réaliser dans le vide sans la présence de [matière](#). L'exemple caractéristique de ce type de transfert est le rayonnement du soleil dans l'espace.



Exemples de transfert par rayonnement: Système de chauffage dit par radiant; le soleil.

La [loi de Stefan-Boltzmann](#) (ou loi de [Stefan](#)) permet de quantifier ces échanges. La puissance rayonnée par un corps est donnée par la relation:

$$P = \epsilon S \sigma T^4$$

avec

- σ : constante de Stefan-Boltzmann = $5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$
- ϵ : [émissivité](#), coefficient qui vaut 1 pour un [corps noir](#) et qui est compris entre 0 et 1 selon l'état de surface du matériau.
- S : surface du corps
- T : température du corps en Kelvin

Si le corps récepteur réfléchit certaines longueurs d'ondes ou est transparent à d'autres, seules les longueurs d'onde absorbées contribuent à son équilibre thermique. Si par contre le corps récepteur est un **corps noir**, c'est-à-dire qu'il absorbe tous les rayonnements électromagnétiques, alors tous les rayonnements contribuent à son équilibre thermique.

1.4. Combinaison des modes de transfert

Le transfert d'énergie par chaleur se réalise généralement par une combinaison de plusieurs modes.

Par exemple, le système **chauffage central**, combine la convection (en général forcée) pour chauffer le fluide dans la **chaudière**, la conduction pour chauffer les parois du radiateur et la convection (en général naturelle) pour chauffer l'air autour du radiateur. Dans le cas du chauffage d'un solide par radiation, la transmission de chaleur sera une combinaison de radiation et de conduction. C'est le cas du **verre** d'une vitre chauffée par le rayonnement solaire; le transfert étant combiné avec une convection naturelle de l'air, derrière la vitre d'une pièce.

Parfois le transfert thermique s'accompagne d'un transfert de matière. Par exemple dans le cas de l'**ébullition** d'un liquide, une partie du liquide subit un **changement d'état** physique et le gaz ainsi créé se sépare du liquide.

1.5. Flux thermique

Le flux thermique est la quantité d'énergie thermique qui traverse une surface **isotherme** par unité de **temps**. Il est appelé « puissance thermique » pour les équipements thermiques tels que les **radiateurs**.

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}$$

Le flux s'exprime en :

- **Watt** : W (SI) ;
- **calorie** par **seconde** : kcal.s⁻¹ (unité utilisée par les thermiciens).

Écoulement des fluides

1 - DEFINITIONS

Le **débit** est le quotient de la quantité de fluide qui traverse une section droite de la conduite par la durée de cet écoulement.

$$Q=V/t$$

1.1 - Débit-masse ou débit massique

Si Δm est la masse de fluide qui a traversé une section droite de la conduite pendant le temps Δt , par définition le débit-masse est :

Unité : $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$

$$q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t}$$

1.2 - Débit-volume ou débit volumique

Si ΔV est le volume de fluide qui a traversé une section droite de la conduite pendant le temps Δt , par définition le débit-volume est :

Unité : $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

$$q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

1.3 - Relation entre q_m et q_v

La masse volumique est donnée par la relation : $\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V}$ d'où : $q_m = \rho q_v$

Remarques :

Les liquides sont incompressibles et peu dilatables (masse volumique constante) ; on parle alors d'**écoulements isovolumes**.

Pour les **gaz**, la masse volumique dépend de la température et de la pression. Pour des vitesses faibles (variation de pression limitée) et pour des températures constantes on retrouve le cas d'un écoulement isovolume.

On pourra appliquer :

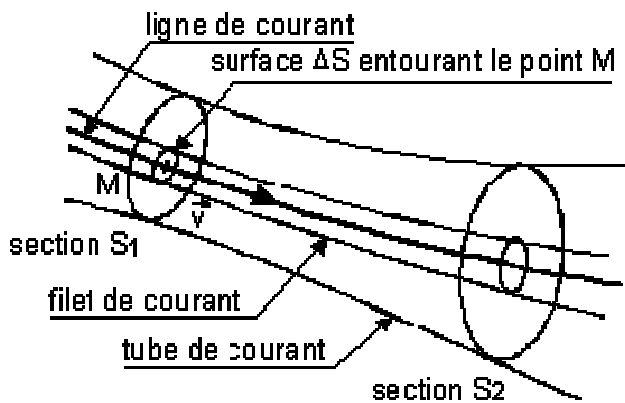
$$\rho = \rho_0 \cdot p / p_0 \cdot T / T_0 \quad \text{avec } \rho_{0(\text{air})} = 1,293 \text{ Kg/m}^3 \quad p_0 = 1,013 \text{ bar (pression atmosphérique)} \quad \text{et } T_0 = 273,15 \text{ K}$$

1.4 - Écoulements permanents ou stationnaires

Un régime d'écoulement est dit **permanent** ou **stationnaire** si les paramètres qui le caractérisent (pression, température, vitesse, masse volumique, ...), ont une valeur constante au cours du temps.

2 - Équation de conservation de la masse ou équation de continuité

2.1 - Définitions



Ligne de courant : En régime stationnaire, on appelle ligne de courant la courbe suivant laquelle se déplace un élément de fluide. Une ligne de courant est tangente en chacun de ses points au vecteur vitesse du fluide en ce point.

Tube de courant : Ensemble de lignes de courant s'appuyant sur une courbe fermée.

Filet de courant : Tube de courant s'appuyant sur un petit élément de

surface ΔS .

La section de base ΔS du tube ainsi définie est suffisamment petite pour que la vitesse du fluide soit la même en tous ses points (répartition uniforme).

2.2 - Conservation du débit

Considérons un tube de courant entre deux sections S_1 et S_2 . Pendant l'intervalle de temps Δt , infiniment petit, la masse Δm_1 de fluide ayant traversé la section S_1 est la même que la masse Δm_2 ayant traversé la section S_2 .

$q_{m1} = q_{m2}$ En régime stationnaire, le débit-masse est le même à travers toutes les sections droites d'un même tube de courant.

Dans le cas d'un écoulement isovolume (= Cte) :

$q_{v1} = q_{v2}$ En régime stationnaire, le débit-volume est le même à travers toutes les sections droites d'un même tube de courant

2.3 - Expression du débit en fonction de la vitesse v

Le débit-volume est aussi la quantité de liquide occupant un volume cylindrique de base S et de longueur égale à v , correspondant à la longueur du trajet effectué pendant l'unité de temps, par une particule de fluide traversant S .

Il en résulte la relation importante : **$q_v = v S$**

Avec Q_v en m^3/s S en m^2 et v en m/s

Dans la pratique on utilise souvent une autre formule :

$Q_v = 6.S.v$

Avec Q_v en l/min S en cm^2 et v en m/s

2.4 – Puissance hydraulique d'un système

La puissance hydraulique ou puissance utile hydraulique d'un système peut être déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$P = p \cdot Q$$

Avec -P la puissance exprimée en W
-p la pression exprimée en Pa
-Q le débit volumique exprimé en m³/s

Dans la pratique on utilise également :

$$P = (p \cdot Q) / 600$$

Avec -P la puissance exprimée en kW
-p la pression exprimée en bar
-Q le débit volumique exprimée en l/min

2.5 – Vitesse moyenne



En général la vitesse v n'est pas constante sur la section S d'un tube de courant ; on dit qu'il existe un **profil de vitesse** (à cause des forces de frottement). Le débit-masse ou le débit-volume s'obtient en intégrant la relation précédente :

$$v_{\text{moy}} = \frac{q_V}{S}$$

Dans une section droite S de la canalisation, on appelle **vitesse moyenne** v_m la vitesse telle que :

$$q_V = v_{1\text{moy}} S_1 = v_{2\text{moy}} S_2 = \text{Cte} \quad \text{C'est l'équation de continuité}$$

La vitesse moyenne v_{moy} apparaît comme la vitesse uniforme à travers la section S qui assurerait le même débit que la répartition réelle des vitesses.

Si l'écoulement est isovolume, cette vitesse moyenne est inversement proportionnelle à l'aire de la section droite

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}$$

La vitesse moyenne est d'autant plus grande que la section est faible.

3 - Théorème de BERNOULLI

3.1 - Le phénomène

Observations

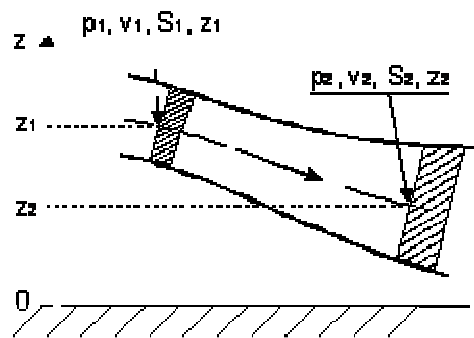
Une balle de ping-pong peut rester en suspension dans un jet d'air incliné.

Une feuille de papier est aspirée lorsqu'on souffle dessus.

Conclusion : La pression d'un fluide diminue lorsque sa vitesse augmente.

3.2 - Théorème de Bernoulli pour un écoulement permanent d'un fluide parfait incompressible

Un *fluide parfait* est un fluide dont l'écoulement se fait *sans frottement*.



On considère un écoulement permanent isovolume d'un fluide parfait, entre les sections S_1 et S_2 , entre lesquelles il n'y a aucune machine hydraulique, (pas de pompe, ni de turbine).

Soit m la masse et V le volume du fluide qui passe à travers la section S_1 entre les instants t et $t+\Delta t$. Pendant ce temps la même masse et le même volume de fluide passe à travers la section S_2 .

Tout se passe comme si ce fluide était passé de la position (1) à la position (2).

En appliquant le théorème de l'énergie cinétique à ce fluide entre les instants t et $t+\Delta t$ (la variation d'énergie cinétique est égale à la somme des travaux des forces extérieures : poids et forces pressantes), on obtient :

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

p est la pression statique, $\rho g z$ est la pression de pesanteur, $\rho \frac{v^2}{2}$ est la pression cinétique.

Tous les termes s'expriment en pascal.

En divisant par ρg , on obtient :

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

Et dans ce cas précis, on écrit tous les termes dans la dimension d'une hauteur (pressions exprimées en mètres de colonne de fluide).

H est la Hauteur totale.

$\frac{P}{\rho g}$ est la Hauteur piézométrique,

Définition : Hauteur piézométrique :

z est la une côte,

$\frac{v^2}{2g}$ est la Hauteur cinétique,

$z + \frac{P}{\rho g}$ est la Hauteur potentielle.

Pour n'importe quelle masse donnée d'air, les variables sont la pression, le volume et la température.

En immobilisant une des trois variables à une valeur constante, nous regarderons le rapport l'influence sur les deux autres variables pour chaque cas.

- Température constante
- Pression constante
- Volume constant
-

4. Phénomène de cavitation

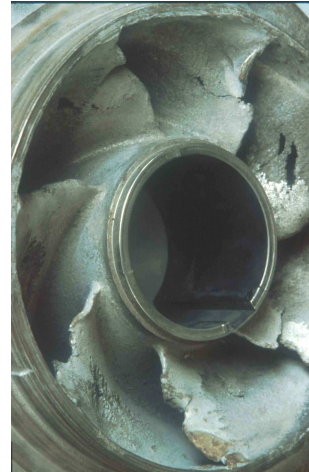
La cavitation :

Un vide partiel peut aussi être créé par l'aspiration d'une pompe dès lors que la vitesse du fluide entrant dans la pompe est trop faible pour assurer le débit voulu. Dans ce cas le fluide employé est à l'état liquide, et c'est ce cas précis ou ce vide partiel au sein d'un liquide (Eau, huile, etc....) entraîne ce que l'on appelle la cavitation.

La cavitation est la formation de cavités (ou bulles) de vapeur dans un liquide en mouvement. C'est lors de l'aspiration d'une pompe (Volumétrique ou non) que se crée la réduction de pression (ou dépression). Si cette pression descend en dessous de la tension de vapeur saturante correspondante à la température du liquide, celui-ci va se vaporiser, et le fluide qui entrera alors dans la pompe sera alors composé de liquide et de poches de vapeur.

Ce fluide continuant d'avancer dans notre générateur de débit va progressivement arriver dans un zone où la pression devient plus importante (l'orifice de refoulement) c'est alors que les bulles de vapeur implosent et produisent du bruit. Dans le cas de forte cavitation le bruit est très important, le rendement de la pompe chute et l'effondrement de ces bulles de vapeur risque d'endommager, voire même de briser la pompe.

La cavitation peut aussi apparaître sur le dos des pales d'hélices d'un bateau, si leur profil n'est pas bien étudié ou encore autour de pièces soumises à des ultrasons.



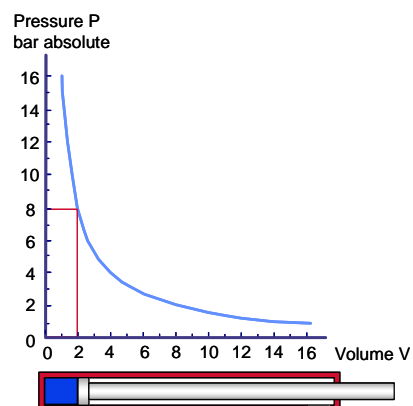
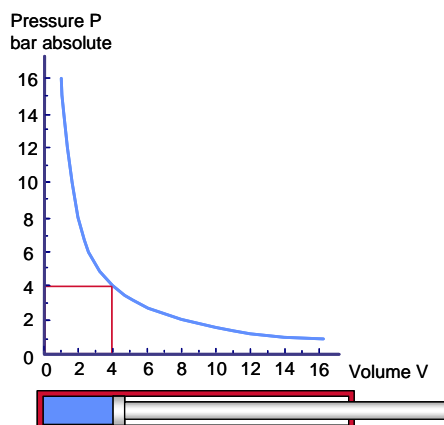
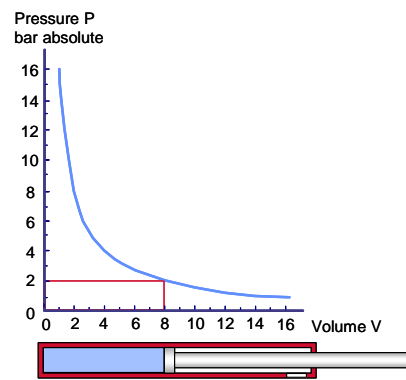
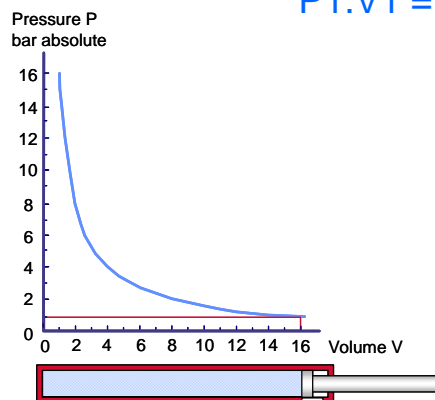
5. Cas des gaz

5.1. Température constante

Loi de Mariotte : le produit de la pression absolue par le volume d'une masse donnée de gaz, reste constant si la température du gaz reste constante.

Ce processus est appelé **isotherme** (à température constante). Il doit être assez lent pour que la chaleur puisse sortir.

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 = \text{constant}$$



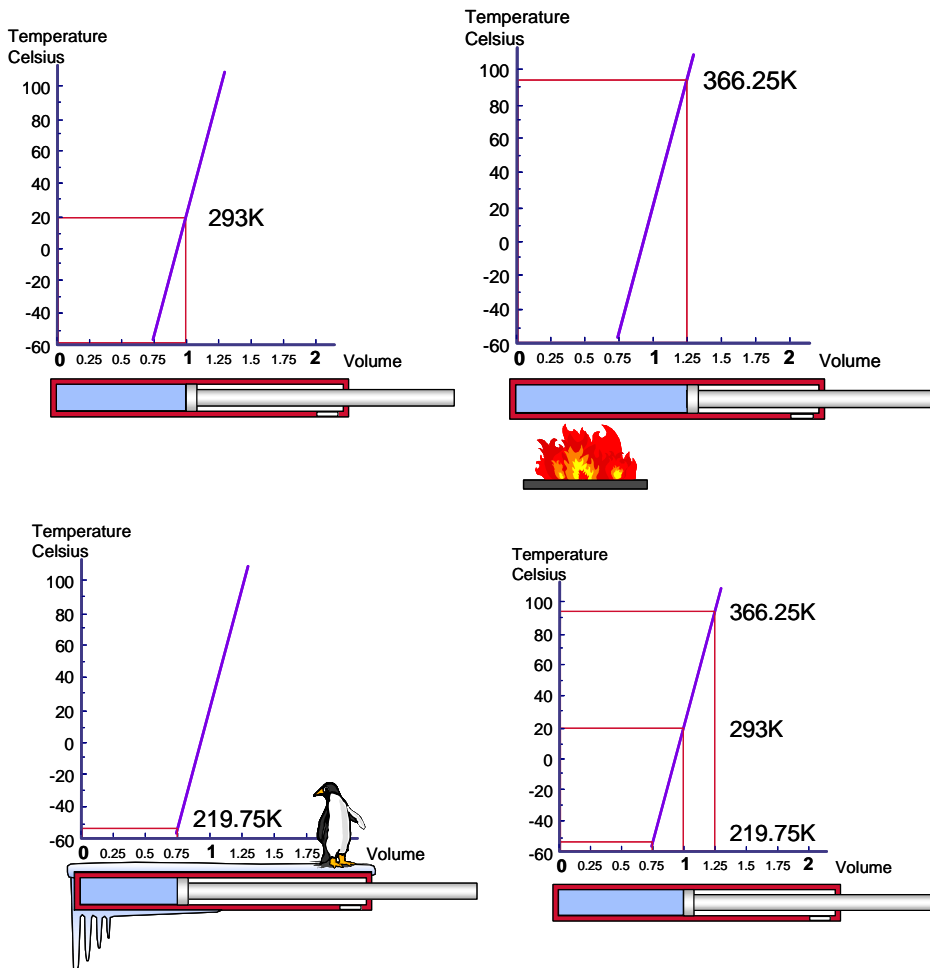
5.2. Pression constante

Loi de Gay Lussac : pour une masse donnée de gaz à la pression constante, le volume est proportionnel à la température absolue.

En cas de changement de T° , le volume varie pour garder la pression constante (pas de frottements)

Pour une variation de 20°C à 73.25°C il se produira un changement de 25 % de volume.
 $0^\circ\text{Celsius} = 273\text{K}$

$$\frac{V_1}{T_1(K)} = \frac{V_2}{T_2(K)} = c$$

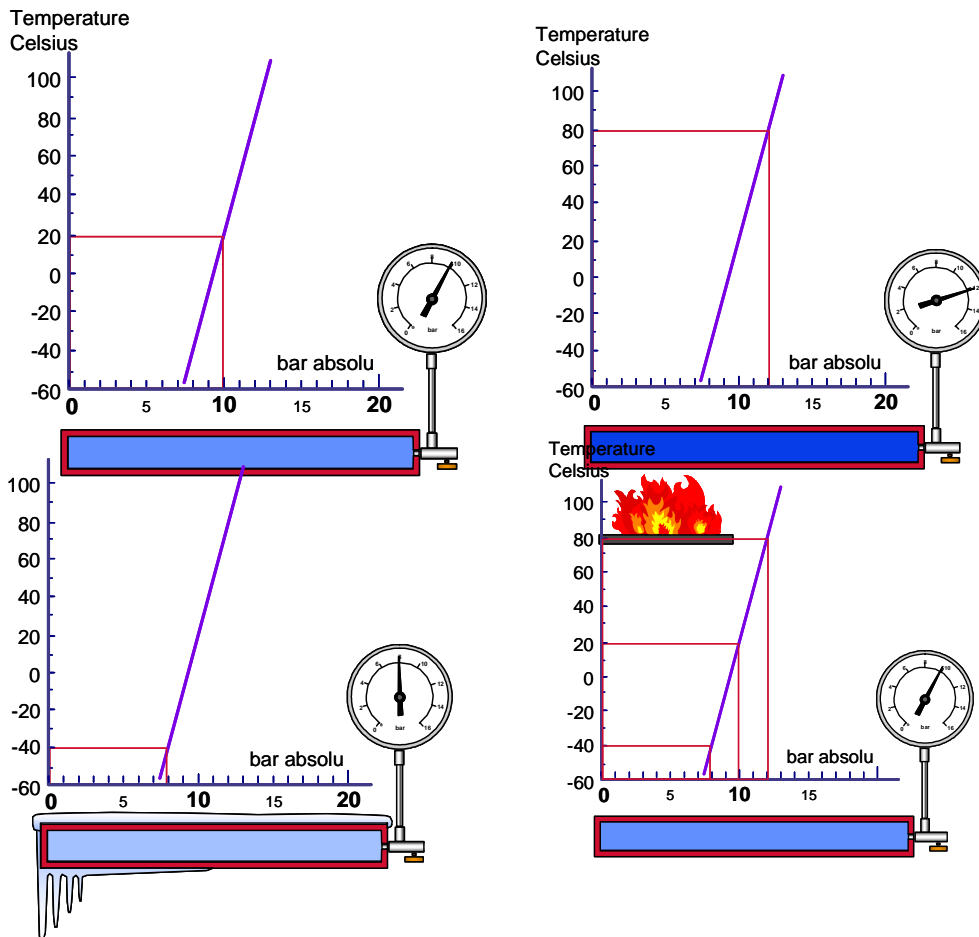


5.3. Volume constant

De la loi de **Boyle-Mariotte** nous pouvons aussi voir que si le volume d'une masse donnée d'air devait être tenu à une valeur constante, la pression sera proportionnelle à la température absolue K.

Pour un volume à 20°C et 10 bar de pression absolue, un changement de la température de 60°C produira un changement de la pression de 2.05 bar
 $0^\circ\text{C} = 273\text{K}$

$$\frac{P_1}{T_1(K)} = \frac{P_2}{T_2(K)}$$



5.4. Loi générale sur les gaz

La loi générale sur les gaz est une combinaison de la loi de Boyle et la loi de Mariotte où la pression, le volume et la température peuvent tous varier pour une masse donnée de gaz, mais leur rapport aboutissent à une valeur constante.

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2} = \text{constant}$$

5.5. Compression adiabatique

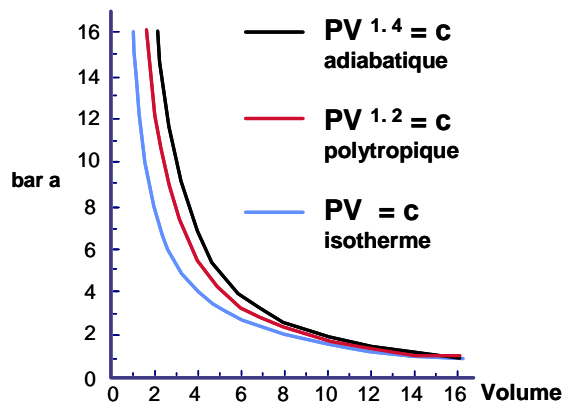
Dans la théorie, quand un volume d'air est comprimé subitement, le processus est adiabatique (aucun temps pour dissiper la chaleur par les parois du cylindre)

Pour une compression et détente adiabatique:

$$PV^n = c$$

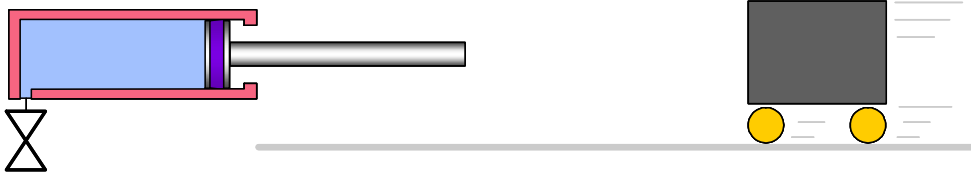
$$n=1.4 \text{ air}$$

Dans le cylindre d'un compresseur d'air le processus est rapide, mais un peu de chaleur sera perdue par les parois du compresseur, donc n sera approximativement de 1,3 pour un compresseur à vitesse élevée.



5.6. Compression polytropique

- En pratique comme dans un choc absorbant l'énergie, il y aura une petite perte de chaleur pendant la compression
- La caractéristique de compression sera quelque part entre adiabatique et isotherme.
- La valeur de n sera inférieure à 1.4 et dépend du taux de compression.
- Typiquement $PV^{1.2} = c$ peut être employé, mais est applicable seulement pendant le processus.



Pertes de charges

1 - Le phénomène

Observations

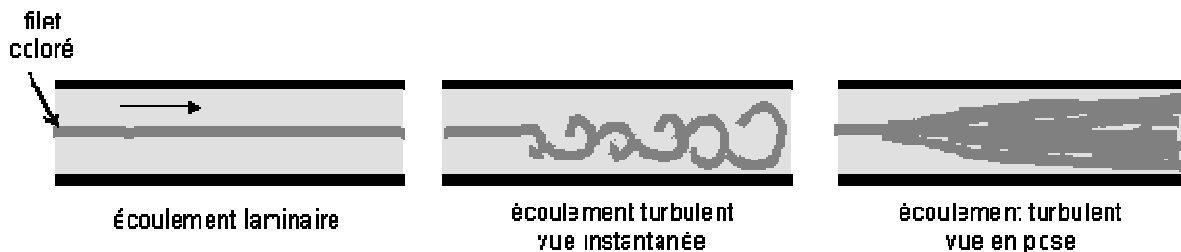
La pression d'un liquide réel diminue tout au long d'une canalisation dans laquelle il s'écoule, même si elle est horizontale et de section uniforme, contrairement au théorème de Bernoulli.

La pression d'un fluide réel diminue après le passage à travers un coude, une vanne ou un rétrécissement.

Conclusion

Un **fluide réel**, en **mouvement**, subit des **pertes d'énergie** dues aux frottements sur les parois de la canalisation (pertes de charge *systématiques*) ou sur les "accidents" de parcours (pertes de charge *singulières*).

2 - Les différents régimes d'écoulement : nombre de Reynolds



Les expériences réalisées par **Reynolds** (1883) lors de l'écoulement d'un liquide dans une conduite cylindrique rectiligne dans laquelle arrive également un filet de liquide coloré, ont montré l'existence de deux régimes d'écoulement : **laminaire et turbulent**.

Lorsque qu'un écoulement est **laminaire** on dit qu'il est régulier, qu'il ne présente pas trop de variations spatiales ou temporelles, bien souvent stationnaire. La viscosité stabilise et régularise les écoulements de façon générale. Un fluide présentant une viscosité importante s'écoulera de façon **laminaire**.

On dit qu'un écoulement est **turbulent** si le fluide utilisé possède une viscosité relativement faible. Il s'agit d'un comportement extrêmement complexe ; comme son nom l'indique, un écoulement turbulent est très changeant temporellement et spatialement. Il est même chaotique, une modification mineure d'un écoulement changera complètement son avenir, même si la modification est très petite.

Si les fleuves avaient des écoulements laminaires, ils iraient bien plus vite (sans doute bien au delà d'une centaine de kilomètres par heure).

En utilisant des fluides divers (viscosité différente), en faisant varier le débit et le diamètre de la canalisation, Reynolds a montré que le paramètre qui permettait de déterminer si l'écoulement est laminaire ou turbulent est un **nombre sans dimension appelé nombre de Reynolds** et donné par :

$$\boxed{Re = \frac{\rho v D}{\eta}} \text{ ou } \boxed{Re = \frac{v D}{\nu}}$$

avec :

ρ = masse volumique du fluide (kg/m³), v = vitesse moyenne(m/s), D = diamètre de la conduite(m)

η = viscosité dynamique du fluide (Pa.s), ν = viscosité cinématique (m²/s) $\nu = \frac{\eta}{\rho}$

L'expérience montre que :

si $Re < 2300$ le régime est LAMINAIRE

si $2300 < Re < 3000$ le régime est INTERMEDIAIRE

si $Re > 3000$ le régime est TURBULENT

Ces valeurs doivent être considérées comme des ordres de grandeur, le passage d'un type d'écoulement à un autre se faisant progressivement.

3 - Théorème de Bernoulli appliqué à un fluide réel avec pertes de charge

Lors d'un écoulement d'un fluide réel il peut y avoir des *pertes de charge* entre les points (1) et (2) : dans le cas d'une installation ne comportant pas de machine hydraulique (pompe ou turbine) on écrira la relation de Bernoulli sous la forme :

$$\boxed{\frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) + \rho g (z_2 - z_1) + (p_2 - p_1) = -\Delta p}$$

Δp représente l'ensemble des pertes de charge entre (1) et (2) exprimées en Pa.

4 - Expression des pertes de charge

4.1 - Influence des différentes grandeurs

Lorsqu'on considère un fluide réel, les pertes d'énergie spécifiques ou bien comme on les appelle souvent, les **pertes de charge** dépendent de la forme, des dimensions et de la rugosité de la canalisation, de la vitesse d'écoulement et de la viscosité du liquide mais non de la valeur absolue de la pression qui règne dans le liquide.

La différence de pression $p = p_1 - p_2$ entre deux points (1) et (2) d'un circuit hydraulique a pour origine :

Les frottements du fluide sur la paroi interne de la tuyauterie ; on les appelle **pertes de charge régulières ou systématiques**.

La résistance à l'écoulement provoquée par les accidents de parcours (coudes, élargissements ou rétrécissement de la section, organes de réglage, etc.) ; ce sont les **pertes de charge accidentelles ou singulières**.

Le problème du calcul de ces pertes de charge met en présence les principales grandeurs suivantes :

Le fluide caractérisé par :

sa masse volumique ρ .

sa viscosité cinématique ν .

Un tuyau caractérisée par :

sa section (forme et dimension) en général circulaire (diamètre D), sa longueur L .

sa rugosité k (hauteur moyenne des aspérités de la paroi).

Ces éléments sont liés par des grandeurs comme la vitesse moyenne d'écoulement v ou le débit q et le nombre de Reynolds Re qui joue un rôle primordial dans le calcul des pertes de charge.

4.2 - Pertes de charge systématiques ou régulières

4.2.1 - Généralités

Ce genre de perte est causé par le frottement intérieur qui se produit dans les liquides ; il se rencontre dans les tuyaux **lisses** aussi bien que dans les tuyaux **rugueux**.

Entre deux points séparés par une longueur L , dans un tuyau de diamètre D apparaît une perte de pression p . exprimée sous la forme suivante :

$$\Delta p = \lambda \frac{\rho v^2 L}{2 D}$$

Différence de pression (Pa)

$$\Delta h = \lambda \frac{v^2 L}{2g D}$$

Perte de charge exprimée en mètres de colonne de fluide (mCF),

λ est un coefficient sans dimension appelé **coefficient de perte de charge linéaire**.

Le calcul des pertes de charge repose entièrement sur la détermination du coefficient λ .

Avec :

Δp Perte de charge dans la conduite en Pa.

λ Coefficient de perte de charge singulière (Sans dimension).

ρ La densité du fluide (En kg/m^3).

v La vitesse du fluide (En m/s).

L Longueur de la conduite (En m).

D Diamètre de la conduite (En m).

4.2.2 - Cas de l'écoulement laminaire : $Re < 2300$

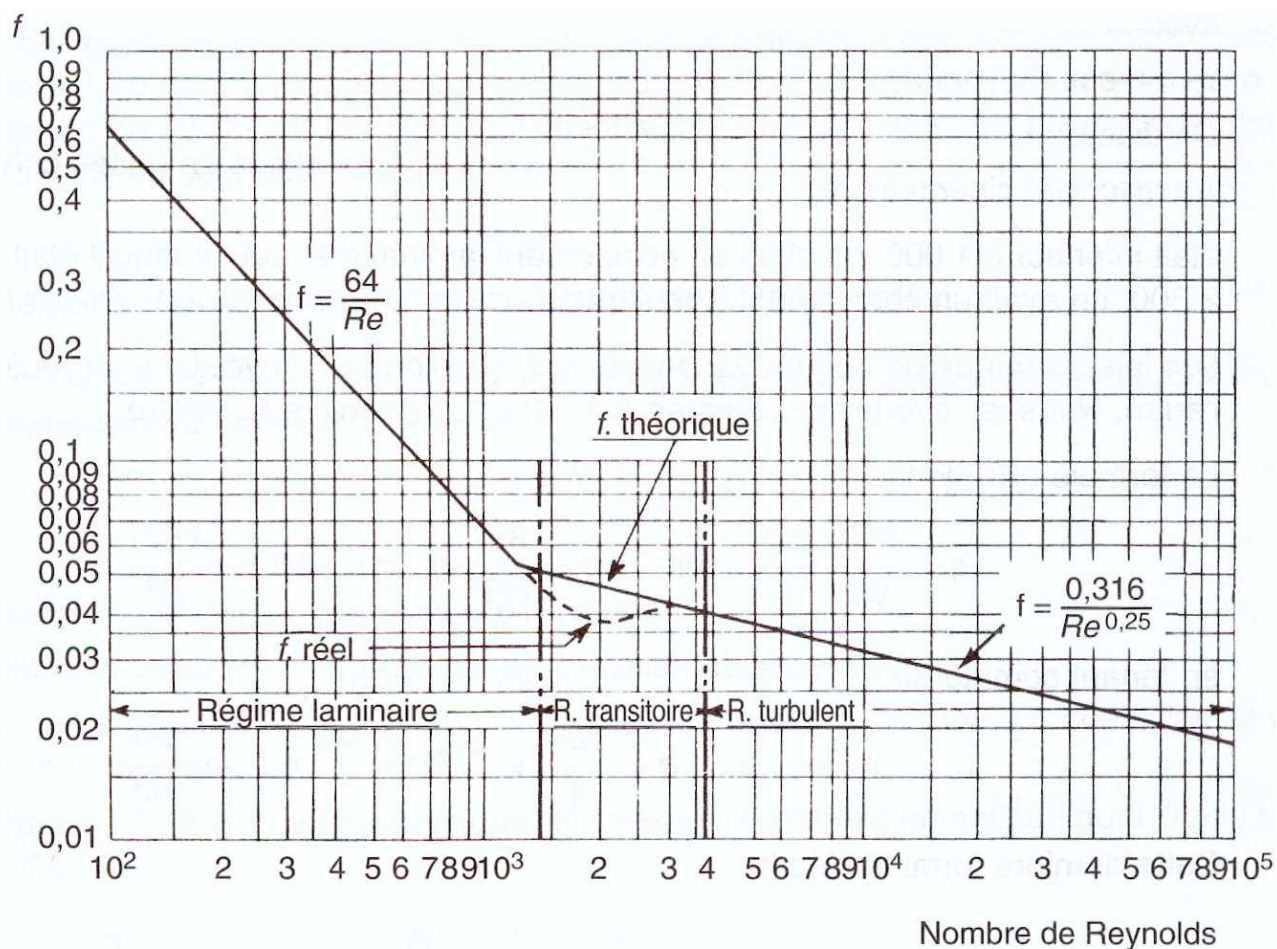
Dans ce cas on peut montrer que le coefficient est uniquement fonction du nombre de Reynolds Re ; l'état de la surface n'intervient pas et donc ne dépend pas de k (hauteur moyenne des aspérités du tuyau), ni de la nature de la tuyauterie. Il est alors immédiat de voir que h est proportionnel à la vitesse v et donc au débit q , ainsi qu'à la viscosité cinématique .

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

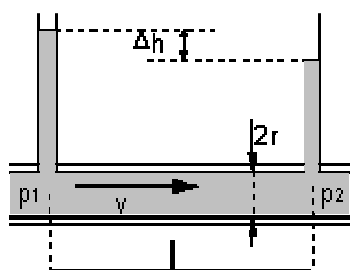
avec

$$Re = \frac{vD}{\nu}$$

Abaque pour la détermination de λ ici f :



4.2.3 - Loi de Poiseuille



Pour un **écoulement laminaire**, dans une conduite cylindrique horizontale, le débit-volume d'un fluide est donné par :

$$Q_v = \frac{\pi r^4}{8\eta L} (p_1 - p_2)$$

avec :

q_v : débit-volume ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$),

r : rayon intérieur (m),

η : viscosité dynamique du fluide (Pa · s),

L : longueur entre les points (1) et (2) (m),

p_1 et p_2 : pression du fluide aux points (1) et (2) (Pa).

4.2.4 - Cas de l'écoulement turbulent : $Re > 3000$

Les phénomènes d'écoulement sont beaucoup plus complexes et la détermination du coefficient de perte de charge résulte de mesures expérimentales. C'est ce qui explique la diversité des formules anciennes qui ont été proposées pour sa détermination.

En régime turbulent l'état de la surface devient sensible et son influence est d'autant plus grande que le nombre de Reynolds Re est grand. Tous les travaux ont montré l'influence de la rugosité et on s'est attaché par la suite à chercher la variation du coefficient en fonction du nombre de Reynolds Re et de la rugosité k du tuyau.

La formule de Colebrook est actuellement considérée comme celle qui traduit le mieux les phénomènes d'écoulement en régime turbulent. Elle est présentée sous la forme suivante :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{k}{3,7 D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right)$$

L'utilisation directe de cette formule demanderait, du fait de sa forme implicite, un calcul par approximations successives ; on emploie aussi en pratique des représentations graphiques (abaques).

De part la forme complexe de cette formule il est impossible d'effectuer directement un calcul, il faudrait le faire par approximations successives, ou encore utiliser des abaques afin de déterminer le coefficient λ .

C'est pour cela que dans la majeure partie des cas on fait appel à des formules empiriques beaucoup plus simples et valables pour des cas particuliers (Dépendant du nombre de Reynolds).

Par exemple pour un $3000 < Re < 10^5$ et pour des tuyauteries lisses, on peut employer la formule de Blasius :

$$\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}}$$

ou

$$\lambda = 0,316 Re^{-0,25}$$

ou encore $\lambda = (100 Re)^{-0,25}$

4.3 - Pertes de charge accidentelles ou singulières

Ainsi que les expériences le montrent, dans beaucoup de cas, les pertes de charge sont à peu près proportionnelles au carré de la vitesse et donc on a adopté la forme suivante d'expression :

$$\Delta p = K \frac{\rho v^2}{2} \quad \Delta h = K \frac{v^2}{2g}$$

Avec :

Δp La perte de charge au travers de l'élément étudié (En Pa).

K Le coefficient fonction de la forme de la zone de passage (Sans dimension) (Cf Tableau des coefficients de formes).

ρ La masse volumique du fluide (En kg/m^3).

v La vitesse du fluide (En m/s).

Lors d'un changement de section et ce d'après le théorème de Bernouilli, la vitesse v_1 à l'entrée est différente de la vitesse v_2 de sortie, on prendra alors la plus grande des deux valeurs.
Perte de charge exprimée en de pression (Pa). Perte de charge exprimée en mètres de colonne de fluide (mCF)

K est appelé coefficient de perte de charge singulière (sans dimension).

La détermination de ce coefficient est principalement du domaine de l'expérience.

2. TECHNOLOGIES COMMUNES DES CAPTEURS D'INSTRUMENTATION

Généralités sur les capteurs

1 – Les fonctions du capteur dans une boucle de régulation

La boucle de régulation contient les quatre impératifs suivants :

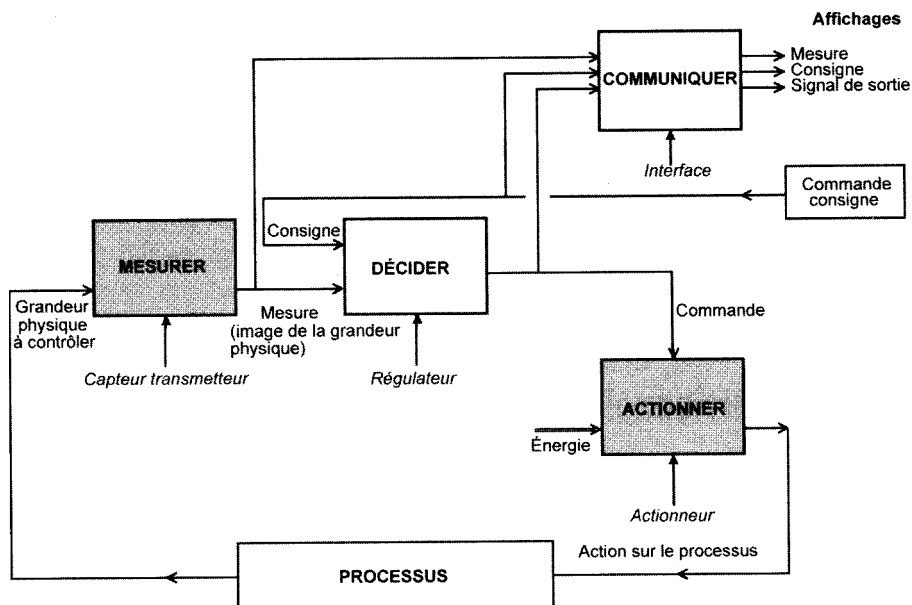
MESURER ; DECIDER ; ACTIONNER ; COMMUNIQUER

La fonction MESURER (assurée par un capteur) permet de connaître la valeur de la grandeur contrôlée en délivrant un signal utilisable par les fonctions situées en aval.

La fonction DÉCIDER (assurée par un régulateur) engendre une commande appropriée permettant de ramener en permanence la grandeur mesurée à la valeur fixée par la consigne, avec des écarts les plus réduits possibles quelles que soient les perturbations agissant sur le processus.

La fonction ACTIONNER (assurée par un actionneur ou organe de réglage) agit sur une grandeur de contrôle du processus capable de ramener la grandeur contrôlée à la valeur de consigne.

La fonction COMMUNIQUER (assurée par une interface spécifique intégrée au régulateur) permet à l'opérateur de connaître les paramètres caractérisant l'état du système, tels que mesure, consigne et signal de commande.



2- Distinction entre capteur et transmetteur

Un capteur est un élément d'un appareil de mesure auquel est directement appliquée une grandeur à mesurer et dont le signal de sortie n'est pas directement utilisable comme signal d'entrée dans une boucle de mesure ou de régulation (comme par exemple un thermocouple délivrant une fem de quelques mV).

Un transmetteur est un appareil de mesure dont l'entrée est issue d'un capteur et dont la sortie est un signal conforme à un standard analogique (0,2-1 bar ou 4-20 mA) ou numérique, directement utilisable dans une boucle de mesure ou de régulation.

Même si dans le langage courant du régleur, le terme capteur est employé à tort pour désigner aussi bien un capteur qu'un transmetteur, il est bon de garder présent à l'esprit que la partie du transmetteur sensible à la grandeur mesurée est le capteur, et que celui-ci doit être choisi judicieusement selon les situations rencontrées.

On peut classer les grandeurs physiques à mesurer en 6 familles, chaque capteur s'associant à l'une de ces 6 familles :

- Mécanique : déplacement, force, masse, débit ... etc...
- Thermique : température, capacité thermique, flux thermique ... etc ...
- Electrique : courant, tension, charge, impédance, diélectrique ... etc ...
- Magnétique : champ magnétique, perméabilité, moment, magnétique ... etc
- Radiatif : lumière visible, rayons X, micro-ondes ... etc ...
- (Bio)Chimique : humidité, gaz, sucre, hormone ... etc

3- Classification des capteurs

On classe les capteurs en deux grandes familles en fonction de la caractéristique électrique de la grandeur de sortie. Cette classification influe sur le conditionneur qui lui est associé.

3.1. Capteurs passifs

Le capteur se comporte en sortie comme un dipôle passif qui peut être résistif, capacitif ou inductif.

MESURANDE	EFFET UTILISE (Grandeur de sortie)	MATERIAUX
Température	Résistivité	Platine, nickel, cuivre, semi-conducteurs
Très basse température	Cste diélectrique	Verre
Flux optique	Résistivité	Semi-conducteurs
Déformation	Résistivité Perméabilité	Alliages nickel Alliages ferromagnétiques
Position	Résistivité	Magnétorésistances : Bismuth, antimoine d'indium
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

Le tableau ci-dessus résume, en fonction du mesurande, les effets utilisés pour réaliser la mesure.

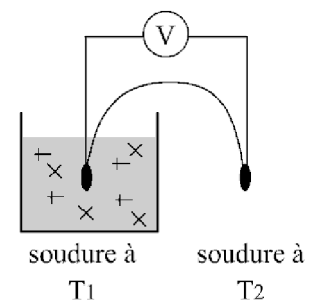
3.2. Capteurs actifs

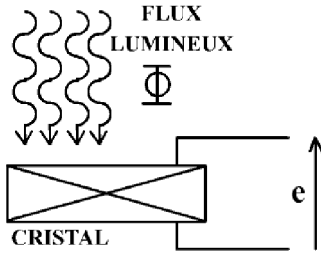
Dans ce cas, la sortie du capteur est équivalente à un générateur. C'est un dipôle actif qui peut être du type courant, tension ou charge. Les principes physiques mis en jeu sont présentés ci-dessous.

MESURANDE	EFFET UTILISE	GRANDEUR DE SORTIE
Température	Thermoélectricité (thermocouple)	Tension
Flux optique	Photoémission Pyroélectricité	Courant Charge
Force, pression, accélération	Piézoélectricité	Charge
Position	Effet Hall	Tension
Vitesse	Induction	Tension

3.3. Décrivons succinctement ces effets ou grandeurs d'influence:

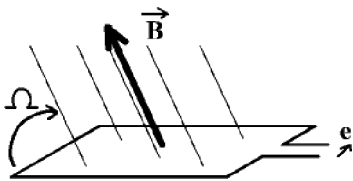
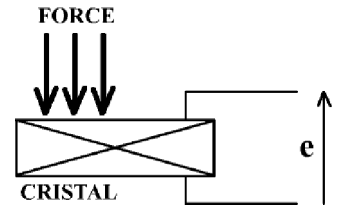
Thermoélectricité : c'est l'effet Seebeck. Un thermocouple est un circuit constitué de deux conducteurs de nature chimique différente et dont les jonctions sont à des températures différentes T_1 et T_2 . Il apparaît aux bornes de ce circuit une tension (force électromotrice) liée à la différence de température.





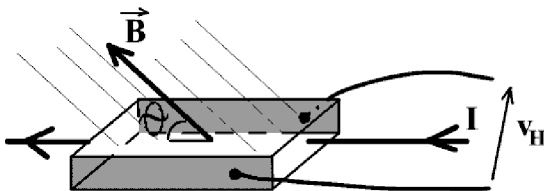
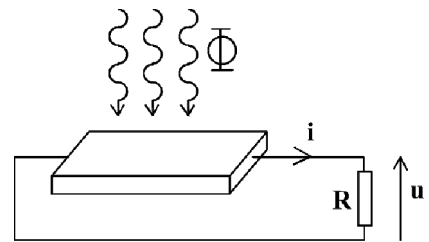
Pyroélectricité : certains cristaux présentent une polarisation électrique proportionnelle à leur température. Ainsi, en absorbant un flux de rayonnement, le cristal pyroélectrique va s'échauffer et ainsi sa polarisation va se modifier entraînant une variation de tension détectable.

Piézoélectricité : l'application d'une force sur ce type de matériau engendre l'apparition de charges électriques créées par la déformation du matériau. C'est un phénomène réversible.



Induction : la variation d'un flux magnétique engendre l'apparition d'une force électromotrice.

Photoélectricité : sous l'influence d'un rayonnement lumineux, le matériau libère des charges électriques (paires électron-trou) et celles-ci en fonction du rayonnement engendrent un courant électrique.



Effet Hall : un semi-conducteur de type parallélépipède rectangle, placé dans une induction B et parcouru par un courant I, voit l'apparition, dans la direction perpendiculaire au courant et à l'induction, d'une d.d.p. qui a pour expression :

$$U_{hall} = K_h \cdot I \cdot B \cdot \sin \theta$$

K est fonction du matériau, et θ est l'angle entre I et B

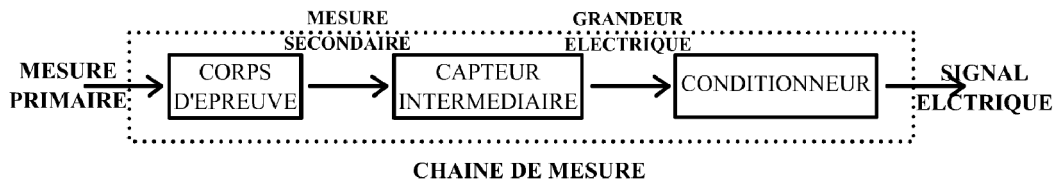
3.4. Le transmetteur ou chaîne de mesure

Pour obtenir une image d'une grandeur physique, on fait appel à une chaîne de mesure qui peut faire intervenir plusieurs phénomènes différents.

Par exemple, la mesure d'un débit peut se faire en plusieurs étapes :

- transformation du débit en une pression différentielle,
- transformation de la pression différentielle en la déformation mécanique d'une membrane,
- transformation de la déformation mécanique en une grandeur électrique (à l'aide d'un piézo-électrique) via un circuit électronique associé.

L'ensemble de ces étapes constitue la chaîne de mesure.



De manière classique la sortie d'une chaîne de mesure est du type électrique. Si la chaîne de mesure fait intervenir plusieurs transducteurs, on appelle corps d'épreuve celui en contact direct avec le mesurande (ou grandeur à mesurer, cf. ci-après).

Le dernier transducteur est associé à un conditionneur qui fournit la grandeur électrique de sortie de manière exploitable.

Le choix de ce conditionneur est une étape importante dans le cadre de la chaîne de mesure car, associé au capteur, il détermine la nature finale du signal électrique et va influencer les performances de la mesure.

Cette chaîne de mesure se présente la plupart du temps « toute intégrée » dans un boîtier (capteur(s) + électronique associée). On parle alors de transmetteur.

Avant d'aborder les performances d'une chaîne de mesure, nous devons préciser ce que nous attendons d'une mesure (et d'ailleurs, qu'est-ce qu'une mesure ? ?). La métrologie est le domaine qui étudie et qui gère les bonnes façons de faire une mesure.

Il nous faut donc maintenant préciser quelques termes de la métrologie

3.5. Les bases de la métrologie

- un capteur génère une information brute, et le concepteur doit être capable de concevoir un ensemble de dispositifs traitant ce signal à destination d'un récepteur chargé d'afficher clairement un résultat interprété.
- le second point est qu'un capteur n'est jamais parfait et qu'il convient de connaître avec la plus grande précision possible son état d'imperfection si l'on veut pouvoir en tenir compte dans une interprétation raisonnable et raisonnée du résultat interprété
- le troisième élément est qu'il existe souvent plusieurs procédés de captage possible a priori et que pour effectuer le meilleur choix il convient d'avoir une idée très précise du contexte de la mesure, mais aussi des caractéristiques des différents capteurs

En conséquence le concepteur d'une chaîne instrumentale doit orienter ses choix en vue du meilleur compromis possible entre les exigences métrologiques, technologiques, économiques, de sécurité, de fiabilité ... qui sont malheureusement le plus souvent contradictoires.

3.5.1 L'objet de la mesure

- LA METROLOGIE : est la science de la mesure.
La métrologie embrasse tous les aspects aussi bien théoriques que pratiques se rapportant aux mesurages, quelle que soit l'incertitude de ceux-ci, dans quelque domaine de la science et de la technologie que ce soit.
- MESURAGE : ensemble d'opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur.
- MESURANDE : grandeur particulière soumise à mesurage

3.6. Une comparaison nécessaire : l'étalonnage

L'ETALONNAGE : C'est l'ensemble des opérations établissant, dans des conditions spécifiées, la relation entre les valeurs de la grandeur indiquées par un appareil de mesure ou un système de mesure, et les valeurs correspondantes de la grandeur réalisées par des étalons.

La métrologie détient les étalons de référence, et elle assure la surveillance qualitative à l'aide des étalons de référence qu'elle détient ou par recours à des organismes agréés ou habilités "chaîne d'étalonnage".

On définit plusieurs types d'étalons :

l'étalon primaire :

Etalon qui est désigné ou largement reconnu comme présentant les plus hautes qualités métrologiques et dont la valeur est établie sans se référer à d'autres étalons de la même grandeur.

l'étalon de référence :

Etalon, en général de la plus haute qualité métrologique disponible en un lieu donné ou dans une organisation donnée, dont dérivent les mesurages qui y sont faits.

l'étalon de transfert :

Etalon utilisé comme intermédiaire pour comparer entre eux des étalons.

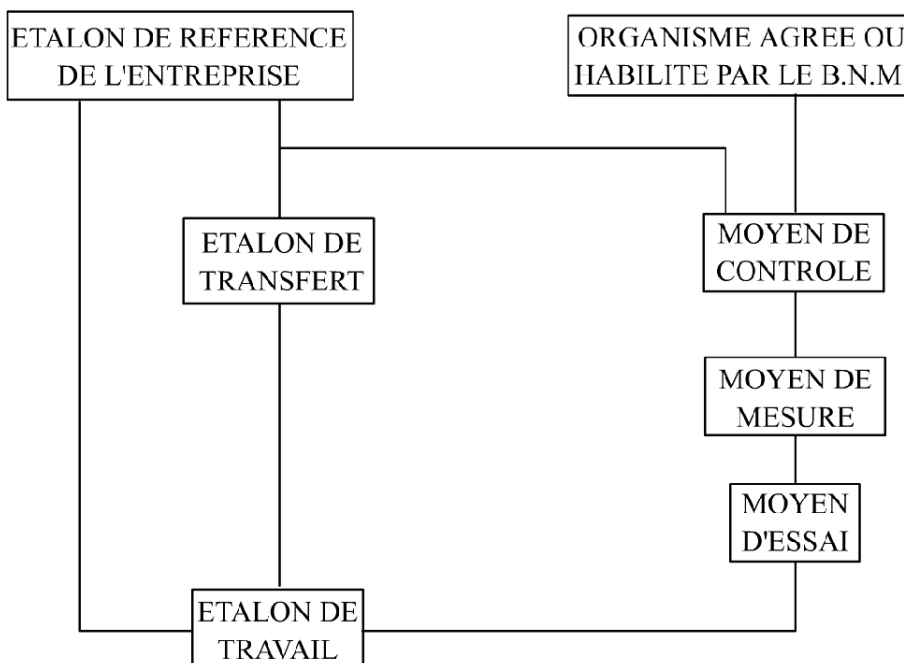
Note : le terme dispositif de transfert doit être utilisé lorsque l'intermédiaire n'est pas un étalon.

l'étalon de travail :

Etalon qui est utilisé couramment pour étalonner ou contrôler des mesures matérialisées, des appareils de mesure ou des matériaux de référence.

Notes :

- un étalon de travail est habituellement étalonné par rapport à un étalon de référence
- un étalon de travail utilisé couramment pour s'assurer que les mesures sont effectuées correctement est appelé étalon de contrôle
- les étalons doivent être eux aussi soumis à des vérifications régulières(ou remplacés par d'autres étalons plus précis).



La hiérarchie du système d'étalonnage peut être représentée par une chaîne du type de celle ci-dessus.

3.6.1. Le domaine de validité d'une mesure

INCERTITUDE DE MESURE : étroitesse de l'accord entre le résultat d'un mesurage et la valeur vraie du mesurande.

Les incertitudes de mesurage sont les paramètres qui caractérisent la dispersion des valeurs lors d'un mesurage. L'étude des incertitudes a donc pour objectif de déterminer les capacités des moyens de mesures.

Il y a lieu de distinguer deux sources d'incertitudes :

- L'incertitude liée à la méthode et aux moyens d'étalonnage.
Lors de la mise en place d'une méthode d'étalonnage, il faut procéder à la qualification métrologique de la méthode. Cette opération se fonde sur des essais techniques et sur une analyse objective des causes d'incertitudes. Cette incertitude est elle-même déterminée à partir de plusieurs composantes provenant notamment du montage des étalons et des instruments utilisés, des conditions d'environnement.

- L'incertitude liée à l'instrument à étalonner.
Cette incertitude est déterminée à partir des caractéristiques propres de l'instrument dont notamment la fidélité et l'erreur de lecture ou de quantification.

Note : L'incertitude de mesure comprend, en général, plusieurs composantes. Certaines peuvent être estimées en se fondant sur la distribution statistique des résultats de séries de mesurage et peuvent être caractérisées par un écart type expérimental. L'estimation des autres composantes ne peut être fondée que sur l'expérience ou sur d'autres informations.

3.7. Normalisation des signaux

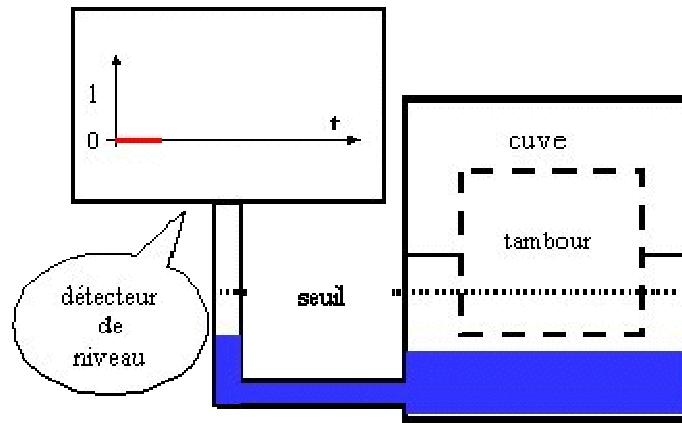
Dans la très grande majorité des cas, les signaux issus d'un capteur seront électriques, ce qui veut dire qu'ils peuvent être des tensions comme des courants.

Il peut y avoir trois types de signaux de sortie différents :

- Signal binaire ;
- Signal analogique ;
- Signal numérique.

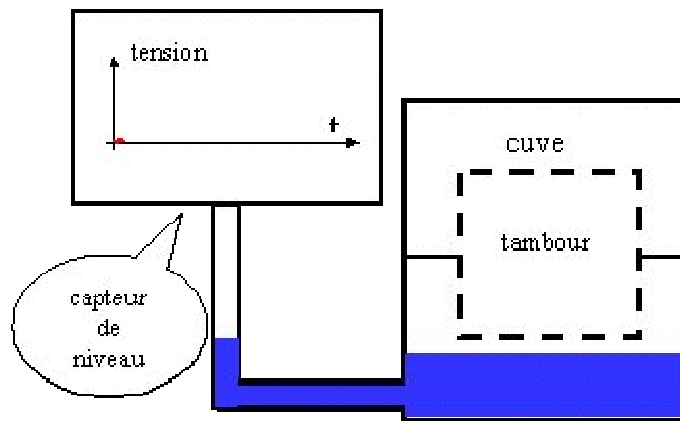
3.7.1. Les signaux TOR (Tout ou rien)

Ils génèrent un signal de type binaire (donc deux états). L'avantage est qu'ils sont peu coûteux mais ils sont spécialisés dans un type précis de mesure. Par exemple ils peuvent dire si une pièce est présente ou non, si le tapis roulant est bien en fonctionnement, si l'appareil se trouve à 20 cm ou pas d'un mur. Ils ne permettent pas de mesurer sur toute une plage.



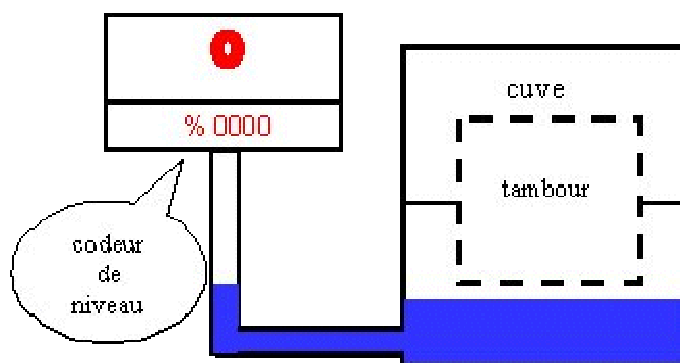
3.7.2. Les signaux analogiques

La grandeur de sortie est en relation directe avec la grandeur d'entrée. Dans ce cas le capteur doit être linéaire sinon nous aurions un signal déformé. L'avantage est que nous avons la possibilité de mesurer sur toute une plage et non pas simplement un seuil.



3.7.3. Les signaux numériques

Ce type de capteur délivre en sortie une information électrique à caractère numérique, image de la grandeur physique à mesurer, c'est à dire ne pouvant prendre qu'un nombre limité de valeurs distinctes (comme tout signal numérique...). Le signal de sortie peut être récupéré en série ou en parallèle.



3.8. Technologie de branchement

3.8.1. Technique 2 fils

- Alimentation peut se réaliser en courant continu (DC) ou en courant alternatif (AC)

- La charge peut être une entrée d'un automate ou la bobine d'un relais

- Fonctionnement, lorsque la pièce à détecter perturbe le champ émis en continu par le détecteur, le transistor se sature (ou le thyristor est amorcé) et commande la charge.

- Remarque, les détecteurs de proximité (capteurs électroniques) ont besoin d'une alimentation spéciale pour fonctionner.

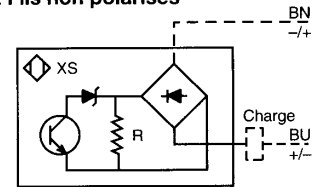
- Les détecteurs de proximité transmettent un signal image d'une pièce détectée ou non.

- Le signal est transmis par le détecteur à l'unité de traitement par les fils d'alimentation.

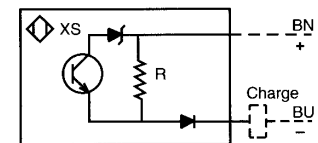
- Les détecteurs sont donc soumis à un courant résiduel et à une tension de déchet.

*BN: fil Brun ** BU : fil Bleu

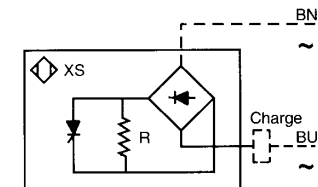
DC 2 Fils non polarisés



DC 2 Fils polarisés



AC 2 Fils



3.8.2. Technique 3 fils

Les détecteurs de proximité "3 fils" comprennent:

- 2 fils d'alimentation (+) et (-) de l'appareil

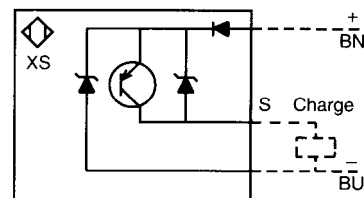
- 1 fil pour la transmission du signal de sortie

Ils sont de deux types:

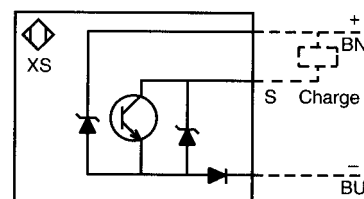
- Modèle PNP: commutation du potentiel (+) sur la charge

- Modèle NPN: commutation du potentiel (-) sur la charge

Type 3 fils PNP



Type 3 fils NPN



3.9. La qualité d'un appareil de mesures

Tous les appareils de mesure ne se valent pas, et le choix de l'instrument de mesure dépend de la précision attendue sur la valeur de la grandeur. Citons trois qualités importantes (ce ne sont pas les seules...) :

- Fidélité (d'un instrument de mesure): aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications très voisines lors de l'application répétée du même mesurande dans les mêmes conditions de mesure.

-

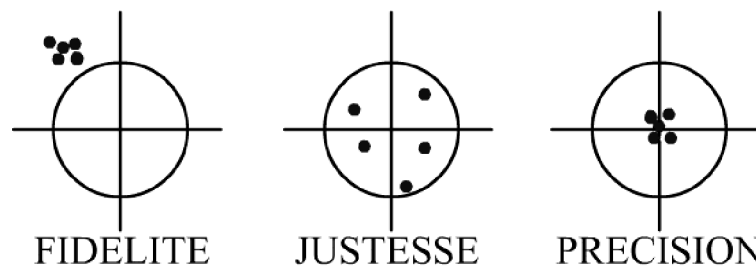
QUALITE LIEE A L'ECART TYPE D'UNE SERIE DE MESURES

- Justesse (d'un instrument de mesure): aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications exemptes d'erreur systématique.

QUALITE LIEE A LA VALEUR MOYENNE D'UNE SERIE DE MESURES

- Précision (d'un instrument de mesure) : aptitude d'un instrument de mesure à donner une indication très proche de la valeur vraie de la grandeur

QUALITE LIEE A L'ECART RELATIF



4. Le transmetteur et son environnement

Selon le processus dans lequel est placé le transmetteur, celui-ci devra être apte à « survivre » au sein de cet environnement.

Cet environnement peut avoir une énorme influence sur :

- l'usure du transmetteur
- les mesures fournies par ce transmetteur
- la sécurité des personnes et matériels interagissant avec le processus

Le constructeur fournit, dans la documentation du transmetteur toutes les données et conditions limites d'emploi de celui-ci.

Mais il importe de passer en revue les principales catégories de contraintes pouvant agir sur un transmetteur (toutes ces catégories sont l'objet de normes, et les paragraphes ci-après sont loin d'être exhaustifs ! !).

4.1. Conditions de service et conditions d'étude

Ce sont les conditions qui portent essentiellement sur les pressions et les températures supportables par le transmetteur.

- les conditions de service concernent « l'exploitation normale » de l'appareil. Ainsi, la pression normale et la température normale d'utilisation sont encadrées par un minima et un maxima d'utilisation
- les conditions d'étude sont relatives à des pointes exceptionnelles de pression et de température

4.2. Corrosion

La corrosion est la destruction plus ou moins rapide d'un matériau métallique sous l'effet d'agents atmosphériques, de l'eau de mer, etc.

- Certains métaux comme l'or, le platine sont insensibles à la corrosion.
- D'autres métaux se combinent avec le dioxygène ou le dioxyde de carbone de l'air pour donner des produits adhérents et imperméables ; ce sont des oxydes ou des hydrocarbonates qui forment une fine couche protectrice insensible à la corrosion. C'est le cas de l'aluminium, du chrome, du titane, du silicium (protégés par des oxydes), du zinc, du plomb, du cuivre (protégés par des hydrocarbonates : «vert de gris» dans le cas du cuivre).
- Par contre le fer, la majorité des alliages ferreux (aciers non inoxydables, fontes) exposés à l'air humide se couvrent de rouille (composée par divers oxydes de fer hydratés). Plus de 20% de la production mondiale d'acier « disparaît » annuellement sous forme de rouille ! ! !

La corrosion ne se produit qu'en milieu humide.

La corrosion du fer est due à l'établissement dans le métal de piles électrochimiques, appelées micropiles (là où il y a hétérogénéité de la surface).

Ainsi, les fluides du processus sont des électrolytes en contact avec des pièces du transmetteur.

Il y a donc, pour ce phénomène, nécessité de consulter la « doc constructeur »

4.3. La Norme ATEX (ATmosphères Explosives)

4.3.1 Vocabulaire :

Un incendie, une explosion sont des réactions chimiques.

L'incendie est une combustion vive avec émission de lumière, de flammes et de chaleur.

L'explosion est une combustion très vive, instantanée qui se traduit par une brusque montée en pression localement (ainsi qu'en température)

On appelle :

- atmosphère explosive : un mélange avec l'air, dans des conditions atmosphériques de substances inflammables sous forme de gaz, vapeurs, poussières, dans lequel, après inflammation la combustion se propage à l'ensemble du mélange non brûlé.
- atmosphère explosible : une atmosphère susceptible de devenir explosive par suite des conditions locales et opérationnelles.

4.3.2. Pour des risques d'explosions liés à la présence de gaz ou liquides inflammables :

Les données importantes sont précisées dans les définitions ci-dessous.

- Point éclair : température la plus basse d'un liquide à laquelle, dans certaines conditions normalisées, ce liquide libère des vapeurs en quantité telle qu'un mélange vapeur/air inflammable puisse se former.

Exemples :

oxyde d'éthylène : - 57°C
éther éthylique : - 45°C
essence (io 100) : - 37°C
sulfure de carbone : - 30°C

acétone : - 17°C
éthanol à 100% : - 12°C
gasoil : +55°C

- Limite Inférieure d'Explosivité (L.I.E.) : concentration dans l'air de gaz, vapeurs ou brouillard inflammables, au dessous de laquelle une atmosphère explosive gazeuse ne se forme pas.
- Limite Supérieure d'Explosivité (L.S.E.) : concentration dans l'air de gaz, vapeurs ou brouillard inflammables, au dessus de laquelle une atmosphère explosive gazeuse ne se forme pas. L'inflammation d'une atmosphère explosive n'est donc possible que pour des valeurs de concentration dans l'air comprise entre ces deux limites.

Quelques limites explosives :

nature du carburant	LIE(%)	LSE(%)
acétone	2.6	13
butane	1.8	8.4
oxyde d'éthylène	3.5	100
oxyde de propylène	2.8	37
oxyde de carbone	2.5	74
éthanol	3.3	19
essence (io 100)	1.4	7.4
éther éthylique	1.9	36
hydrogène	4	75
méthane	5	15

- Température d'inflammation ou d'auto-inflammation : température la plus basse d'une surface chaude à laquelle dans des conditions spécifiées, l'inflammation d'une substance inflammable sous la forme d'un mélange de gaz ou de vapeur avec l'air peut se produire.

Quelques exemples :

hydrogène : 560°C	éthanol : 363°C
acétone : 465°C	butane : 287°C
essence (io 100) : 460°C	éther éthylique : 160°C
oxyde d'éthylène : 430°C	sulfure de carbone : 102°C

- Les classes de température : le matériel électrique pour atmosphère explosive doit être choisi de façon que sa température maximale de surface soit toujours inférieure à la température d'inflammation de l'atmosphère explosive concernée.

La température maximale de surface est la température la plus élevée atteinte en service dans les conditions les plus défavorables par toute partie et toute surface d'un matériel pouvant provoquer une inflammation de l'atmosphère environnante.

La température maximale de surface classée de T1 à T6 est à choisir parmi les valeurs ci-dessous :

Classe de température	Température maximale de surface
T1	450° C
T2	300° C
T3	200° C
T4	135° C
T5	100° C
T6	85° C

Par exemple le point d'inflammation de l'acétylène est de 305° C , on choisira la classe T3 (200° C) pour le matériel, et non T2 (300° C) qui est trop voisine de la température d'inflammation considérée.

- Les modes de protection : dans le domaine des matériels utilisables en atmosphère explosive gazeuse, il existe actuellement sept modes de protection reconnus et ayant fait l'objet de normes publiées par le CENELEC et l'UTE. Ces modes de protection sont résumés dans le tableau ci-dessous:

SYMBOLE	MODE DE PROTECTION	PRINCIPE
"p«	surpression interne EN 50 016	Mode de protection du matériel électrique consistant à obtenir la sécurité au moyen d'un gaz de protection maintenu à une pression supérieure à celle de l'atmosphère environnante.

" o "	immersion dans l'huile EN 50 015	Mode de protection du matériel électrique dans lequel tout ou une partie de celui-ci est immergé dans l'huile de telle sorte qu'une atmosphère explosive gazeuse se trouvant au dessus du niveau de l'huile ou à l'extérieure de l'enveloppe ne puisse être enflammée par ce matériel
" m "	encapsulation EN 50 028	Mode de protection dans lequel les pièces qui pourraient enflammer une atmosphère explosive par des étincelles ou par des échauffements, sont enfermées dans un compound de telle manière que cette atmosphère explosive ne puisse s'enflammer
" e "	sécurité augmentée EN 50 019	Mode de protection consistant à appliquer des mesures afin de fournir une sécurité augmentée, contre la possibilité de températures excessives et l'apparition d'arcs ou 'étincelles à l'intérieur et sur les parties externes du matériel électrique qui ne produit pas d'arcs ou d'étincelles en service normal
" i "	sécurité intrinsèque EN 50 020 Systèmes électriques de sécurité intrinsèque EN 50 039	Circuit de sécurité intrinsèque dans lequel toute étincelle ou tout effet thermique se produisant, soit normalement soit dans les conditions de défaut spécifiées, est incapable dans les conditions d'essais spécifiées de provoquer d'une vapeur ou d'un gaz donné. Cette solution met souvent en œuvre des barrières de sécurité utilisées entre un circuit de sécurité intrinsèque et un circuit qui ne l'est pas, afin de limiter la tension et le courant dans les circuits de sécurité intrinsèque à des niveaux qui ne puissent pas provoquer d'inflammation. Ce mode de protection, limitée au dispositif de faible puissance, s'applique d'une façon générale, qu'aux circuits à courants faibles. Selon le nombre de défauts tolérés pour altérer la fonction sécurité on distingue 2 catégories : Ia : 2 défauts admis Ib : 1 défaut admis
" q "	remplissage pulvérulent EN 50 017	Mode de protection du matériel électrique dans lequel l'enveloppe est remplie d'un matériau à l'état pulvérulent de caractéristiques normalisées de manière telle que, dans les conditions prévues à la construction, une arc ou une température élevée se produisant à l'intérieur de l'enveloppe ne puisse provoquer l'inflammation de l'atmosphère gazeuse environnante
" d "	enveloppe antidéflagrante EN 50 018	Mode de protection du matériel électrique dans lequel l'enveloppe est capable de supporter l'explosion interne d'un mélange inflammable ayant pénétré à l'intérieur sans subir d'avarie de structure et sans provoquer par ses joints ou autres communications, l'inflammation de l'atmosphère explosive extérieure composée de l'un ou l'autre des gaz ou vapeurs pour lesquels elle est conçue.

4.4. Compatibilité électromagnétique (C.E.M.)

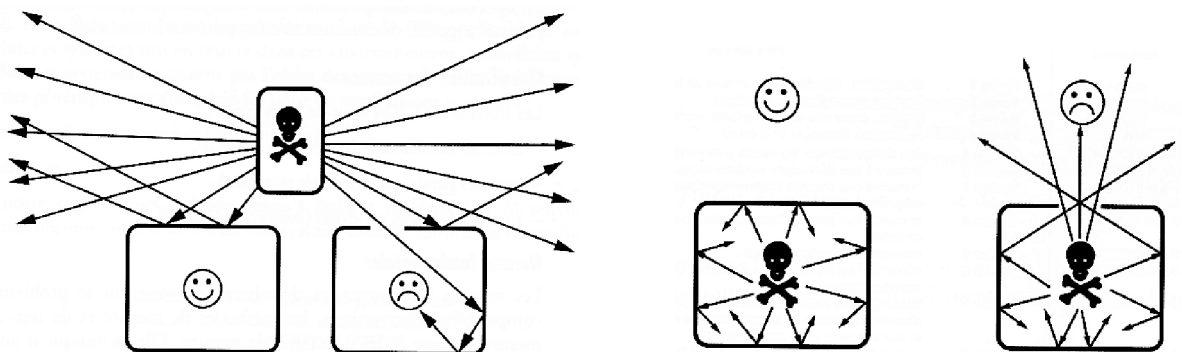
Bien qu'échappant totalement aux sens de l'être humain (donc aux régleurs en particulier) cette compatibilité électromagnétique ne doit pas être oubliée lors de la mise en place d'un transmetteur.

En effet, les champs électromagnétiques sont présents absolument partout, à des intensités plus ou moins fortes selon les lieux. Les câbles électriques en émettent, mais aussi les substances radioactives, ainsi que toute source de lumière

On appelle compatibilité électromagnétique (CEM) l'aptitude d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système à fonctionner dans un environnement électromagnétique de façon satisfaisante et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement.

Dans chacun des cas, on distingue les perturbations rayonnées et les perturbations conduites par les câbles d'alimentation et d'entrées-sorties.

La compatibilité électromagnétique est exigée aussi bien pour la protection vis à vis de l'extérieur que pour prémunir l'extérieur des ondes E.M. émises par l'appareil.



Depuis le le janvier 1996, l'Union Européenne exige, par sa directive CEM 89/336/CEE, que les produits électrotechniques respectent des exigences minimales en matière de résistance au brouillage et d'émissions parasites .

En conséquence, tout matériel électrique doit faire l'objet d'essais par un organisme compétent afin d'obtenir une attestation CE (Communauté Européenne) de compatibilité électromagnétique (CEM) conforme aux normes. Le marquage CE de conformité est apposé sur le matériel.

4.5. Les indices de protection IP

Le code **IP** (International Protection) spécifie le degré de protection d'un équipement pour:

- la **protection des personnes** contre les contacts directs,
- la **protection des matériels** contre certaines influences externes.

Il comporte les lettres IP suivies de deux chiffres indépendants.

Le premier chiffre caractérise le degré de protection des personnes **contre l'accès aux parties dangereuses** et le degré de protection des matériels **contre la pénétration des corps étrangers**.

Le deuxième chiffre indique le degré de protection **contre les effets nuisibles de la pénétration de l'eau douce**.

Le code IP peut comporter des lettres additionnelles.

IP	1 ^{er} chiffre	2 ^e chiffre
	matériel protégé contre les :	
-	corps solides	corps liquides
0	non protégé	non protégé
1	supérieurs à 50 mm de diamètre	gouttes d'eau verticales
2	supérieurs à 12,5 mm de diamètre	gouttes d'eau à 15° de la verticale
3	supérieurs à 2,5 mm de diamètre	eau en pluie
4	supérieurs à 1 mm de diamètre	projections d'eau
5	poussières sans dépôt nuisible	jets d'eau
6	poussières	paquets de mer
7	-	immersions temporaires
8	-	immersions prolongées

Exemple : IP20
protégé contre les corps solides supérieurs à 12,5mm,
pas de protection contre les liquides.

Exemple : IP66
protégé contre les poussières,
protection contre les paquets de mer.

4.6. Schéma de tuyauterie et d'instrumentation

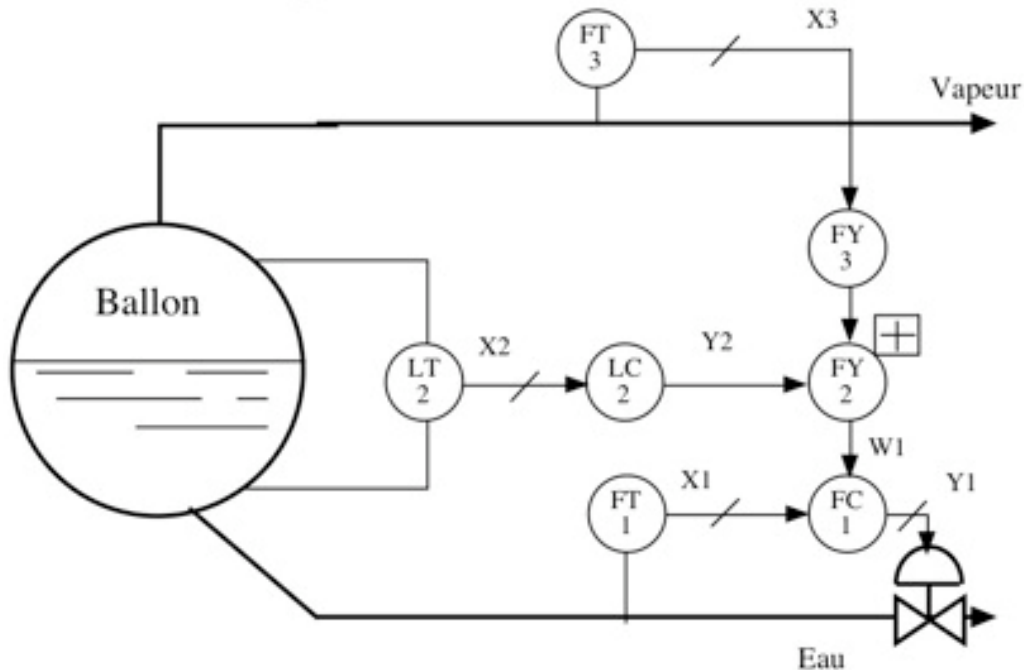
Le processus est décrit dans un « schéma mécanique » souvent désigné sous le vocable anglais de P & ID (Process and Instrumentation Diagram) qui se traduit par « schéma de tuyauteries et instrumentation du processus » ou schéma TI.

Un tel schéma TI utilise des symboles normalisés représentant sans ambiguïté les différents composants du processus :

- les équipements propres au processus lui- même,
- les équipements nécessaires au contrôle du processus.

Les équipements propres au processus lui- même sont :

- les équipements statiques pour les opérations de transport et de stockage (tuyauteries, bacs),
- les équipements dynamiques pour les opérations de transformation (fours, tours de distillation séparateurs, échangeurs, etc.)



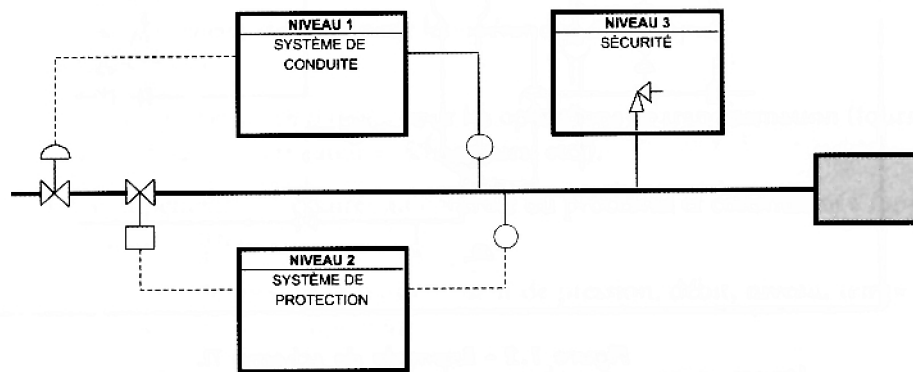
Les équipements nécessaires au contrôle du processus et constituant l'instrumentation comportent :

- des prises de mesure (essentiellement de pression, débit, niveau, température) disposées sur les équipements,
- des instruments de mesure (indicateurs locaux, transmetteurs),
- des organes de contrôle (régulateurs),
- des organes de sécurité (alarmes, systèmes de commandes automatiques),
- des organes de commande permettant de moduler ou de sectionner les flux de matières (vannes motorisées de sectionnement, vannes régulatrices, pompes, ventilateurs, etc.), des organes de protection (soupapes).

Sur le seul plan de l'instrumentation, pendant le développement d'un projet, le schéma TI prend successivement des formes allant du plus simple au plus compliqué. Le schéma ci-dessus donne une représentation simplifiée d'un processus, l'instrumentation étant limitée aux concepts mais pas encore à la réalisation pratique.

4.7. Hiérarchie des systèmes de contrôle

Tout processus doit être équipé de systèmes de contrôle hiérarchisés de la façon suivante :



Niveau 1 : système de conduite
Niveau 2 : système de protection
Niveau 3 : système de sécurité

Le niveau 1 comprend essentiellement l'instrumentation de contrôle du processus : capteurs (mesures), régulateurs, programmeurs, vannes régulatrices.

Ce niveau 1 assure la conduite soit de façon permanente (processus continu), soit selon une séquence par commandes programmées (processus de fabrication par batch) initialisée par l'opérateur.

Le niveau 2 comprend essentiellement une instrumentation de composition voisine de celle du niveau 1, mais totalement indépendante fonctionnellement de ce niveau.

Ce niveau 2 assure la protection du processus selon une fonction discontinue non systématique, c'est-à-dire non initialisée par l'opérateur, à partir d'informations de dépassement de seuils sur des paramètres critiques du processus.

Le niveau 3 constitue la protection ultime du processus. Il ne contient pas d'instrumentation identique à celles des niveaux 1 et 2, mais des dispositifs fonctionnant sans énergie auxiliaire (soupapes, disques de rupture).

4.8. Grandeurs à contrôler

Les principales grandeurs physiques à contrôler (maîtriser) sur un processus industriel sont au nombre de quatre, désignées par une lettre majuscule (initiale; du mot anglais)

P (PRESSURE)	PRESSION
F (FLOW)	DÉBIT
L (LE VEL)	NIVEAU
T (TEMPERATURE)	TEMPÉRATURE

D'autres grandeurs physiques ou chimiques peuvent aussi être mesurées ou

« analysées » : A ANALYSE

L'« analyse » effectuée peut être :

- la mesure d'une qualité spécifique d'un corps (masse volumique, viscosité, pression de vapeur, etc.),
- la détection du changement d'état d'un corps (solidification, vaporisation, etc.),
- la composition chimique d'un corps (en général partielle) ou la teneur d'un seul composant dans un mélange,
- le pH d'une solution (dissociation ionique).

4.9.Symbolisation et repères d'identification

La schématisation TI s'appuie sur la norme NF E 04-203 « régulation, mesure et automatisme des processus industriels – représentation symbolique ».

Cette norme réunit les deux types de représentations graphiques : la représentation ISA (Instrument Society of America) et la représentation d'inspiration européenne.

C'est la représentation ISA qui est la plus utilisée, et c'est celle qui est employée dans ce cours.

Un symbole par fonction


INSTRUMENTS DISCRETS

Formes 1 et 2

-  Instrument local
-  Instrument sur tableau en salle de contrôle
-  Instrument sur tableau local

SYSTÈME NUMÉRIQUE (SNCC*)

Formes 1 et 2

-  Affichage vidéo et commandes en salle de contrôle

AUTOMATE PROGRAMMABLE

Formes 1 et 2

-  Inaccessible

Raccordement d'un instrument local sur le processus

SYMBOLE

FI
237

Cercle en trait fin d'environ 10 mm de diamètre

Un codet** indique


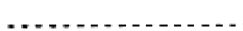

- la propriété mesurée (F)
- la fonction (I),

et est complété par un N° d'identification.

* Système Numérique de Contrôle-Commande
 **Codet: lettres de codification juxtaposées



LIAISONS

Forme 1

-  logiciel ou bus
-  électrique
-  pneumatique

ACTIONNEURS AUTOMATIQUES

Forme 1

-  à membrane simple effet
-  à piston double effet

CODETS SERVANT A L'IDENTIFICATION DES VARIABLES ET DES FONCTIONS :

	Première lettre :	Lettres suivantes :		
	VARIABLE MESUREE	AFFICHAGE (fonction passive)	FONCTION COMPLEMENT	
A	Analyse	Alarme		
B	Combustion (flamme)			
C	Conductivité (note 2)		régulateur	
D	Masse volumique (note 2)			Différence (note 3)
E	Tension	Elément primaire		
F	Débit			Proportion (note 3)
G	(note 1)	A glace		
H	Commande manuelle			Haut
I	Courant (électrique)	Indicateur		
J	Puissance			

K	Temps			
L	Niveau	Voyant lumineux		Bas
M	Humidité (note 2)			
N	Viscosité (note 2)			
O	(note 1)			
P	Pression			
Q	Quantité	Totaliseur		
R	Rayonnement	Enregistreur		
S	Vitesse		commutateur	
T	Température		Transmetteur	
U	Variables multiples			
V	Vibration		Vanne	
W	Masse ou force			
X	(note 1)			
Y	Événement			
Z	position			

NOTES :

- 1 lettre laissée au libre choix de l'utilisateur
- 2 lettre laissée au libre choix de l'utilisateur si la variable répertoriée n'est pas utilisée
- 3 en complément à la 1 lettre d'identification (ex : PDI)

4.10. Interface de programmation HART

Le protocole hart est un protocole de communication sur boucle de courant continu.

En général un appareil utilisant le protocole Hart est un capteur ou un actionneur analogique reliés aux entrées/sorties 0-20 ou 4-20mA d'un automate industriel.

Si l'on dispose d'une console de programmation Hart ou d'un logiciel sur PC + interface Hart, on peut récupérer des informations, recalibrer l'appareil, forcer le signal transmis à l'automate.

La communication se fait par modulation de fréquence sur le courant porteur. L'avantage est que l'information transmise n'est pas modifiée ni ralentie pendant la communication.

Pourquoi module-t-on un signal ?

La réception d'un signal nécessite des antennes dont les dimensions dépendent de la longueur d'onde du signal (en général de l'ordre de $\lambda / 2$).

Un signal haute fréquence HF sera facilement transmissible [H.F correspond à des fréquences $F > 100$ MHz soit des longueurs d'onde $\lambda = c / F$ donc $l < 3.108 / 108 = 3m$; soit une antenne de longueur inférieure à 3m .

Par contre , pour les signaux B.F ($f < 20$ Hz) la longueur d'onde sera beaucoup plus grande et cela nécessiterait des antennes démesurées et le signal serait rapidement atténué.

Exemple : Pour $f = 10 \text{ Hz}$, $\lambda = 3.104 \text{ m}$ soit une antenne de 15 km. Le but de la modulation est de translater le spectre d'un signal B.F [sons, musique , parole] vers les H.F pour pouvoir le transmettre facilement par voie hertzienne. La radio , la Télévision , les lignes téléphoniques utilisent le procédé de modulation . Le signal H.F est appelé PORTEUSE . Le signal B.F est appelé **SIGNAL MODULATEUR** .

On peut procéder de deux manières :

1. Modulation d'amplitude de la porteuse
2. Modulation de la fréquence du signal H.F :

L'amplitude d'un signal modulé en amplitude est souvent modifiée par les parasites dus essentiellement aux interférences avec les autres stations émettrices. On a cherché alors à moduler la fréquence du signal en laissant son amplitude constante : c'est la modulation de fréquence. La modulation de fréquence présente un autre avantage : sa puissance d'émission reste constante.

3. CHAMPS D'APPLICATION SPECIFIQUES

Les différents capteurs

1. Les mesures de position

1.1. Les détecteurs de position

Les interrupteurs de position sont présents dans toutes les installations automatisées ainsi que dans les applications variées en raison de leurs nombreux avantages inhérents à leur technologie.

Ils transmettent au système de traitement les informations de :

- **Présence / absence**
- **Passage**
- **Positionnement**
- **Fin de course**

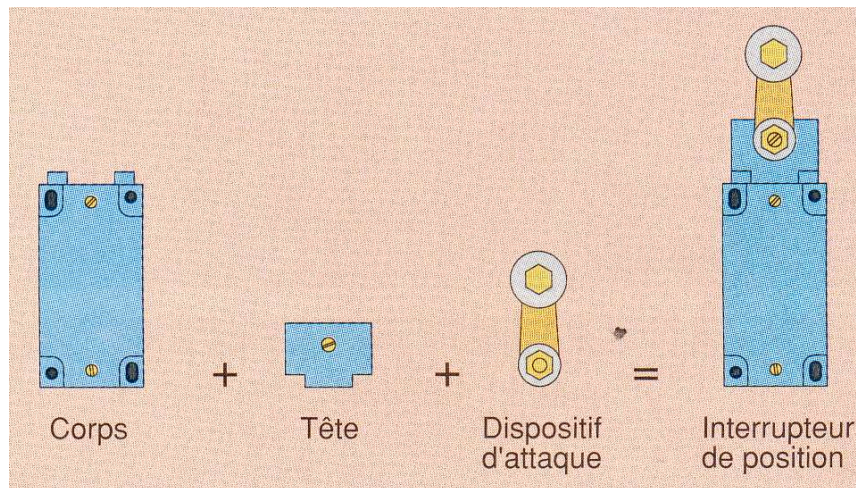
Ce sont des appareils d'une grande simplicité de mise en œuvre, offrant bien des avantages :

Du point de vue électrique	Du point de vue mécanique
<ul style="list-style-type: none">➤ Une séparation galvanique des circuits➤ Une très bonne aptitude à commuter des courants faibles charges➤ Une très bonne tenue au court-circuit➤ Une immunité totale aux parasites➤ Une tension d'emploi élevée	<ul style="list-style-type: none">➤ Une manœuvre positive d'ouverture des contacts➤ Une grande résistance aux ambiances industrielles➤ Une bonne fidélité jusqu'à 0.01mm sur les points d'enclenchements

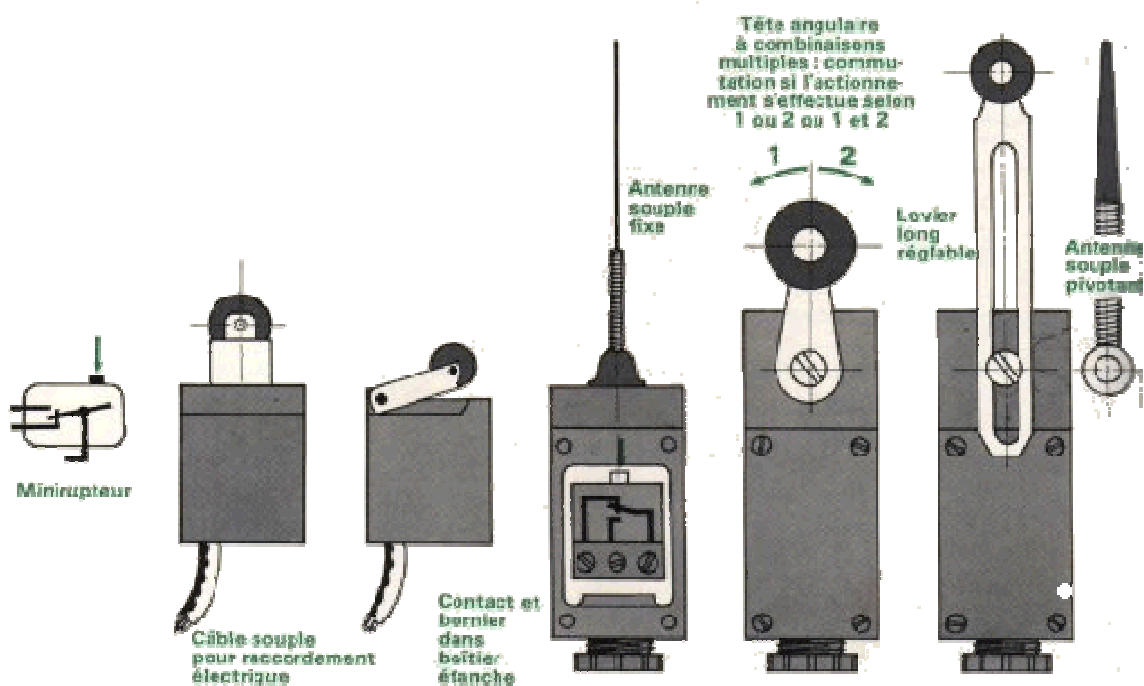
1.2. Constitution des interrupteurs :

Les interrupteurs de position sont constitués à partir des trois éléments de base suivants :

- Un contact électrique.(inséré dans le corps du capteur).
- Un corps.(Métallique ou thermoplastique).
- Une tête de commande avec son dispositif d'attaque.



Les modèles :



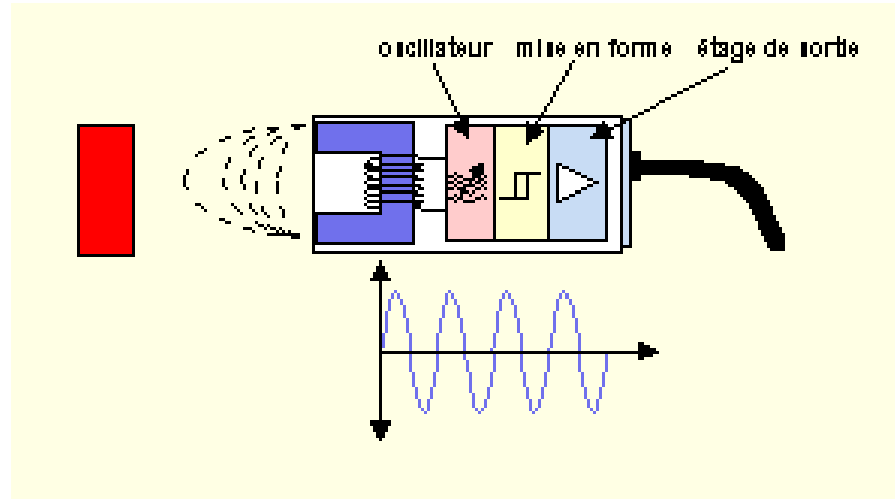
1.3. Les détecteurs inductifs



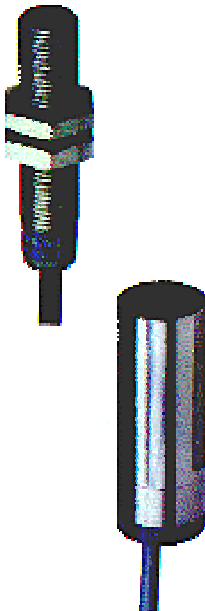
Ce type de capteur est réservé à la détection sans contact d'objets métalliques.

L'objet est donc à proximité du capteur mais pas en contact contrairement à un détecteur de position.

Schéma de principe :



1.4. Les détecteurs capacitifs



Les détecteurs capacitifs présentent l'avantage de pouvoir détecter à courte distance la présence de tous types d'objets.

L'objet est donc à proximité du capteur mais pas en contact contrairement à un détecteur de position

1.5. Les détecteurs de proximité photo électrique

Un détecteur photoélectrique réalise la détection d'une cible, qui peut être un objet ou une personne, au moyen d'un **faisceau lumineux**.

Les détecteurs photoélectriques se composent essentiellement d'un émetteur de lumière associé à un récepteur photosensible.

La détection est effective quand l'objet pénètre dans le faisceau lumineux et modifie suffisamment la quantité de lumière reçue par le récepteur pour provoquer un changement d'état de la sortie

Elle est réalisée selon deux procédés :



-blocage du faisceau par la cible.

-renvoi du faisceau sur le récepteur par la cible

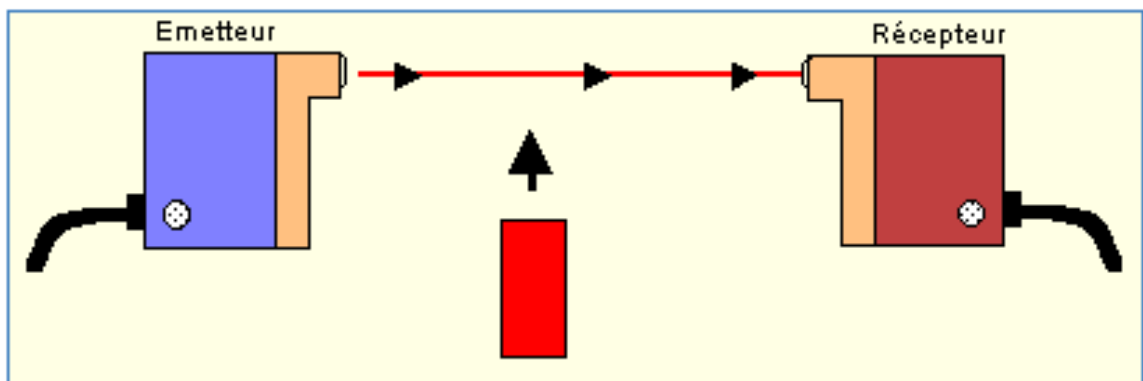
Pour réaliser la détection d'objets dans les différentes applications, 3 systèmes de base sont proposés:

Système barrage

2 boîtiers

portée : 30m

pas les objets transparents

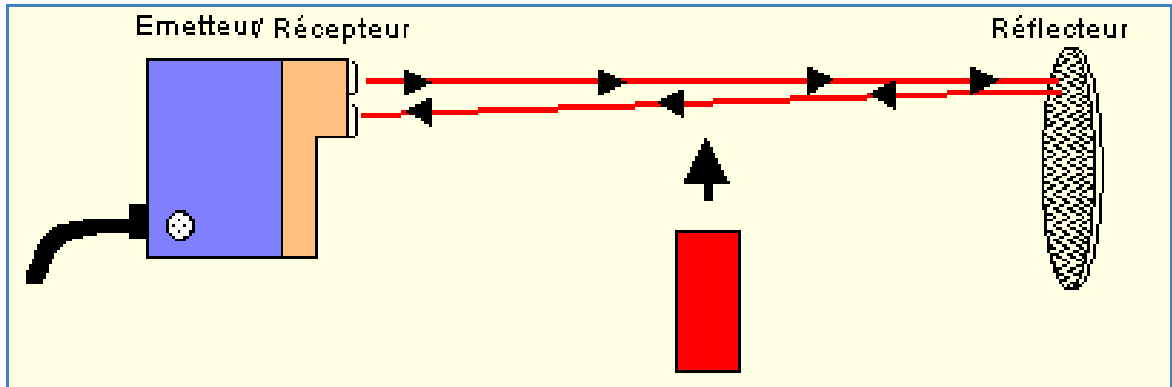


Système reflex

1 boîtier

portée : 15m

pas les objets transparents ni réfléchissants

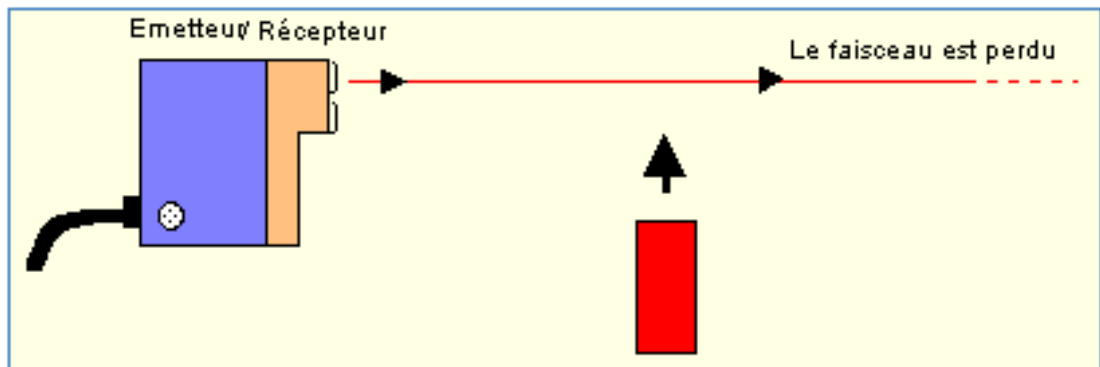


Système proximité

1 boîtier

portée : dépend de la couleur de l'objet (clair mieux détecté)

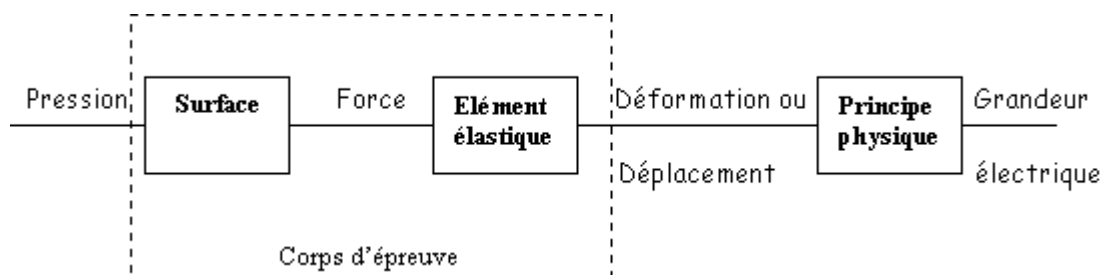
pas les objets transparents



2. Les mesures de pression

2.1. Le principe

Dans tous les cas, les capteurs de pression peuvent se ramener au schéma synoptique ci-dessous.



Le corps d'épreuve est l'élément mécanique qui, soumis aux variations de la grandeur à mesurer a pour rôle de transformer celle-ci en grandeur physique mesurable.

On distingue deux grandes familles :

- les capteurs utilisant un liquide
- les capteurs à déformation de solide

Il est bon de distinguer les indicateurs de pression, qui permettent simplement de visualiser, des capteurs - transmetteurs qui délivrent un signal analogique (4-20 mA, 0-10 V etc...) correspondant à la grandeur mesurée.

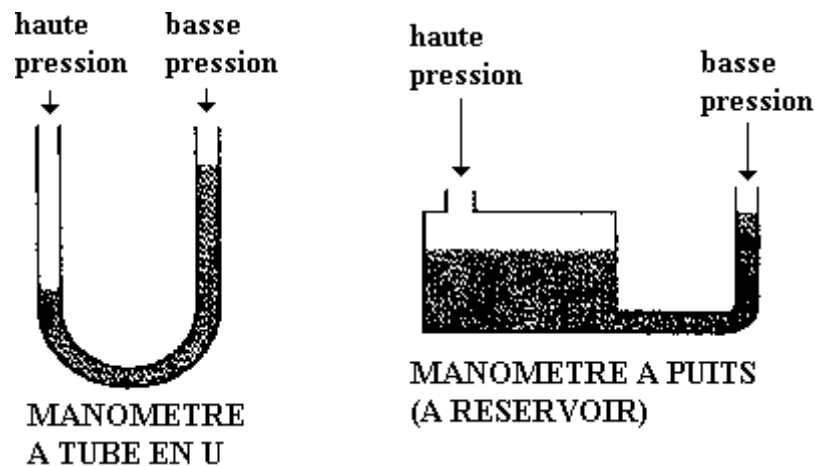


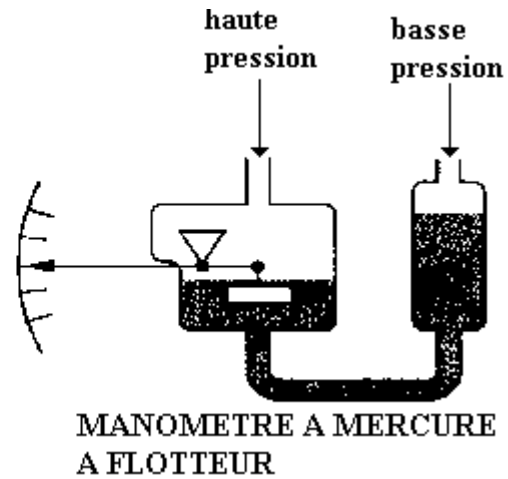
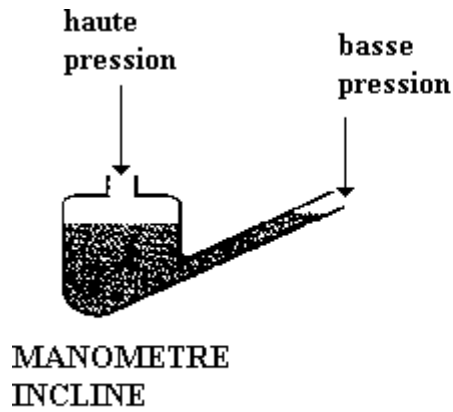
2.2. Capteurs utilisant un liquide

On trouve, parmi ces instruments le plus simple de tous les indicateurs de pression de l'industrie, le manomètre à liquide. Lorsque les pressions statiques sont faibles et que seule une indication visuelle est requise, on se sert de manomètres visuels.

La figure ci-dessous montre respectivement les très simples manomètres à tube en U, à puits (ou réservoir) et incliné.

Dans le cas de pressions élevées, on se sert de mercure comme liquide. Dans ce cas, c'est la position d'un flotteur à la surface du mercure qui définit le niveau de mercure, lequel à son tour définit la pression requise pour lui faire atteindre ce niveau.





2.3. Capteurs à déformation de solide

On utilise ces capteurs en cas de besoin d'une indication ou d'un enregistrement direct de la pression différentielle et là où un fluide de remplissage sera nocif pour le procédé.

Sous l'action de la pression, un solide se déforme de manière élastique. Différents matériaux sont utilisés, caoutchouc, matières plastiques, alliages métalliques, acier inoxydable.

La membrane peut être soumise à une pression sur l'une de ses faces ou à deux pressions (une par face). La pression peut agir directement sur la membrane ou indirectement par l'intermédiaire d'une tige ou d'une liaison hydraulique.

On trouve notamment :

- des manomètres à tube de Bourdon, à soufflet, à membrane dont jauge de contrainte, transformateur différentiel et effet capacitif
- Des manomètres à effet piézo-électrique

Le tableau ci-dessous rappelle quelques critères de choix de ce type de capteurs.

Principe	Type	Sous type	Critères
Colonne de liquide	Manomètre à tube en U		-indicateur -faibles pressions
	Manomètre à tube incliné		-mesures des très faibles pressions -plus grande précision que le tube en U
Déformation de solide	Manomètre à tube de Bourdon		-indicateur à aiguille -peut fonctionner en déprimomètre -peut être équipé de contacts mini et maxi pour une utilisation en pressostat
	Manomètre à soufflet		-mesure de la pression atmosphérique jusqu'à des pressions de 25 bars avec une bonne précision -peut être associé à un tambour enregistreur

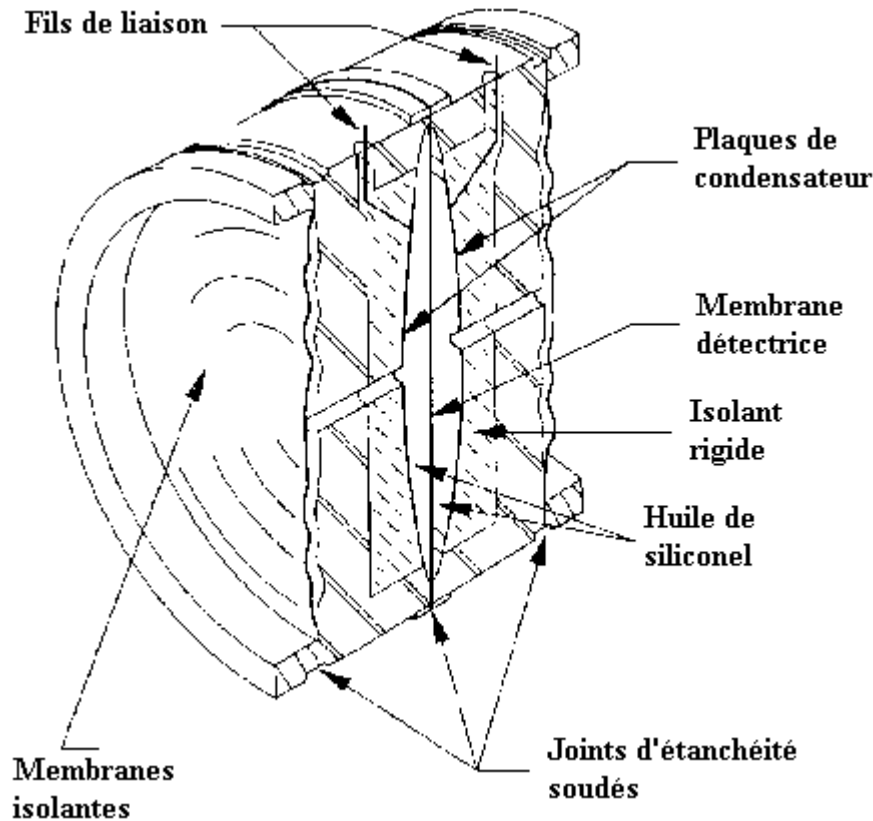
	Manomètre à membrane	Capteur à jauge de contrainte	-délivre un signal analogique fonction de la déformation de la jauge sous la pression -traitement d'un signal faible et influence de la température augmente la complexité et le coût du capteur
		Capteur à transfo. différentiel	-mesure d'une pression différentielle (courant induit par le déplacement de la membrane) -robuste et précision (-1%) -non conseillé pour les variations rapides de pression (quelques Hz)
		Capteur à effet capacitif	-la capacité électrique varie en fonction de la déformation de la membrane -mesure des très faibles pressions -excellent temps de réponse
Piézo-électrique	Capteur piézo-électrique	-	-la pression appliquée au quartz fait varier sa fréquence de résonance -temps de réponse très rapide -peu sensible (quelques millibars) -coût avantageux pour des pressions > 100 mbar

- **transformateur différentiel** : Il se compose d'un enroulement primaire, de deux enroulements secondaire et d'un noyau magnétique mobile. Suivant la position du noyau, le primaire induit une f.e.m dans chacun des deux secondaires. Le déplacement du noyau entraîne des variations inverses de ces deux f.e.m. La différence des ces deux f.e.m constitue le signal de sortie
- La **piézo-électricité** est la particularité que possèdent certains cristaux (quartz, céramique, titanate de baryum...) de se polariser électriquement lorsqu'ils sont soumis à des contraintes mécaniques. La quantité de charges électriques produites est proportionnelle sur une large plage aux efforts appliqués

2.4. Les transmetteurs de pression

Comme décrit précédemment, on utilise souvent le transmetteur de pression lorsqu'on doit réaliser l'indication et / ou l'enregistrement d'une pression en un lieu non adjacent à l'élément primaire en contact avec le milieu soumis à la pression.

La figure suivante donne un exemple de transmetteur électronique.



Le principe utilisé est celui de la technique capacitive à deux fils. La pression du procédé est transmise à travers les membranes isolantes et un fluide de remplissage constitué d'huile de silicone à une membrane détectrice placée au centre de la cellule.

La membrane détectrice agit comme un ressort étiré qui fléchit en réponse à une pression différentielle qui la traverse.

Le déplacement de la membrane détectrice est proportionnel à la pression différentielle.

Sa position est détectée par les plaques de condensateur qui sont situées de part et d'autre de la dite membrane. La différence de capacité entre la membrane détectrice et les plaques de condensateur est convertie électroniquement en un signal 4-20 mA.

2.5. Choix d'un transmetteur

Parmi les considérations à prendre en compte dans le choix d'un transmetteur, nous citerons :

- la température maximale du procédé, l'exposition des électroniques à semi-conducteurs à des températures ambiantes élevées à pour effet de nuire à la longévité des composants (valeur limite aux environs de 85°C)
- la plage de pression de service et de la pression maximale. Les transmetteurs doivent pouvoir résister à une surpression égale à au moins 150 % de leur pression maximale. Ce paramètre élimine un éventuel arrêt du procédé pour recalibrage ou réparation
- L'environnement qui peut imposer parfois une humidité relative de 100 %
- La sortie qui peut être 4-20 mA, 0-5V ...
- La précision de référence qui est un nombre définissant la limite que les erreurs ne vont pas dépasser lorsque le capteur est utilisé dans les conditions de service de référence

2.6. Les cellules capacitives et piezo-résistive

C'est un transducteur de pression avec cellule céramique capacitive pour une mesure stable à long terme et résistante aux surcharges. Il sert à la mesure de pression relative ou absolue dans les gaz, vapeurs et liquides.

Exemple de caractéristiques de produit :

Gammes de mesure: 100 mbar...40 bar
Pression statique: 4 bar...60 bar
Versions électroniques: 4...20 mA analogique (avec PE ou câble 5 m)
Raccords process: G 1/2 (mâle), 1/2 NPT (mâle), 1/4 NPT (femelle)
Température de process: -20 °C...+100 °C
Température ambiante: - 20...+ 85°C
Certificats: ATEX II 3 G EEx nA II T4
Puissance de sortie : max. 6 W
Fréquence de commutation : max. 10 Hz
Conditions de référence : selon DIN CEI 60770, TU = 25 °C

Domaines d'application :

Pour la mesure de pression absolue et relative dans les gaz, vapeurs, liquides et poussières

Principaux avantages :

Le transducteur de pression compact se distingue par une technique très élaborée :

- Bonne reproductibilité et stabilité à long terme.
- Gammes de mesure allant du vide jusqu'à 400 bar/ 6000 psi.
- Cellule céramique Ceraphire® : résistant à la corrosion, à l'abrasion et aux surpressions.
- Capteurs
 - Cellule céramique capacitive sèche (Ceraphire®) pour gammes de mesure jusqu'à 40 bar - résistance aux surpressions et aux pulsations, ainsi qu'au vide
 - Cellule piézorésistive avec membrane métallique pour gammes de mesure jusqu'à 400 bar

3. Les mesures de température

3.1. Les thermistances

Pour une thermistance de composition donnée, la mesure d'une température donnée induit une résistance spécifique pour la thermistance.

Diverses thermistances faites de petits grains de semi-conducteurs et d'oxydes métalliques (fer, titane, etc...) que l'on appelle oxydes céramiques sont utilisées pour mesurer des températures entre - 46 °C et 150 °C. Ces oxydes sont frittés (comprimés et chauffés) à une température limite de fusion. Leurs propriétés dépendent du choix du semi-conducteur ainsi que du dosage des oxydes.

Les thermistances font partie des résistances non linéaires. On en rencontre de deux types :

- La CTN, coefficient de température négatif (NTC thermistor),
- la CTP, coefficient de température positif (PTC thermistor).

Les paramètres essentiels d'une thermistance sont :

- la valeur de sa résistance,
- sa sensibilité thermique ou coefficient de température α'
- sa stabilité (fournie par le constructeur).



Exemple une thermistance est une CTN de valeur nominale $R^* = 22 \text{ k}\Omega$.

Remarque : La résistance de la CTN est égale à R^* lorsque la température vaut 298 K, soit 25 °C.
Coefficient de température :

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{\Delta R}{\Delta T}$$

$$\alpha = -\frac{B}{T^2}$$

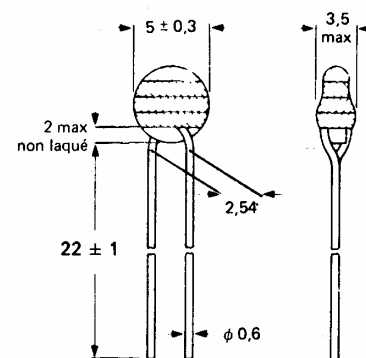
$$R = R^* \cdot e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1} \right)} \quad \text{avec } T \text{ en K et } T_1 = 298 \text{ K.}$$

disques

série 642 6., dissipation 0,5 W

Dimensions (mm)

Appellation commerciale	R_{25} (Ω)	$B_{25/85}$ $\pm 5\%$ (K)	α (%/K) à 25 °C
CTN 642 6.478	4,7	2 750	-3,1
CTN 642 6.688	6,8	2 800	-3,2
CTN 642 6.109	10	2 875	-3,2
CTN 642 6.229	22	3 025	-3,4
CTN 642 6.479	47	3 150	-3,5
CTN 642 6.101	100	3 300	-3,7
CTN 642 6.151	150	3 375	-3,8
CTN 642 6.221	220	3 475	-3,9
CTN 642 6.331	330	3 575	-4,0
CTN 642 6.471	470	3 650	-4,1
CTN 642 6.681	680	3 725	-4,2
CTN 642 6.102	1 000	3 825	-4,3
CTN 642 6.152	1 500	3 975	-4,5
CTN 642 6.222	2 200	4 125	-4,6
CTN 642 6.472	4 700	4 350	-4,9
CTN 642 6.103	10 000	4 275	-4,8
CTN 642 6.153	15 000	4 200	-4,7
CTN 642 6.223	22 000	4 275	-4,8
CTN 642 6.333	33 000	4 350	-4,9
CTN 642 6.473	47 000	4 400	-5,0
CTN 642 6.683	68 000	4 450	-5,1
CTN 642 6.104	100 000	4 500	-5,2
CTN 642 6.154	150 000	4 550	-5,2



Sur demande, nous pouvons fournir d'autres valeurs

Tolérance sur R_{25} : $\pm 10\%$, CTN 642 62...
 $\pm 5\%$, CTN 642 63..., sur demande.

3.2. Les thermocouples

L'un des capteurs de température les plus fréquemment utilisés est le thermocouple. Les thermocouples sont des matériels particulièrement durcis et économiques qui peuvent opérer sur une large gamme de températures.

Un thermocouple est créé lorsque deux métaux différents entrent en contact, ce qui produit une faible tension en circuit ouvert au point de contact, qui varie en fonction de la température. Cette tension thermo-électrique est connue sous le nom de tension de Seebeck, d'après Thomas Seebeck qui l'a découverte en 1821. La tension n'est pas linéaire en fonction de la température.

Cependant, pour de petites variations de température, la tension est approximativement égale à :

$$\Delta V = S \Delta T$$

où ΔV est la variation de la tension, S est le coefficient de Seebeck et ΔT la variation de la température.

Cependant, S varie en fonction de la température, ce qui rend les tensions des thermocouples non linéaires sur leurs gammes de fonctionnement.

























































































Plusieurs types de thermocouples sont disponibles ; ils sont désignés par une lettre majuscule qui indique leur composition selon les conventions de l'American National Standards Institute (ANSI).

Par exemple, un thermocouple de type J est constitué d'un fil conducteur en fer et d'un autre en constantan (un alliage de cuivre et de nickel). Une liste complète des thermocouples disponibles est présentée ci-dessous au tableau 1.

Table 1. Compositions et lettres de représentation des thermocouples normalisés

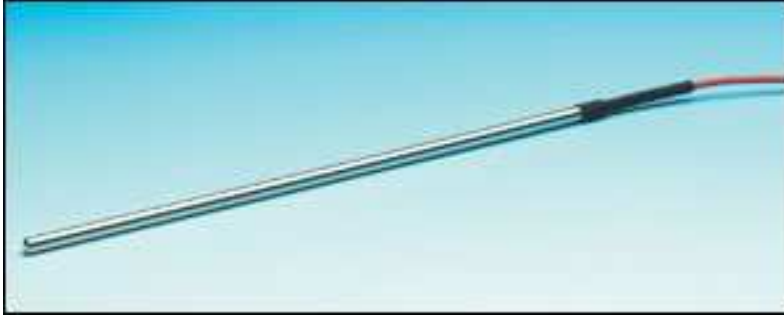
Types de thermocouples	Conducteurs - Positif	Conducteurs - Négatif
B	Platine rhodié à 30 %	Platine rhodié à 6 %
E	Alliage nickel / chrome	Alliage cuivre / nickel
J	Fer	Alliage cuivre / nickel
K	Alliage nickel / chrome	Alliage nickel / aluminium
N	Alliage nickel / chrome / silicone	Alliage nickel / silicone / magnésium
R	Platine rhodié à 13 %	Platine
S	Platine rhodié à 10 %	Platine
T	Cuivre	Alliage cuivre / nickel

Type de couple	Temp Mini (°C)	Temp Maxi (°C)	Précision de base	Coefficient de température
B	+400	+1820	≤ ±2 °C	≤ ±0,2 °C/°C
E	-100	+1000	≤ ±1 °C	≤ ±0,05 °C/°C
J	-100	+1200	≤ ±1 °C	≤ ±0,05 °C/°C
K	-180	+1372	≤ ±1 °C	≤ ±0,05 °C/°C
L	-100	+900	≤ ±1 °C	≤ ±0,05 °C/°C
N	-180	+1300	≤ ±1 °C	≤ ±0,05 °C/°C
R	-50	+1760	≤ ±2 °C	≤ ±0,2 °C/°C
S	-50	+1760	≤ ±2 °C	≤ ±0,2 °C/°C
T	-200	+400	≤ ±1 °C	≤ ±0,05 °C/°C
U	-200	+600	≤ ±1 °C	≤ ±0,05 °C/°C

couples symboles	 NFC 42 - 323	 NFC 42 - 323	 IEC 584 - 3 NFC 42-324 (1992) / 63-137	 IEC 584 - 3	 DIN 43714	 BS 1843	 ANSI 95 - 1	 JISC 1610
T								
J								
E								
K								
								
								
N								
R								
S								
B								

3.3. Les sondes platines

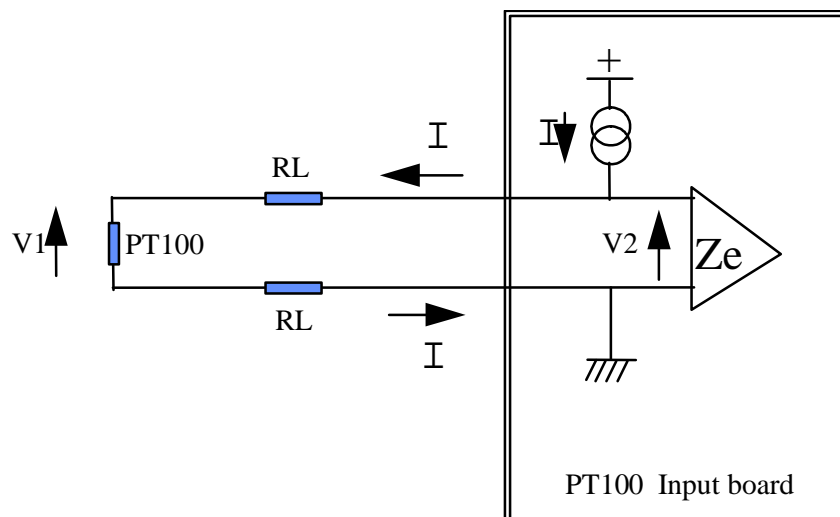
Principe : en injectant un courant constant et continu, il suffit alors de mesurer la tension, qui, étant proportionnel à la résistance donne une image de la température mesurée.



3.3.1. Les différentes technologies

Il existe 3 technologies :

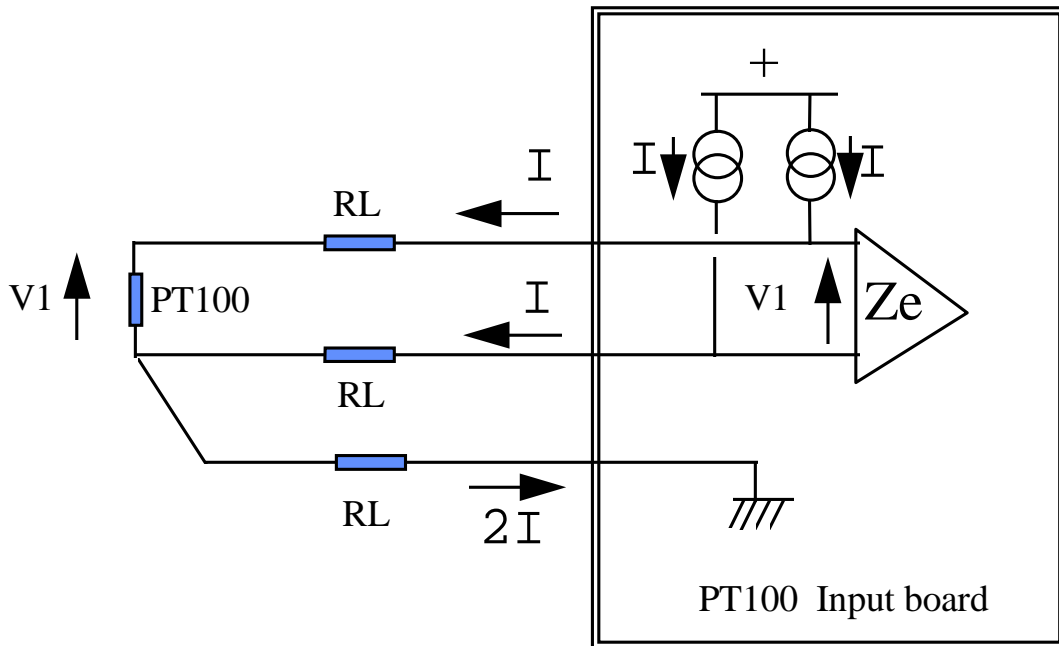
La technologie 2 fils est la plus simple. En revanche elle a l'inconvénient de prendre en compte la valeur ohmique des fils allant du régulateur jusqu'à la Pt100.



Avantage : faible coût des sondes, moins de fils à câbler, et éventuellement carte moins chère.
Inconvénient : la mesure est faussée:

La tension mesurée par la carte (V_2) est *supérieure* à la tension existant aux bornes de la sonde (V_1) à cause des chutes de tension dans les résistances de ligne (RL).

La technologie 3 fils permet de limiter l'effet de la prise en compte de la résistance des fils allant à la sonde puisque, sur le côté où il y a 2 fils, en injectant le courant dans l'un des fils et en mesurant sur le deuxième, on connaît la chute de tension engendrée par le fil, du fait de la circulation du courant, et il suffit de le doubler, pour prendre en compte le 3 ème fil.



Les 2 sources de courant sont appariées, le troisième fil de la sonde sert au retour de la somme des 2 courants.

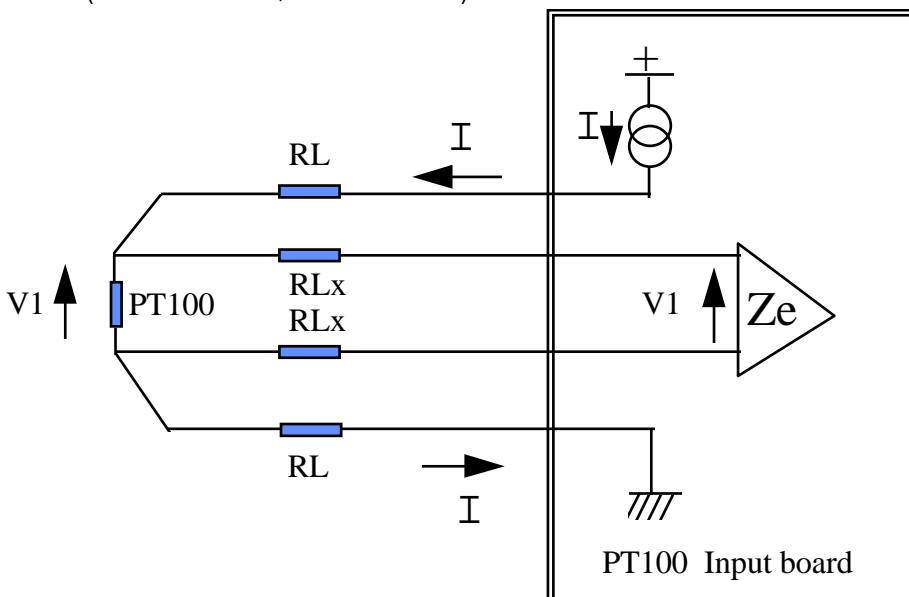
L'impédance d'entrée de l'étage analogique (Z_e) étant très grande, la tension mesurée (V_1) est la même que sur la sonde (les valeurs des résistances R_L sont voisines, les chutes de tension dans les fils sont les mêmes mais de signe opposé : elles s'annulent).

La technologie 4 fils:

C'est la plus précise parce qu'avec ce moyen, on mesure directement la tension aux bornes de la Pt,

En utilisant 2 fils dans lesquels il ne circule aucun courant, donc pas de chute de tension dans ces dernières.

Il en existe différente sorte, Pt 100, Pt 25...
(100 ohms : 0°C , 25 ohms : 0°C)



La tension aux bornes de l'entrée est la même que celle aux bornes de la sonde.

La chute de tension due aux résistances RLX est négligeable (Z_e très grande).

On peut utiliser une sonde 2 fils sur une carte conçue pour des sondes 4 fils en faisant les ponts appropriés sur la carte, mais la mesure sera faussée.

Avantage:

- c'est le montage donnant la meilleure précision

Inconvénient:

- c'est le montage le plus cher.

3.4. La pyrométrie optique

La thermographie infrarouge permet la mesure de température de surface et ses variations temporelles et spatiales, sur les échantillons examinés.

Le système d'acquisition est conçu pour transformer une image captée dans le domaine infrarouge et en fonction de la luminance de l'objet observé, en une image visible et analysable par l'œil humain.



Quatre phénomènes d'échanges entrent en jeu :

- l'émission thermique spontanée
- la transmission
- la réflexion ou la diffusion
- l'absorption thermique.

Par exemple, un corps dit *opaque* émet, réfléchit, absorbe mais ne transmet pas.

Quelque soit le phénomène prépondérant, tout matériau envoie dans l'espace de l'énergie par

rayonnement électromagnétique.

La pyrométrie optique est une méthode de mesure de la température basée sur la théorie du corps noir. Chaque objet émet des radiations fonction de la température.

Un pyromètre est donc un capteur de radiations (infrarouges le plus souvent) qui convertit cette énergie en signal électrique. Une électronique permet d'intégrer des facteurs comme l'émissivité pour fournir une valeur fiable.

L'intérêt de la pyrométrie optique est de permettre la mesure de température sans contact avec un temps de réponse très court. Ils sont utilisés à chaque fois que les thermomètres classiques comme les thermocouples sont difficilement utilisables voire impossibles.

Exemples d'applications

Métallurgie, industrie du verre, cimenterie,
coulée continue, brasage laser, traitement thermique par induction

Le pyromètre mono-canal

Le pyromètre mono-canal ou mono-chromatique utilise une longueur d'onde pour convertir la radiation infrarouge en signal électrique .

Le pyromètre bi-couleur

Le pyromètre bi-couleur ou bi-chromatique travaille à deux longueurs d'ondes. L'atténuation du signal en cas de détérioration du trajet optique s'applique aux deux canaux. Cette corrélation permet de maintenir une mesure fiable en milieu sévère.

4. Les mesures de débit

4.1. Mesure des débits volumiques

4.1.1. Capteur à mesure de pression différentielle

Tube de PITOT

La méthode consiste à utiliser deux tubes qui mesurent la pression en des endroits différents à l'intérieur de la canalisation. Ces tubes peuvent être montés séparément dans la conduite ou ensemble dans un seul boîtier.

L'un des tubes mesure la pression d'arrêt (ou pression dynamique) en un point de l'écoulement. Le second tube mesure uniquement la pression statique, généralement sur la paroi de la conduite. La pression différentielle mesurée de part et d'autre du tube de PITOT est proportionnelle au carré de la vitesse.

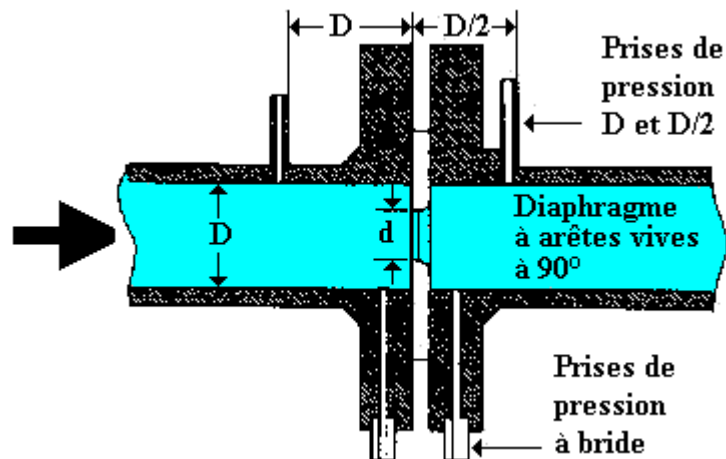
- domaine d'utilisation : pour les liquides propres ou visqueux, la mesure de débit de gaz, la variation de la vitesse d'écoulement entre la moyenne et le centre n'étant pas aussi importante qu'avec les autres fluides. Ils sont facilement bouchés par des corps étrangers présents dans le fluide
- diamètre de canalisation : à partir de 300 mm et jusqu'à 3,8 m en France (9,6 m au USA)
- précision : 1 à 2 % de la valeur réelle
- dynamique : 1-4

La mesure de débit, réduite à la mesure des différences de pression D_p du fluide qui apparaît entre deux points situés en amont et en aval de l'étranglement de la conduite est donc réalisée par un capteur de pression différentielle. Un calculateur est alors nécessaire pour l'obtention d'un signal proportionnel au débit.

Diaphragme

Il s'agit d'un disque percé en son centre, réalisé dans le matériau compatible avec le liquide utilisé. Le diaphragme concentrique comprime l'écoulement du fluide, ce qui engendre une pression différentielle de part et d'autre de celui-ci.

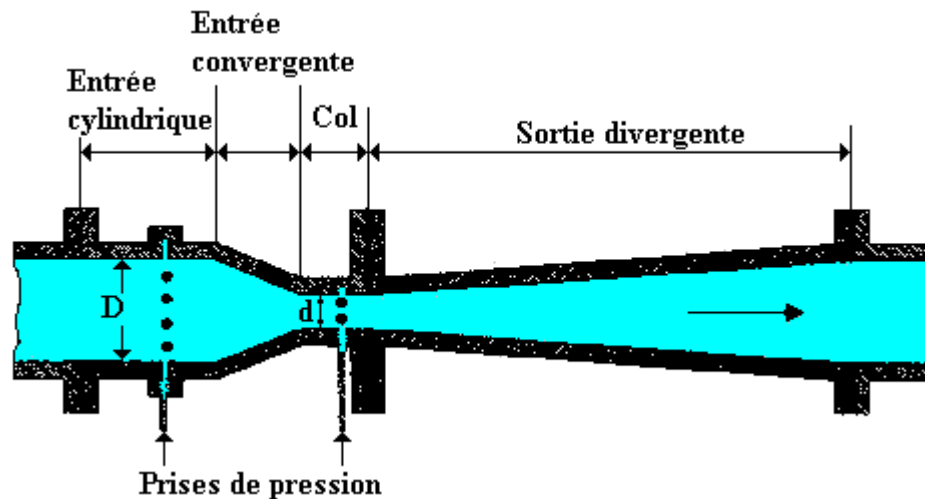
Il en résulte une haute pression en amont et une basse pression en aval, proportionnelle au carré de la vitesse d'écoulement. C'est le dispositif le plus simple, le moins encombrant et le moins coûteux.



- domaine d'utilisation : ne convient pas aux liquides contenant des impuretés solides car celles-ci peuvent s'accumuler à la base du diaphragme. Il introduit une perte de charge importante
- diamètre de canalisation : tous diamètres disponibles
- précision : 2 à 5 %
- dynamique : 1-4

Tube de Venturi

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



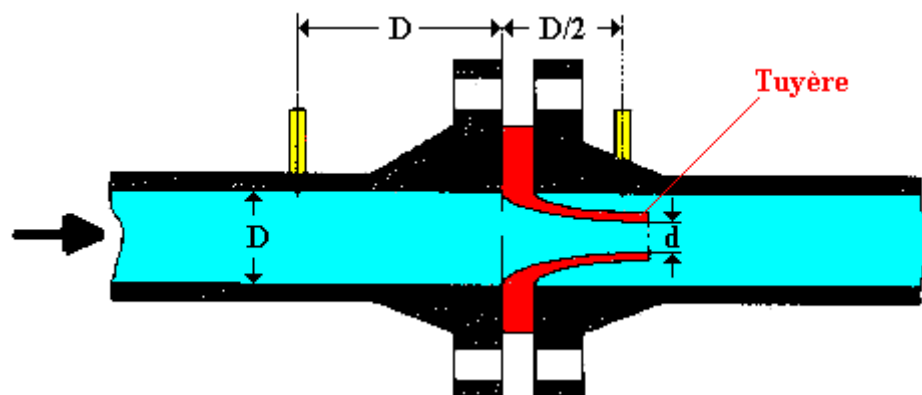
- domaine d'emploi : liquide propre, gaz et vapeur
- précision : 0,5 à 3 % selon les cas

Tuyère

Elle est considérée comme une variante du tube de VENTURI.

L'orifice de la tuyère constitue un étranglement elliptique de l'écoulement, sans section de sortie rétablissant la pression d'origine.

Les prises de pression sont situées environ $\frac{1}{2}$ diamètre de la conduite en aval et 1 diamètre la conduite en amont.



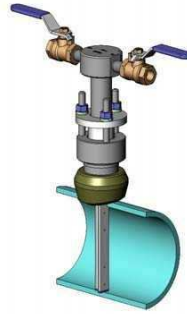
La perte de charge se situe entre celle d'un tube de VENTURI et celle d'un diaphragme.

- domaine d'utilisation : pour les turbulences importantes ($Re > 50000$), notamment dans les écoulements de vapeur à haute température. Ce dispositif est inutilisable pour les boues
- précision : 1 à 3 %

Sonde de débit Annubar

Elle est conçu pour mesurer le profil complet de l'écoulement – une caractéristique qui échappe aux éléments traditionnels basés sur la pression différentielle.

La pression différentielle est proportionnelle au carré du débit, conformément au théorème de Bernoulli et à l'équation de continuité.



La première génération de tubes de Pitot moyennés utilisait une sonde à section ronde.

Le point où le fluide se détache du détecteur est instable. Il varie en fonction du type et de la vitesse du fluide, de la rugosité du détecteur et du niveau de turbulence.

La sonde Diamant II, en forme de losange illustré, est la troisième génération de sondes. Elle est également le cœur de la technologie des sondes Annubar.

Applications :

Liquide et gaz - HVAC* : chauffage, ventilation et climatisation (*Heating Ventilation Air Conditioning) - Mesures sur conduites rectangulaires ou circulaires
CARACTERISTIQUES ET PERFORMANCES : - Diamètres de ligne : 50 à 900 mm (autres diamètres : nous consulter) - Incertitude : +/- 1 à 2 % du débit instantané - Répétabilité : +/- 0.1 % - Matériau sonde : inox 316

4.1.2. Débitmètres à section variable (rotamètre)

Il est constitué d'un petit flotteur placé dans un tube conique vertical. Le flotteur est en équilibre sous triple action de :

- son poids (M.g)
- de la force de poussée d'Archimède ($\rho \times g \times \text{volume du flotteur}$)
- de la poussée du liquide:

$$\rho \frac{SCxV^2}{2}$$

M : masse du flotteur en kg

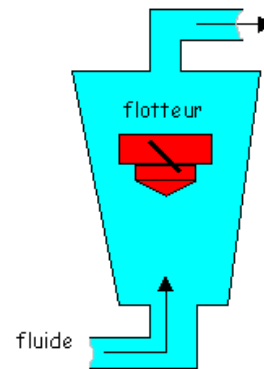
g : accélération de la pesanteur 9,81 m/s²

r : masse volumique du liquide en kg/m³



V : vitesse du fluide en m/s

S : surface du flotteur en m²



C : coefficient de traînée du flotteur (sans unité)

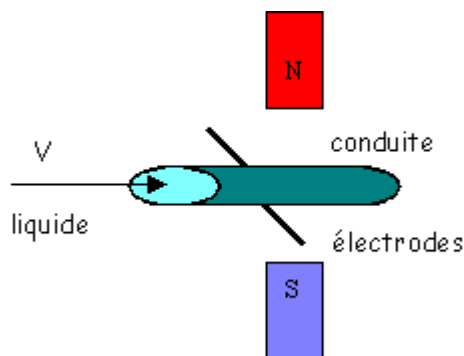
Le diamètre du tube en verre étant plus grand en haut qu'en bas, le flotteur reste en suspension au point où la différence de pression entre les surfaces supérieure et inférieure en équilibre le poids.

Une encoche dans le flotteur le fait tourner sur lui-même et stabilise sa position.

Le repérage de la position du flotteur se fait par lecture directe sur le tube en verre qui est muni de graduations ou par l'intermédiaire d'un couplage optique ou magnétique entre le flotteur et l'extrémité du tube.

4.1.3. Débitmètre électromagnétique

Il utilise la loi de Faraday : Quand un conducteur rectiligne se déplace dans un champ magnétique, une force électromotrice est induite dans ce conducteur.



Un champ magnétique est créé par deux enroulements inducteurs placés de part et d'autre d'un même diamètre de la canalisation. Le conducteur est le fluide lui-même, il circule dans une canalisation isolée électriquement à l'intérieur.

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

Le signal de sortie a une amplitude de quelques millivolts et indique également le sens de l'écoulement.

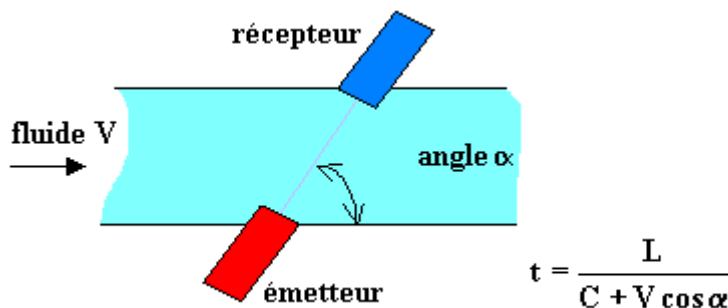
- domaine d'utilisation : liquide visqueux, pâteux, chargés d'impuretés, abrasifs ou très corrosifs à condition qu'ils soient conducteurs de l'électricité (ce qui n'est pas le cas des hydrocarbures)
- diamètre de canalisations : 3 mm à 3 m
- bonne précision de l'ordre de 1 % (limitée pour les faibles vitesses d'écoulement)
- mesure ne dépendant pas des caractéristiques physique du liquide (viscosité, densité, granulométrie) et possible à haute température (450 °C) et haute pression (1000 bars)

4.1.4. Débitmètre à ultrasons

Un émetteur et un récepteur sont montés en opposition de manière à ce que les ondes acoustiques allant de l'un à l'autre soient à 45 ° par rapport au sens d'écoulement dans la conduite.

La vitesse du son allant de l'émetteur au récepteur constitue la vitesse intrinsèque du son, plus un apport dû à la vitesse du fluide.

La mesure du temps t mis par le signal pour parcourir la distance L permet de connaître la vitesse du fluide et d'en déduire le débit.



C : vitesse de propagation du son dans le fluide

V : vitesse du fluide

L : distance entre émetteur et récepteur

Il est primordial que le fluide ne véhicule pas de gaz ou de solides, pour éviter la dispersion des ondes acoustiques entre les deux transducteurs. L'ensemble du dispositif, à l'extérieur de la conduite, est insensible à l'agressivité du fluide et n'entraîne aucune perte de charge.

- domaine d'utilisation : fréquemment utilisé pour les écoulements turbulents, pour les fluides non conducteurs (notamment hydrocarbures), là où les débitmètres électromagnétiques ne conviennent pas
- diamètre de canalisations : généralement important (6000 mm)
- précision : peut atteindre 0,5 %
- temps de réponse très rapide, jusqu'à 1 ms

4.1.5. Débitmètres à effet Vortex

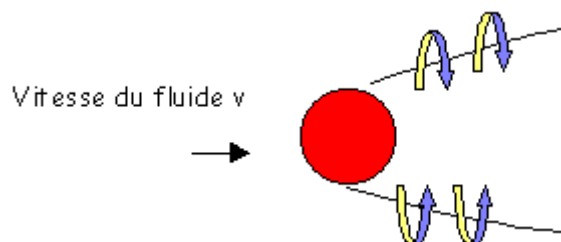
Le principe est basé sur le phénomène de génération de tourbillons, appelé effet Karman. Lorsque le fluide rencontre un corps non profilé, il se divise et engendre des tourbillons, de part et d'autre et



en aval du corps non profilé.

Le nombre de tourbillons formés en aval par unité de temps est proportionnel au débit moyen. Une vitesse précise d'écoulement du fluide est déterminée par le comptage des tourbillons.

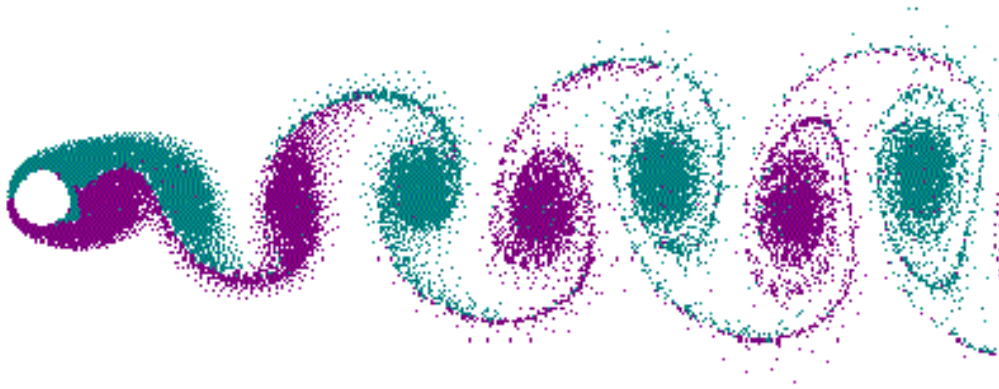
Cette vitesse est mesurée à l'aide d'un capteur sensible aux variations oscillatoires de pression. Le comptage se fait par mesure piezo-résistive



Vitesse du fluide = fréquence des tourbillons / facteur K

Le facteur K dépend du nombre de REYNOLDS, mais est pratiquement constant sur une vaste plage de débit.

- domaine d'utilisation : Il est destiné au liquide propre, gaz ou vapeur et non recommandé pour la mesure de faibles débits. Il entraîne une perte de charge, supporte des vitesses de fluide importantes
- diamètre de canalisations : 12 à 500 mm
- précision : 1 %

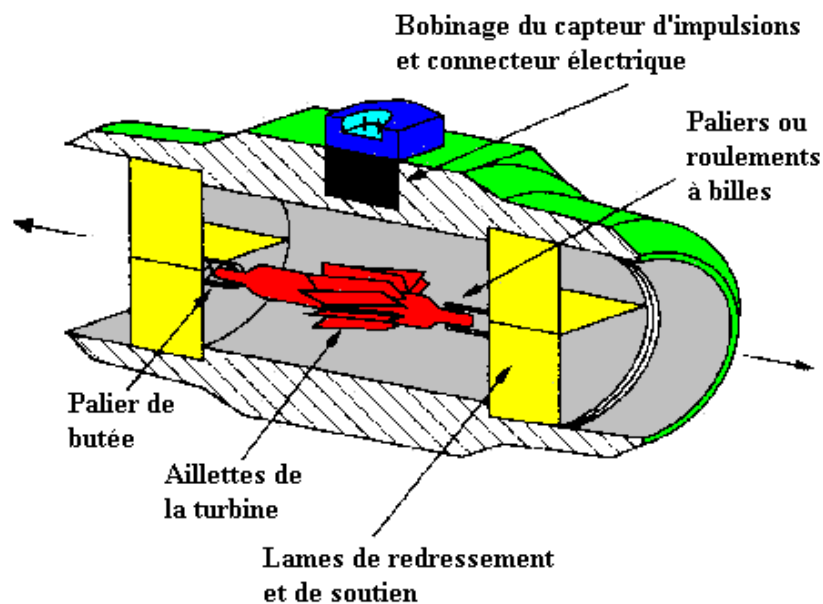


4.1.6. Débitmètres à turbine

L'écoulement du fluide entraîne la rotation d'une turbine (rotor à plusieurs ailettes, reposant sur des paliers) placée dans la chambre de mesure, la vitesse de rotation du rotor est proportionnelle à celle du fluide, donc au débit volumique total.

La vitesse de rotation est mesurée en comptant la fréquence de passage des ailettes détectée à l'aide d'un bobinage (un aimant permanent est parfois solidaire de l'hélice).

Chaque impulsion représente un volume de liquide distinct.



- domaine d'utilisation : compatible avec de nombreux liquides (rotor en acier inoxydable). Toutefois la propreté du liquide est essentielle, afin de ne pas encombrer les paliers de butée du rotor qui peut tourner à haute vitesse. De par leur principe ils sont réservés aux fluides peu visqueux, exempt de bulles ou de matières granuleuses. Ils sont destinés aux applications industrielles générales (eau, alcools, carburants, acides, gaz liquéfiés, liquides cryogéniques...)
- diamètre de canalisations : 10 mm à 30 cm environ
- précision : 0,2 à 2 % de l'étendue de mesure, selon les appareils
- temps de réponse : plusieurs millisecondes

4.1.7. Débitmètres à déplacement positif

Description :

Utilisation du principe du piston oscillant : la passage du liquide dans la chambre de mesure provoque l'oscillation du piston de façon cyclique. Chaque cycle du piston laisse passer un volume connu de liquide entre l'entrée et la sortie du débitmètre. Un système magnétique dans le piston active un relais REED et un capteur d'impulsions pour une mesure volumétrique du débit.



Applications :

Très bien adaptée aux mesures de débit volumétrique de liquides visqueux, jusqu'à 1 000 000 de cps (centi poise). Alimentation d'huile ou de graisse, injection de fuel, produits chimiques, acides, solvants, produits pharmaceutiques ou alimentaires font partie des nombreuses applications de ces appareils.

Avantages :

- * Grande précision de mesure pour débits liquides : +/-0,5% de la mesure.
- * Appareil très compact et ne laissant pas de produit stagnant (autonettoyant)
- * Mesure de très faible débit : à partir de 10 l/h
- * Affichage débit instantané et totalisé
- * Grande plage de mesure (1 à 50)
- * Grande gamme de matériaux : Inox, aluminium, PVC,...

4.1.8. Débitmètres à effet Doppler

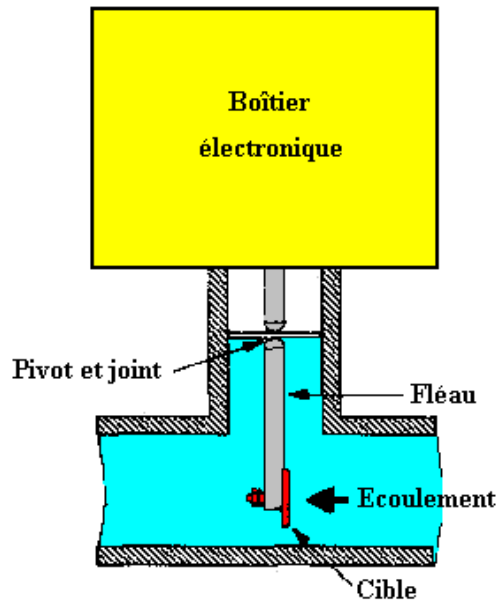
Il utilise deux éléments transducteurs, montés tous deux dans un même boîtier, d'un des deux cotés de la conduite. Une onde ultrasonore de fréquence constante est émise dans le fluide par l'élément émetteur, les solides ou bulles présents dans les fluides réfléchissent le son, le renvoyant à l'élément récepteur avec un glissement de fréquence. La variation de fréquence est proportionnelle à la vitesse moyenne du fluide.

- domaine d'utilisation : exige la présence de gaz ou de solides en suspension dans l'écoulement pour fonctionner correctement
- diamètre de canalisations : généralement important

- précision modeste : 2 à 5 % de l'étendue de mesure

4.1.9. Débitmètres à cible

Il comprend un disque (cible), centré dans une conduite. La surface de la cible est placée à 90° par rapport à l'écoulement du fluide. La force exercée par le fluide sur la cible permet une mesure directe du débit de fluide.



Comme précédemment, le signal de sortie est une pression différentielle, un calculateur est nécessaire pour l'obtention d'un signal proportionnel au débit.

- domaine d'utilisation : fluides chargés ou corrosifs
- diamètre de canalisation : 15 à 1800 mm
- précision : 1 à 2 % de la valeur réelle
- dynamique : 1-3

4.1.10. Par compteurs volumétriques

Ils mesurent le volume écoulé Q_v directement, en emprisonnant de façon répétée un volume élémentaire de fluide. Le volume total de liquide traversant le débitmètre pendant un laps de temps donné est le produit du volume élémentaire par le nombre d'emprisonnements.

Ces appareils totalisent souvent le volume directement sur un compteur intégré, mais ils peuvent également délivrer une sortie impulsions qui peut être transmis sur un afficheur.

Ils en existent plusieurs types selon le corps d'épreuve utilisé, à piston, à palettes (ou rotors), à roues ovales, à disque oscillant.

- domaine d'utilisation : eau, acides, lubrifiants (surtout pas les boues...)
- diamètre de canalisation : 10 à 300 mm
- précision : 1 %

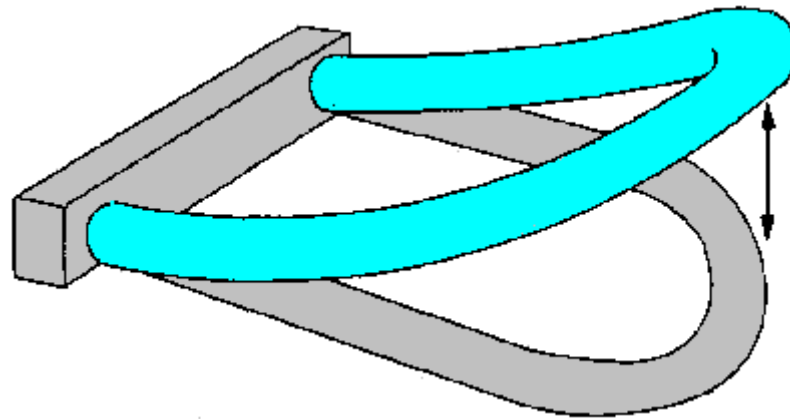
4.2. Mesure des débits massiques

4.2.1. Débitmètre à effet CORIOLIS

La force de CORIOLIS (Mathématicien français) explique notamment pourquoi les cyclones tournent dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère sud et dans le sens inverse dans l'hémisphère Nord.

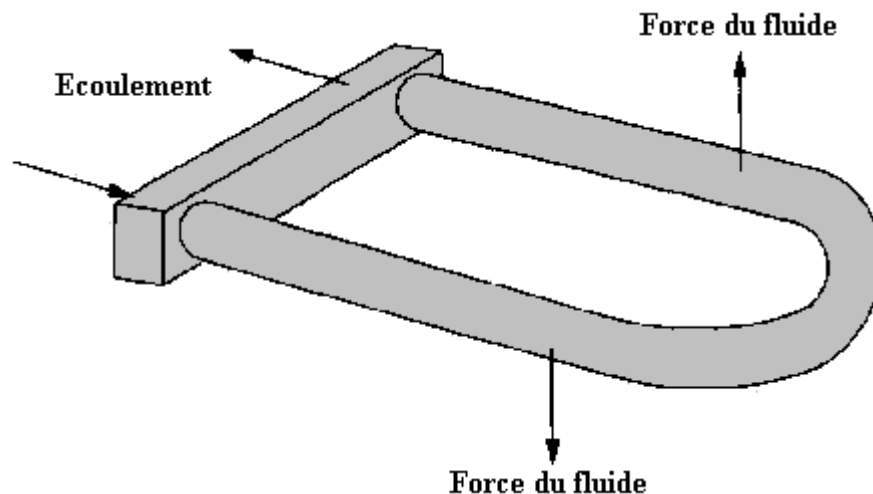
Il est question, dans un système en rotation, de la force qui agit perpendiculairement sur la masse en mouvement dans le système, selon le vecteur vitesse relative et sur l'axe de rotation du système.

Pour une masse m se déplaçant à une vitesse v , dans un système en rotation ayant lui-même une vitesse angulaire a , la force de CORIOLIS vaut $F = 2 \times m \times a \times v$. Le débitmètre de CORIOLIS utilise comme détecteur un tube en U sans obstacle.



Le tube de mesure vibre à sa fréquence naturelle à l'intérieur du boîtier du capteur. Le tube de mesure est actionné par un bobinage électromagnétique situé au centre de la courbure du tube et vibre comme un diapason.

Le fluide s'écoule dans le tube de mesure et est contraint de suivre le mouvement vertical du tube vibrant. Lorsque le tube monte pendant une moitié de sa période vibratoire, le fluide traversant le détecteur résiste à son entraînement vers le haut en repoussant le tube vers le bas.



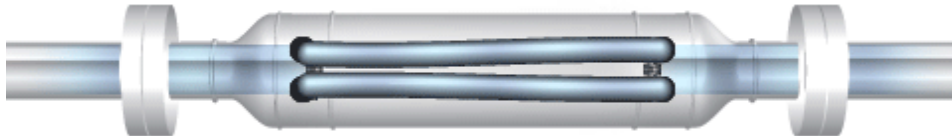
A la sortie du détecteur, le fluide a un mouvement ascendant, induit par le mouvement du tube. Lorsqu'il franchit le coude du tube, le fluide résiste aux modifications de son mouvement vertical en repoussant le tube vers le haut.

La différence de forces entraîne une torsion du tube de mesure. Lorsque le tube descend pendant la seconde moitié de sa période vibratoire, il se tord dans le sens opposé.

C'est cette caractéristique de torsion qui est appelé effet CORIOLIS. Du fait de la seconde loi de mouvement de NEWTON, l'amplitude de la torsion du tube de mesure est directement proportionnelle au débit massique du fluide traversant le tube.

Les détecteurs électromagnétiques situés de part et d'autre du tube de mesure enregistrent la vitesse du tube vibrant. Le débit massique se détermine en mesurant la différence de temps entre les signaux de détecteurs de vitesse.

En effet la torsion du tube de mesure, pendant l'écoulement du fluide, entraîne une différence de temps entre les deux signaux de vitesse. C'est cette différence de temps qui est directement proportionnelle au débit massique traversant le tube et demeure indépendante des propriétés de ce

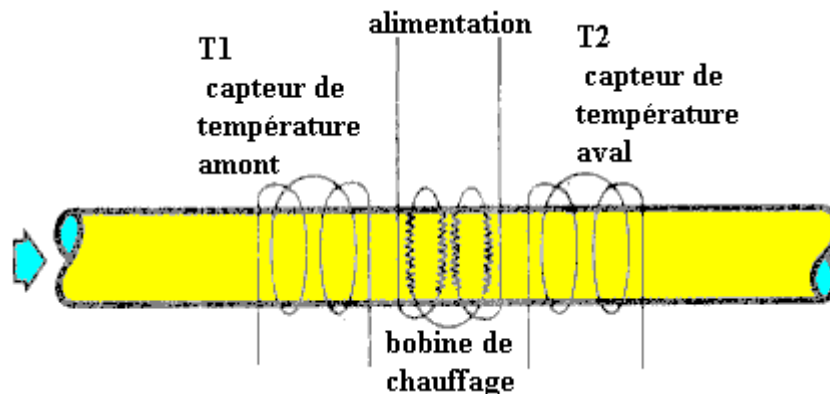


fluide.

- domaine d'utilisation : liquide propre et visqueux (pâtes, boues). Ce dispositif exige l'absence de toute bulle de vapeur formée momentanément dans le liquide et susceptible de perturber la mesure
- diamètre de canalisation : < 13 mm
- précision : 1 %

4.2.2. Débitmètre massique thermique

Le principe est basé sur la mesure des transferts caloriques par le fluide lui-même. Ces dispositifs sont constitués d'un tube métallique à paroi mince, des résistances chauffantes sont bobinées à l'extérieur du tube, la circulation du fluide provoque un déséquilibre thermique entre l'amont et l'aval du tube, le déséquilibre est proportionnel au débit massique.

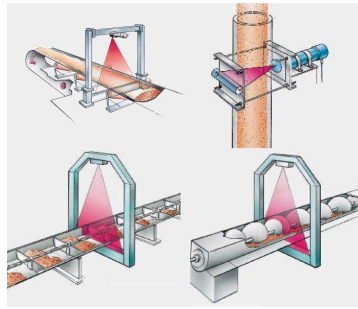


- domaine d'utilisation : liquide propre, gaz, vapeur
- diamètre de canalisation : tous diamètres
- précision : de l'ordre de 1 %
- dynamique : 1-10

4.2.3. Débitmètre massique radiométrique

Détermination sans contact du débit massique de matière solide sur des transporteurs en continu. Permet de mesurer le débit instantané et la masse totale cumulée sur une plage de mesure allant

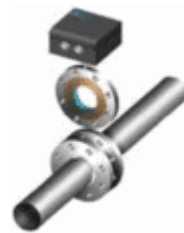
de 0 - 200 kg/h à 0 - 10 000 t/h. Utilisation sur transporteurs à bande, à vis, à chaîne, à tablier métallique ou à godets, goulottes et tuyauteries avec produits en chute.



Utilisé pour déterminer avec précision un débit massique de matières solides. La solution radiométrique est la seule méthode applicable pour des types de convoyeurs très différents. Le système Berthold permet également une mesure de débit en chute sur tuyauterie ou goulotte. Le LB 442 délivre le débit instantané et la masse totale cumulée sur une plage de mesure allant de 0 - 200 kg/h à 0 - 10 000t/h. L'appareil peut être implanté sur le convoyeur en sortie de trémie, en sortie de chute ou de système de transfert. Ce principe permet la mesure de fines poudres jusqu'à des fortes granulométries telles que des morceaux de plus de 10 kg.

4.2.4. Débitmètre massique par charges électrostatiques

Contrôleur de débit par charges électrostatiques type DYNAguard. Du g/h à plusieurs centaines de tonnes/h. Disponible en version compacte ou modulaire. Montage simple sur convoyeur pneumatique ou en chute. Capteur inox. Utilisation possible en centre d'incinération pour mesure de débit de charbon actif.



4.2.5. Débitmètre massique par hyper fréquences

Le débitmètre Dyna M-flow s'installe sur tuyauterie métallique et mesure des débits du Kg/h à plusieurs T/h. Le système se monte en ligne pour des mesures sur poudres, poussières et pellets avec une granulométrie comprise entre 1 nm et 20 mm. Pour convoyeur pneumatique et produits en chute. Mesure en ligne sans pesage.



4.3. Critère de choix des capteurs de débit

Les critères de choix sont très nombreux, le tableau ci dessous donne une liste des principaux éléments à considérer.

Caractéristiques du fluide	Nature du fluide (liquide chargé, conducteur...) Viscosité Régime d'écoulement Température Pression Agressivité Compressibilité
Critères métrologiques	Nature du signal de sortie (0-10 V, 4-20 mA...) Dynamique * Précision Etendue de mesure
Caractéristiques de l'installation	Diamètre de canalisation Perte de charge engendrée Encombrement Etalonnage Usure

- Plage du débit de fonctionnement d'un appareil sur laquelle il conserve la précision de mesure annoncée (exemple : si $Q_{\min} = 1 \text{ m}^3/\text{h}$, avec une dynamique 1-4 alors $Q_{\max} = 4 \text{ m}^3/\text{h}$)
- Une première sélection peut avoir lieu en se basant sur les critères fondamentaux, c'est à dire :
 - nature du fluide transporté
 - type de signal de mesure
 - plage de mesure
 - diamètre de la canalisation

5. Les mesures de niveau

5.1. Méthodes hydrostatiques de mesure de niveau

Les premières méthodes de mesure et contrôle de niveaux de liquides sont fondées sur les propriétés hydrostatiques des liquides (pression hydrostatique, poussée d'Archimède).

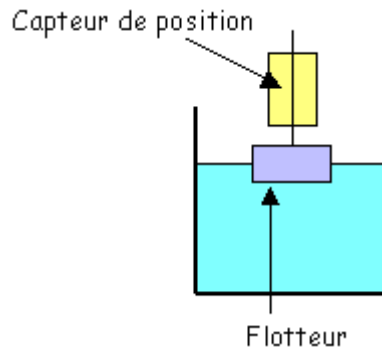
La mesure transmise par les capteurs utilisés est une fonction continue de la hauteur de liquide. Elle est indépendante de ses propriétés électriques mais dépend, sauf dans le cas du flotteur, de la masse volumique du liquide.

On distingue quatre principes de mesure :

5.1.1. Le flotteur

Il se maintient à la surface du liquide, il est rendu solidaire d'un capteur de position qui délivre le signal électrique correspondant au niveau. La mesure s'apparente ensuite à la mesure d'un déplacement ou la détection d'une position.

- domaine d'utilisation : C'est une technologie qui convient mal aux liquides très visqueux susceptibles d'adhérer aux parois du flotteur, modifiant ainsi son poids et par conséquent sa profondeur d'immersion. Ils sont utilisables aussi bien dans les réservoirs ouverts, fermés, sous pression qu'en extérieur sur les puits, canaux... La mesure peut être faussée lorsque la densité du fluide varie
- gamme de mesure : 10 mm à plusieurs mètres (30 m)
- précision : 0,5 à 5% de l'étendue de mesure



Le cas le plus répandu est celui des détecteurs de niveau par transmission magnétique. La transmission est assurée par un système aimant permanent/interrupteur à lame souple (ILS). L'aimant permanent est solidaire du flotteur ou même contenu dans celui-ci. La position du contact est généralement réglable. Pour un montage vertical, le flotteur est guidé par un tube.

5.1.2. Le plongeur

C'est un cylindre immergé dont la hauteur est au moins égale à la hauteur maximale du liquide dans le réservoir. Le plongeur est suspendu à un capteur dynamométrique qui se trouve soumis à une force F (poids apparent), qui est fonction de la hauteur h du liquide.

$$F = P - \rho \times g \times h \times S$$

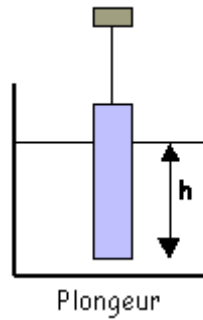
$\rho \times g \times h \times S$: poussée d'Archimède s'exerçant sur le volume immergé du plongeur

S : aire de la section du plongeur

P : poids du plongeur

- domaine d'utilisation : Comme les dispositifs à flotteur, les dispositifs à plongeur utilisent le principe d'Archimède. Le plongeur subit de la part du liquide, une force qui est dépendante du niveau d'immersion. Le plongeur de forme cylindrique est peu sensible aux oscillations de niveaux autour d'un point d'équilibre. Il convient aux liquides très visqueux
- gamme de mesure : 30 cm à 6 mètres maximum
- précision : de l'ordre de 0,5 %

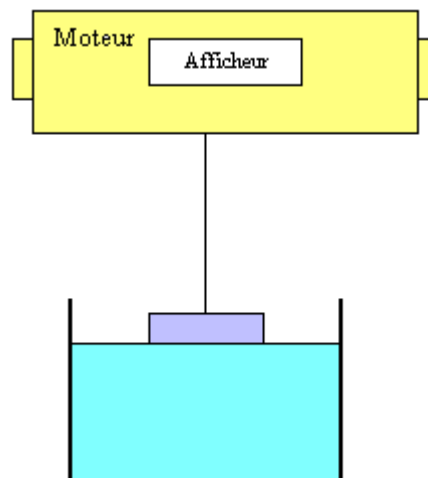
Capteur de force



5.1.3. Le palpeur électromagnétique

Il est constitué d'un contrepoids suspendu à l'extrémité d'un câble. Un moteur permet de dérouler ce câble jusqu'à l'obtention que le contrepoids entre en contact avec ce liquide. A cet instant, la tension du câble se relâche actionnant un commutateur qui inverse le sens de rotation du moteur. Durant la descente du palpeur, des impulsions sont générées à intervalles réguliers. Le comptage des impulsions permet l'obtention du niveau.

- domaine d'utilisation : utilisés pour les installations sur canal ouvert, réservoir de stockage de raffinerie. Ils sont plus coûteux que les dispositifs à flotteur ou à plongeur. Ils portent également le nom de sondes affleurantes
- gamme de mesure : jusqu'à 50 mètres
- précision : de l'ordre du millimètre

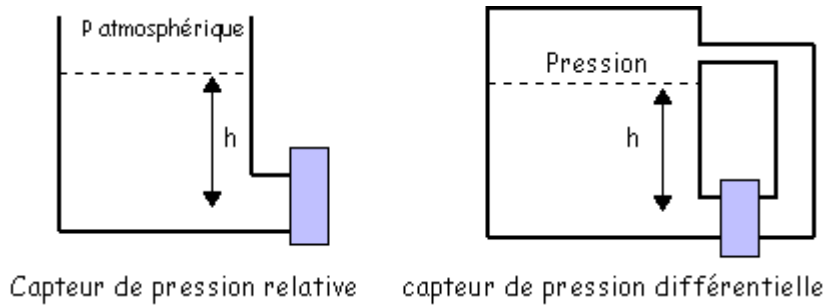


5.1.4. Le capteur de pression

Il mesure :

- la pression relative au fond du réservoir quand celui-ci est ouvert à l'air libre, cette pression est l'image du niveau h du liquide
 $P = \rho \cdot g \cdot h$

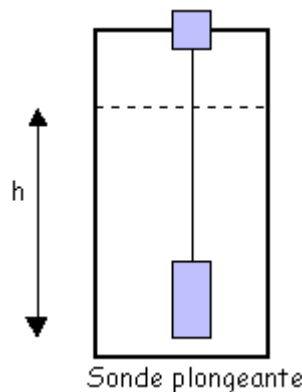
- la pression différentielle quand le réservoir est fermé et sous pression



- domaine d'utilisation : cette technique est utilisable à la quasi totalité des liquides : toutes viscosités, neutres ou corrosifs, chargés ou non, inflammables ou non. Toutefois l'indication délivrée est directement proportionnelle à la densité du fluide. Toute variation de densité fausse la mesure. Utilisation dans une large gamme de la température ambiante -20 à + 80 °C et de liquide (< 120 °C) ainsi que de pression hydrostatique (<25 bars)
- gamme de mesure : depuis 0 à 25 mbar et jusqu'à 25 bars
- précision : 0,5 à 1 % de l'étendue de mesure selon la technologie employée

La fixation s'effectue souvent par une bride à la partie inférieure du réservoir, éventuellement à la partie supérieure si le réservoir est sous pression dans le cas de mesure différentielle.

Dans le cas des puits, on utilise des capteurs montés sur sondes plongeantes fixées au niveau de la paroi supérieure.



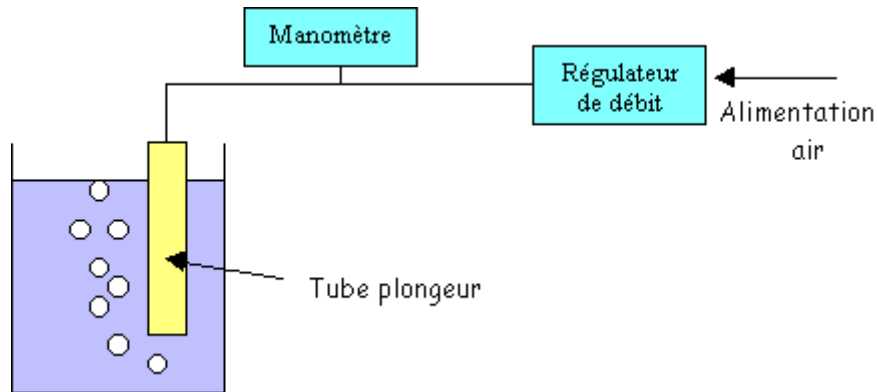
Les technologies utilisées dans les capteurs de pression seront évoquées par la suite. Pour le principe, une membrane élastique se déforme sous l'effet de la pression. Il y a transformation de cette déformation en grandeur électrique. On peut mesurer une pression différentielle avec la pression atmosphérique grâce à une cellule reliée à l'air libre par un tube rigide. Différentes technologies sont utilisées parmi lesquelles les capteurs piézo-résistifs qui sont les plus utilisés dans les eaux usées, les capteurs piézo-électriques, les jauges de contraintes.

5.1.5. Le capteur à bulle (ou limnimètre bulle à bulle)

Le principe consiste à insuffler un débit d'air constant dans un petit tuyau débouchant sous la surface de l'eau, la pression de l'air est équilibrée par la colonne d'eau. La pression de l'air qu'il faut appliquer pour produire des bulles est égale à la pression du fluide en bout de canne. La mesure de la hauteur d'eau est égale à la pression d'air fournie.

Conditions d'installation:

- Extrémité du bullage doit être située sous le niveau minimal de l'eau et au dessus des dépôts possibles
- Absence de coude et longueur limitée à quelques mètres pour le tuyau d'air (pertes de charge)
- Éviter les grandes vitesses de l'eau (forces d'aspiration pouvant fausser notablement la mesure)



- domaine d'utilisation : mesure des hauteurs de liquide jusqu'à 1,5 m de hauteur d'eau environ. Le système est sensible aux obturations et aux modifications de la température
- précision : 2 % environ



Limnimètre bulle à bulle

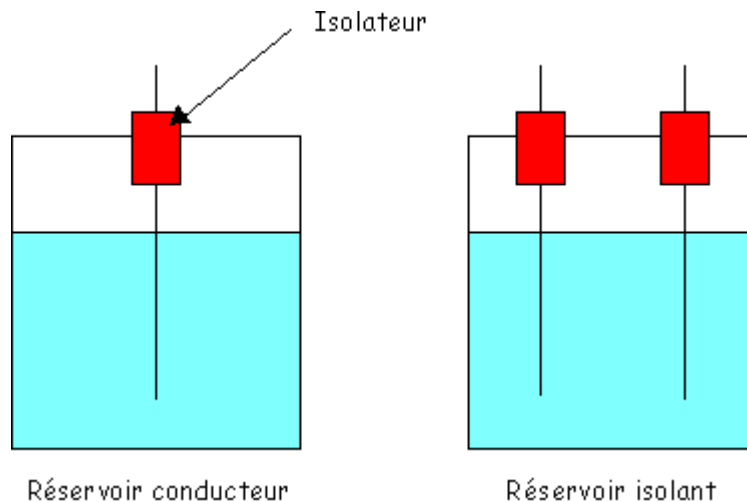
5.2. Méthodes électriques de mesure de niveau

Elles utilisent les propriétés électriques des liquides dont on veut mesurer ou contrôler le niveau et sont les seules à utiliser des capteurs traduisant directement le niveau en signal électrique.

5.2.1. Sondes conductives

Elles ne conviennent que pour les produits conducteurs (liquides, pâtes, granuleux...), ne sont pas

sujettes à l'usure et permettent la détection d'un niveau haut, bas ou intermédiaire. Ces sondes sont dotées d'une ou plusieurs électrodes selon les modèles.



Chaque électrode est installée par un passage étanche de telle sorte que leur extrémité inférieure se situe au niveau à détecter. Elle doit être isolée électriquement de la masse du réservoir quand il est métallique.

Dès que le liquide touche une électrode, il met à la masse un circuit alternatif basse tension. La masse est constituée soit par le réservoir métallique, soit par une deuxième électrode quand le réservoir n'est pas métallique.

Le faible courant parcourant l'électrode est d'amplitude proportionnelle à la longueur d'électrode immergée et suffit à actionner un relais. On utilise une basse tension alternative afin d'éliminer tout risque d'électrolyse du liquide.

Domaine d'utilisation : liquides conducteurs de conductance minimale $25 \mu A/V$ entre électrode et masse. Les températures sont comprises entre -200 et $250^\circ C$ au niveau de l'électrode. La pression de service peut être élevée jusqu'à 160 bars.

Ce principe est déconseillé dans les milieux agressifs et pour les fluides contenant des graisses ou des huiles qui peuvent former des dépôts non conducteurs sur les tiges des électrodes.

5.2.2. Sondes capacitives

Elles sont d'un emploi plus répandues que les précédentes et fonctionnent à l'aide d'une électrode plongeante dans le réservoir.

Pour les produits isolants (huile, pétrole...) la sonde est constituée d'une tige métallique isolée du réservoir. Quand la sonde est découverte, le diélectrique est alors l'air ambiant (constante diélectrique = 1).

En présence d'un produit isolant, la capacité du condensateur augmente sous l'effet de produits qui possèdent une constante diélectrique supérieure à 1. Cette variation de capacité est traitée pour actionner un relais ou fournir un signal de sortie proportionnel au niveau du produit.



Sondes capacitives " Milltronics "

Pour les produits conducteurs (eau, solutions salines...) la constante diélectrique ne joue plus aucun rôle. La tige de la sonde est enrobée d'un matériau isolant, d'épaisseur constante, jouant le rôle de diélectrique.

Les armatures du condensateur sont alors constituées par la tige métallique de la sonde et le liquide conducteur. Si le réservoir est isolant, on immerge une armature. La capacité du condensateur dépend de la densité et de la température des produits, pour remédier à ce problème, on utilise une deuxième sonde capacitive, immergée en permanence et servant de référence.

- domaine d'utilisation : tous types de produits conducteurs ou isolants, liquides, pâtes, granuleux en évitant les produits solides à granulométrie importante et les abrasifs
- gamme de mesure : de l'ordre de 10 m, température de -20 à 85 °C, pression de l'ordre de 40 bars
- précision : de l'ordre de 1 %

5.3. Méthodes fondées sur l'utilisation de rayonnements

Elles permettent notamment des mesures sans contact avec le produit ce qui constitue un gros avantage.

5.3.1. Sondes à ultrasons

Le principe est basé sur l'émission d'une onde ultrasonore réfléchi sur la surface de l'eau. On capte l'écho et on mesure le temps de parcours. Le temps de parcours est indépendant de la nature du fluide et de la pression. Il faut toutefois respecter une zone dite " morte " à proximité du capteur (30 à 60 cm selon les sondes).



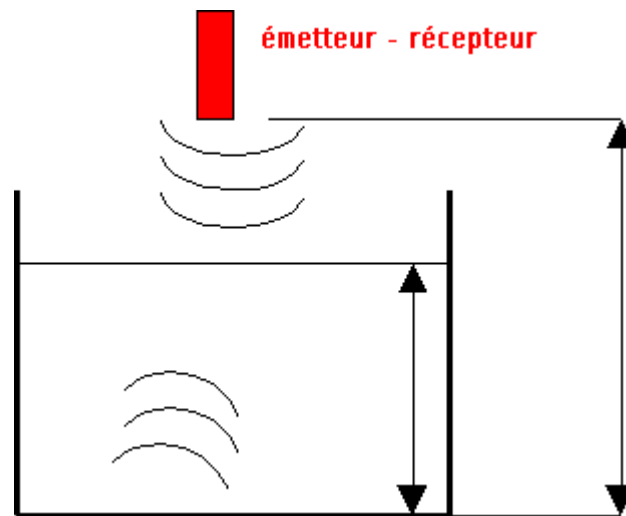
Sonde à ultrasons " Milltronics "

L'amplitude de l'écho peut être sensiblement plus faible (rapport de 10) dans le cas d'un liquide dont la surface est agitée.

- domaine d'utilisation : Ils conviennent pratiquement pour tous les produits alimentaires ou chimiques, fluides liquides ou pâteux de toute température (-190 à 250°C) et pour des pressions jusqu'à 40 bars
- gamme de mesure : jusqu'à 50 m
- précision : dépend de la température (normalement correctement compensée), des turbulences de l'air, du taux d'humidité et des corps flottants et vaguelettes. De 1 à 9 mm selon les fournisseurs soit de l'ordre de 1%

5.3.2. Radars

Le principe est similaire à celui des ondes à ultrasons, on utilise une onde lumineuse infrarouge. L'avantage sur l'ultrason est que le procédé est indépendant de la température, du taux d'humidité et de poussière.

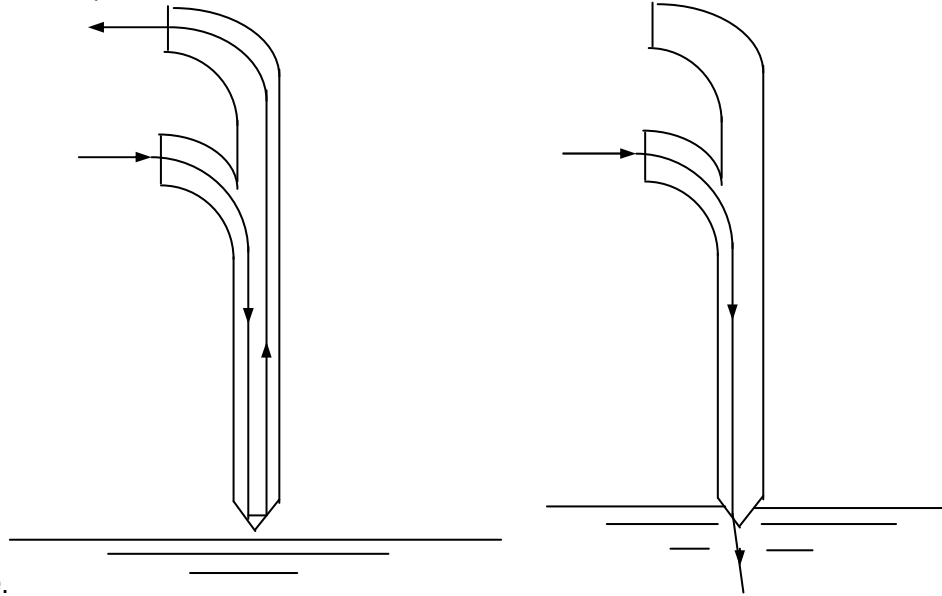


Le transducteur fonctionne successivement en émetteur et en récepteur. Il est placé au sommet du réservoir et émet dans un cône de faible ouverture l'onde qui après réflexion sur la surface du liquide retourne vers le transducteur qui les convertit en signal électrique. Précision : 0,5 % de la distance mesurée, soit 5 à 10 mm dans la plupart des cas.

5.3.3. Sonde optique

La sonde contient une diode électroluminescente (émetteur de lumière), un phototransistor (récepteur) et l'électronique correspondante. La sonde est constituée d'une pointe conique agissant comme un prisme. Le rayon émis par la diode située d'un côté de la tête de la sonde, est réfléchi vers le phototransistor situé de l'autre côté de la tête si le prisme est situé dans l'air. Le rayon est

réfracté dans le liquide si la sonde est



immergée.

- domaine d'utilisation : liquide calme et non mousseux (huile, essence, pétrole, eau claire et boueuse, solutions aqueuses, alcool)
- gamme de mesure : détection de niveau avec une précision de 2,5 mm, des pressions de 10 bars maxi et des température de -20 à 80°C

5.3.4. Mesure par rayonnement gamma (utilisation d'une source radioactive)

Le rayonnement gamma

Les corps radioactifs, ou radio-isotopes, émettent des radiations sous forme de particules et d'ondes électromagnétiques pendant leur cycle de vie en se désintégrant petit à petit.

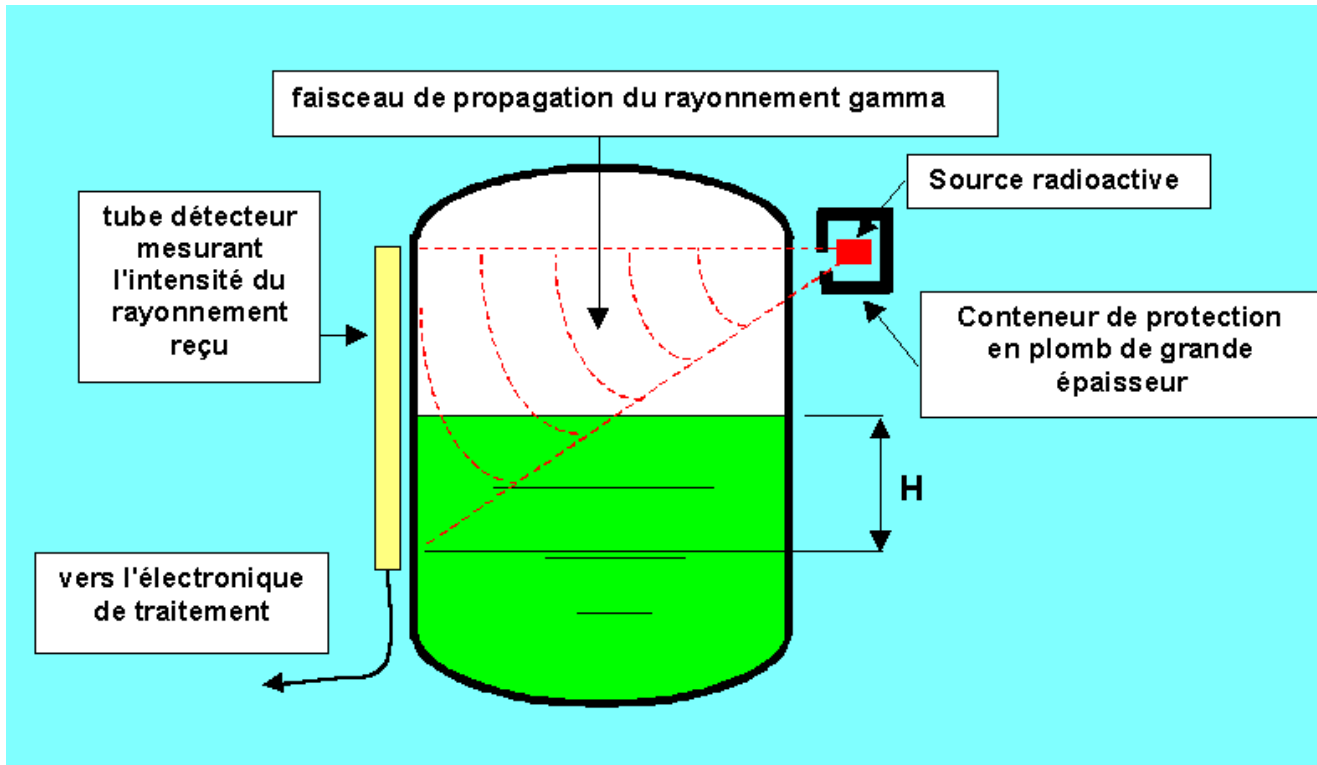
Les trois types de radiations émises les plus connus sont:

- les rayons α (alpha). Ce sont des particules composées de 3 protons et de 2 neutrons (noyaux d'hélium)

- les rayons β (béta). Ce sont des électrons.

- les rayons γ (gamma). Ces rayons sont des ondes électromagnétiques de fréquence beaucoup plus élevée que celle des ondes lumineuses (supérieure à 10^{19} Hz, soit une longueur d'onde inférieure à 10^{-2} nanomètre). Ils se propagent donc sans support matériel. Ils sont porteurs d'une énergie beaucoup plus intense et destructrice que celle transportée par les ondes lumineuses (qui vont des rayons infrarouges aux rayons ultraviolets en passant par les couleurs de l'arc en ciel).

Ces particules et ondes électromagnétiques sont émises avec une très grande vitesse. Elles ont une force de pénétration plus ou moins élevée, donc sont plus ou moins absorbées par les corps qu'elles rencontrent selon l'épaisseur et la densité de ces derniers. Les rayons α et β sont beaucoup plus facilement arrêtés que les rayons γ très pénétrants. Ce sont donc ces derniers que l'on utilisera pour traverser les parois métalliques des réservoirs, parfois épaisses, afin de mesurer sans contact le niveau du produit contenu.



L'émetteur est une source radioactive, de faible énergie par sécurité, mais suffisante pour traverser les parois du réservoir. Le radio-isotope est en général un petit solide radioactif de cobalt (Co 60) ou de césium (Cs 137) dont le rayonnement est divergent grâce à une fente angulaire usinée dans le blindage de plusieurs centimètres de plomb entourant la source. Ainsi, le faisceau de radiation couvre la plage de mesure du niveau. L'inverse existe aussi avec une source allongée et un détecteur ponctuel.

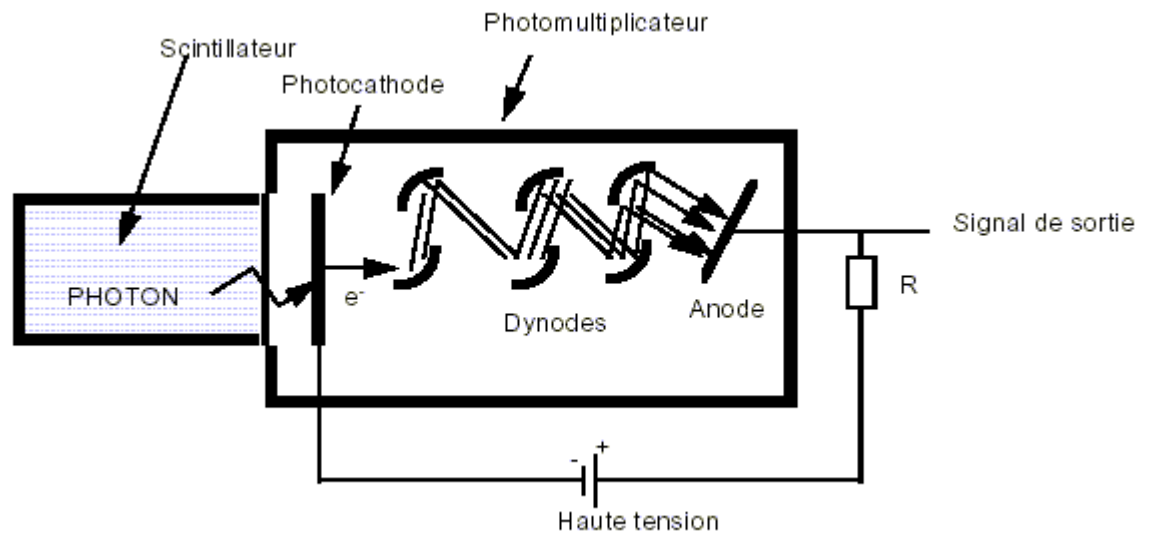
Au cours du temps, la source radioactive vieillit, son activité (c'est à dire le nombre de désintégrations par unité de temps) diminuant. La période est le temps que met la source pour voir son activité réduite de moitié. Cette période est de 33 ans pour le Cs137 et 5,5 ans pour le Co60.

Le détecteur de radiation situé de l'autre côté du réservoir est un tube (ou plusieurs) de hauteur égale à l'étendue de mesure du niveau. Il traduit l'intensité du rayonnement reçu, d'autant plus faible que le niveau de produit est haut, en un signal électrique. Ce signal est ensuite traité, en particulier pour avoir une relation globale linéaire car l'absorption du rayonnement γ n'est pas proportionnelle au niveau H .

Ce détecteur peut être un tube Geiger-Müller, un scintillateur associé à un tube photomultiplicateur, ou une chambre à ionisation.

Dans un détecteur à scintillation (le plus utilisé actuellement), les impacts du rayonnement γ excitent les atomes du produit détecteur avec création de petites étincelles (émission de photons, particules élémentaires d'énergie lumineuse), d'où le terme de scintillateur. Ces photons sont reçus par la photocathode du photomultiplicateur associé à ce détecteur. Celle-ci émet des électrons (e^-) dont le

nombre est amplifié par le photomultiplicateur. On obtient donc un signal électrique fonction de l'intensité du rayonnement g reçu.



Avantages et inconvénients de la mesure de niveau par rayonnement gamma

- l'avantage essentiel est le montage totalement extérieur au réservoir, pouvant se faire sans arrêter ni perturber la fabrication et sans modifier le réservoir.	- risque d'irradiation du personnel ou du produit
- Mesure utilisable avec tous les liquides même très corrosifs, moussants, fortement agités, et tous les solides de petite comme de grande granulométrie (ex: ferraille, cailloux, produits pâteux colmatants, ...)	- mauvaise précision, d'incertitude globale supérieure à $\pm 2\%$ (mesure non linéaire, compensation automatique ou réétalonnage périodique nécessaire à cause du vieillissement de la source dont l'activité diminue, mesure influencée par la masse volumique du produit, l'intensité instantanée du rayonnement fluctue de manière aléatoire car les désintégrations ne sont pas régulières, ...)
- Mesure très peu influencée par la pression ou la température de la phase gazeuse au dessus du liquide	- nombreuses mesures de sécurité nécessaires (protections, contrôle périodique nécessaire et coûteux de la source radioactive par un organisme agréé)
	- coût élevé à l'achat et moins économique à l'exploitation qu'il n'y paraît à cause des contrôles périodiques de la source radioactive

Cette mesure présentant un risque important et de nombreuses contraintes du fait de la source radioactive n'est à envisager que lorsqu'aucune autre solution ne convient.

5.4. Récapitulatif des caractéristiques des capteurs de niveau de liquide

Technologie	Étendue de mesure	Précision	Gamme de Température	Pression max (bar)
Flotteur	10 mm à 30 m	0,5 à 5 %	-180 à 450 °C	100
Plongeur	30 cm à 6 m	0,5 %	-150 à 450 °C	40
Palpeur électromécanique	50 max	1 mm	-160 à 180 °C	25
Capteur de pression	0 à 25 bar	0,5 à 1 %	-20 à 120 °C	40
Sonde capacitive	0 à 10 m	1 %	-20 à 85 °C	40
Radar	0 à 30 m	10 mm	-	-
Ultrasons	0 à 50 m	1 %	-190 à 250 °C	40

6. Les mesures d'humidité

6.1. Mesures par psychrométrie

Mesure du taux d'humidité relative de l'air à l'aide de la mesure des températures sèches et humides que l'on reporte sur un abaque.

La température humide est obtenue à partir d'un thermomètre dont le bulbe est entouré d'une mousseline humidifiée et ventilée naturellement (psychromètre fixe) ou artificiellement (psychromètre crécelle ou psychromètre à aspiration). L



Table psychrométrique

Cette table permet de connaître l'humidité relative (exprimée en %) à partir de la lecture des températures indiquées par le thermomètre sec et le thermomètre humide disposés côte à côte.

A la **colonne de gauche** correspond la température du thermomètre humide, T_w (w pour "wet", "humide". La **ligne supérieure** (sur fond jaune) indique la **différence des températures** données par les thermomètres humide et sec en °C. A l'**intersection**, on lit l'**humidité relative** de l'air ambiant exprimée en %.

Exemple : Le thermomètre sec indique 21°C et le thermomètre humide indique 16°C. l'écart de

température est donc de 5°C. D'après le tableau ci-dessous, l'humidité relative vaut 57%

T _w (en °C)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
0	100	90	81	72	64	56	50	42	36	30	25	20	16
1	100	91	82	74	66	58	52	45	39	34	28	23	18
2	100	91	83	75	67	60	54	48	42	36	31	26	22
3	100	92	84	76	69	62	56	50	44	39	34	29	25
4	100	92	84	77	70	64	57	52	47	41	36	32	28
5	100	93	85	78	71	65	59	54	48	43	39	34	30
6	100	93	85	79	72	66	61	55	50	45	41	36	33
7	100	93	86	79	73	67	62	57	52	47	43	39	35
8	100	93	87	80	74	69	63	58	54	49	45	41	37
9	100	94	87	81	75	70	65	60	55	51	47	43	39
10	100	94	87	82	76	71	66	61	57	53	49	45	41
11	100	95	89	83	77	72	67	62	58	54	50	47	43
12	100	94	89	83	78	73	68	63	59	56	52	48	44
13	100	95	90	84	78	74	69	65	61	57	53	50	46
14	100	95	89	84	79	74	70	66	62	58	54	51	47
15	100	94	89	84	80	75	71	67	63	59	55	52	49
16	100	95	90	85	80	76	72	68	64	60	57	54	50
17	100	95	90	85	81	77	72	69	65	62	58	55	52
18	100	95	90	86	81	77	74	70	66	63	59	56	53
19	100	95	91	86	82	78	74	70	66	63	60	57	54
20	100	96	91	87	82	78	74	71	67	64	61	58	55
21	100	96	91	87	83	79	75	72	68	65	62	59	56
22	100	95	91	87	83	80	76	72	69	66	63	60	57
23	100	96	91	87	84	80	76	73	69	67	63	61	58

6.2. Hygromètre à sorption

Les hygromètres à sorption mesurent la température d'équilibre d'une solution saline permettant d'accéder, par calcul, à la température de rosée (Td).

6.2.1. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement des capteurs à sorption repose essentiellement sur les propriétés physiques des solutions salines saturées.

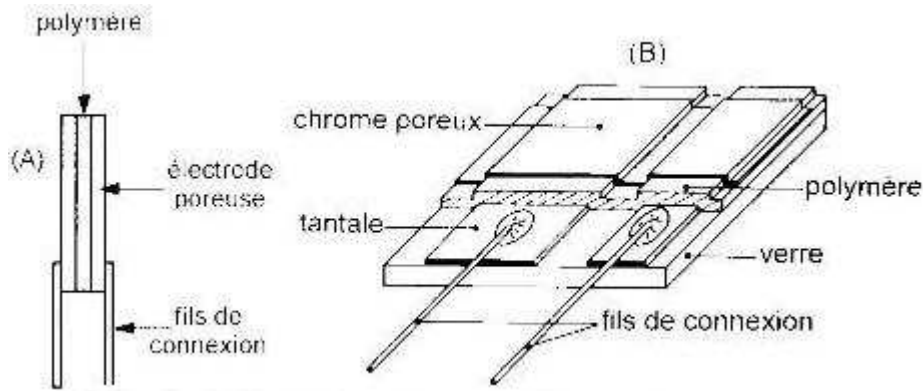
Une solution saline de chlorure de lithium (LiCl) dont la pression de vapeur saturante à l'équilibre est très inférieure à la pression de vapeur au-dessus de l'eau est généralement utilisée.

Cette solution est déposée sur un support dans lequel est insérée une sonde de température. Par l'intermédiaire d'électrodes métalliques enroulées autour du support, on provoque une évaporation de l'eau par effet Joule, proportionnelle au courant d'alimentation.

La conductivité électrique décroît au fur et à mesure que la teneur en eau diminue, théoriquement jusqu'à la cristallisation totale du sel. L'échauffement diminue, et le sel absorbe de nouveau de la vapeur d'eau.

La cristallisation du sel se produit à une certaine température dite *température d'équilibre* qui est fonction de la température de rosée T_d de l'air ambiant.

6.3. Hygromètre capacitif



Dans son principe, un hygromètre capacitif est constitué par une lame de polymère hygroscopique sur laquelle sont déposées deux électrodes métalliques poreuses, l'ensemble constituant un condensateur.

Lorsque le polymère adsorbe les molécules d'eau, son volume augmente et la distance entre les électrodes s'accroît, ce qui se traduit par une variation de capacité du condensateur.

Le signal mesuré correspond aux variations de fréquence du capteur.

Ces hygromètres ont une réponse linéaire à $\pm 1\%$ entre 0% et 80% d'humidité relative. Au-delà, la linéarité est moins bonne et l'écart peut atteindre $\pm 3\%$ au voisinage de la saturation.

6.4. Hygromètre à condensation ou à point de rosée

La mesure de la température de rosée permet de connaître l'humidité absolue de l'air. Pour atteindre ce point de rosée, il suffit de refroidir progressivement une surface plane et lisse jusqu'à ce qu'un film d'eau se condense.

La température de surface est alors très proche de celle du point de rosée.

Un hygromètre à condensation comporte un petit miroir refroidi. Il est éclairé par une diode électroluminescente et lorsqu'il n'est pas recouvert de buée, le faisceau de lumière incident est réfléchi vers le boîtier de l'hygromètre.

Lorsque de la buée apparaît, le miroir diffuse la lumière qui impressionne alors un détecteur (phototransistor). Ce détecteur est relié au circuit de régulation de la température et commande alors le réchauffement du miroir.

La rosée disparaît et entraîne de nouveau la commande de refroidissement et ainsi de suite.

Grâce à un système de régulation approprié, il est possible de maintenir un dépôt constant de condensation sur le miroir et il suffit alors d'enregistrer sa température à l'aide d'un microcapteur thermique, délivrant un signal électrique.

Ces hygromètres fonctionnent généralement pour une gamme de température allant de -80°C à $+100^{\circ}\text{C}$ avec une incertitude qui peut être réduite à $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$. Les seuls inconvénients de l'instrument sont son prix élevé et sa complexité.

6.5. Hygromètre électrolytique

L'hygromètre électrolytique permet de mesurer de **très faibles quantités de vapeur d'eau** contenues dans l'air ou dans un gaz quelconque.

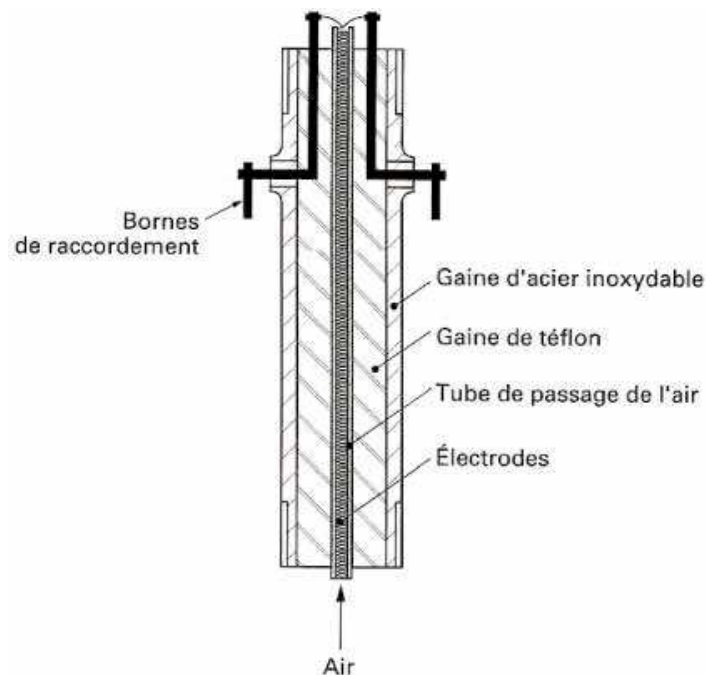
L'élément sensible de l'hygromètre est constitué d'un tube à l'intérieur duquel se trouve un enroulement de deux électrodes, en platine ou en rhodium, entre lesquelles se trouve une couche d'anhydride phosphorique (P_2O_5).

Le gaz à analyser circule dans le tube de mesure ; la vapeur d'eau contenue dans le gaz est absorbée par l'anhydride phosphorique qui se transforme en acide phosphorique.

Une tension continue est appliquée entre les électrodes et provoque une électrolyse de l'eau, avec dégagement d'oxygène et d'hydrogène et régénération de l'anhydride phosphorique.

D'après la loi de Faraday, qui donne le rapport entre la quantité d'électricité passant entre les électrodes et la quantité d'eau électrolysée, pour un débit-volume d'air donné, on détermine la concentration de vapeur d'eau C_v contenue dans l'air humide (en kg de vapeur par m^3 d'air humide).

L'indication de la mesure est généralement donnée en ppm volume (rapport du volume de vapeur d'eau au volume total d'air



7. Mesures de Densité radioactive

Un **dosimètre** est un **instrument de mesure** destiné à mesurer la **dose radioactive** ou l'**équivalent de dose** reçus par une personne exposée à un **rayonnement ionisant**.

Il existe deux types de dosimètre : le dosimètre passif (ou à lecture différé) et le dosimètre opérationnel (ou électronique, ou actif).

Dans la réglementation française, le port du dosimètre est obligatoire pour tous les travailleurs affectés à des travaux sous rayonnements ionisants :

- en **zone surveillée**, seul le dosimètre passif est obligatoire ;
- en **zone contrôlée**, la réglementation exige le port d'un dosimètre passif et d'un dosimètre opérationnel. Néanmoins, la mesure légale sera celle du dosimètre passif.

7.1. Le dosimètre passif

Ce dosimètre est à lecture différé et fonctionne comme un film photographique ou selon les principes de la **luminescence**.

Indépendamment de la technique utilisée, il existe plusieurs types de dosimètre selon la mesure qui doit être réalisée :

- le dosimètre "corps entier", porté sur la poitrine, la dose mesurée est considérée comme étant appliquée à l'ensemble de l'organisme,
- le dosimètre "extrémité", il peut être porté sous forme de bracelet ou de bague afin de mesurer la dose reçue sur certaines parties du corps.

La dosimétrie passive est réalisée grâce à des dosimètres films-badges, appelés aussi dosifilms. Ils servent à mesurer les doses reçues, de rayonnement β , X, γ et neutron en donnant une réponse différée. Le dosifilm est porté à hauteur de la poitrine. Cet emplacement a été choisi, car il correspond à la valeur moyenne de l'exposition totale du corps. Ceci dit, dans des cas particuliers, la médecine du travail peut demander de porter un dosifilm supplémentaire pour permettre de connaître la dose reçue à un endroit spécifique du corps. Ci-dessous, des bagues permettant la mesure de dose aux extrémités, par exemple.

Le principe de la dosimétrie passive consiste en l'utilisation de films recouverts d'émulsions qui ont des sensibilités sélectives pour les différents types de particules. On mesure la noirceur globale du film qu'on compare à une échelle témoin. Ce dosimètre est donc à lecture différé et fonctionne comme un film photographique ou selon le principe de la **thermoluminescence**.

Le dosimètre stimulé thermiquement (TLD)



Bague fluorure de lithium FLi

C'est un dosimètre à **lecture différée** dont le principe de fonctionnement **Thermo Luminescent Dosimeter** repose sur la lecture d'une émission de lumière par chauffage du dosimètre. La première phase est celle de l'enregistrement qui consiste à mesurer le **rayonnement ionisant** à l'aide d'un support à fluorure de lithium FLi en rapport avec les risques d'exposition aux rayonnements ionisants (**X, γ, β, neutrons**). Dans la seconde phase, celle de lecture, la luminescence est provoquée par chauffage. Les charges émettent alors une impulsion de lumière proportionnelle à la dose de rayonnement reçue. L'inconvénient de cette méthode par rapport la dosimétrie **OSL** ou **RPL** est que les pièges étant totalement vidés, il ne sera pas possible de relire le dosimètre.

Le dosimètre à luminescence optiquement stimulée (OSL)

C'est un dosimètre à **lecture différée** dont le principe de fonctionnement **Optically Stimulated Luminescence** (ou Luminescence Stimulée Optiquement) repose sur la lecture d'une émission de lumière¹.

Cette technologie, apparue dans les **années 1990**, est maintenant très répandue. Chaque mois, plus de 1,5 million de personnes portent ces dosimètres dans le monde.

Principe

La première phase est celle de l'enregistrement qui consiste à mesurer le **rayonnement ionisant** (**X, γ** ou **β**). Lors de l'exposition de ce dosimètre sous des rayonnements ionisants, des charges se trouvent piégées dans le matériau sensible. Dans la seconde phase, il est placé sous des flashes lumineux **Laser** ou **diodes électroluminescentes**. Les électrons retenus dans ces pièges libèrent alors une lumière proportionnelle à la dose équivalente reçue.

La source de stimulation est facilement contrôlable. De ce fait une grande partie de l'information est conservée par le capteur. Contrairement au TLD où les pièges sont entièrement vidés, l'OSL autorise la relecture du dosimètre.

Le matériau

La technologie OSL utilise différents matériaux. En France, à ce jour, **LCIE LANDAUER** est le seul laboratoire agréé utilisant cette technologie. La mesure de dose s'effectue grâce à une fine feuille de poudre d'oxyde d'aluminium dopé au carbone, $Al_2O_3:C$. Cette poudre résulte d'un cristal obtenu après mélange à haute température d'oxyde d'aluminium pur et de dopants. Cette dernière est ensuite enduite grâce à un liant entre deux bandes de film polyester. Ce cristal est fabriqué par **LANDAUER** suivant les spécifications propres à son dosimètre **InLight®**.

Avantages de l'OSL

- seuil de détection de 10 μ Sv et saturation à 10 Sv en routine (voir plus en laboratoire),
- relecture possible des dosimètres,
- différenciation des rayonnements X, gamma et Bêta,
- insensible aux neutrons ce qui est important en cas de d'exposition en champs complexe,
- insensible à l'humidité et à la chaleur,
- informations qualitatives sur les conditions d'exposition (statique, dynamique ou due à une contamination).

Le dosimètre radio photo luminescent (RPL)

C'est un dosimètre à **lecture différée** dont le principe de fonctionnement **Radio Photo Luminescence** est connue depuis la fin des **années 1960**.

La première phase est celle de l'enregistrement qui consiste à mesurer le **rayonnement ionisant** (X, γ ou β). Celui ci va arracher des **électrons** à la structure du détecteur en verre dopé à l'**argent**. Ces électrons seront piégés par les ions d'argent contenus dans la structure de verre.

La seconde phase est celle recherchée. La lecture différée de l'exposition de la personne travaillant sous des rayonnements ionisants. Le détecteur en verre est donc placé sous un faisceau **ultraviolet** de **longueur d'onde** 320 nm. Les électrons piégés se désexcitent en émettant une luminescence proportionnelle à la **dose équivalente** reçue. En général, ces dosimètres passifs comportent 2 à 5 plages de lectures.

Pour finir, la qualité de ce dosimètre est la possibilité de relecture et la quasi absence d'altération de l'enregistrement. Il a une très bonne sensibilité aux **photons** et aux β , n'est pas sensible aux **neutrons** ce qui est important en cas de d'exposition en champ complexe. Il possède un seuil de détection de $1\mu\text{Sv}$, d'enregistrement de $50\mu\text{Sv}$ et surtout il a une très grande stabilité de lecture.

7.2. Le dosimètre opérationnel



 Un dosimètre opérationnel

Il est à **lecture immédiate** et correspond généralement, comme son nom l'indique à une opération.

La dosimétrie opérationnelle est une dosimétrie individuelle qui doit être mise en oeuvre lors d'une opération se déroulant en zone contrôlée dans un but d'optimisation: Mise en œuvre du principe **ALARA** acronyme de l'expression anglaise **As Low As Reasonably Achievable** traduite en français par l'expression « aussi bas qu'il est raisonnablement possible »

8. Mesures de viscosité

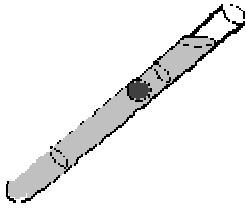
8.1. Viscosimètre d'Ostwald

On mesure la durée d'écoulement t d'un volume V de liquide à travers un tube capillaire.

On montre que la viscosité cinématique ν est proportionnelle à la durée t . Si on connaît la constante de l'appareil (K) fournie par le constructeur : $\nu = K \cdot t$

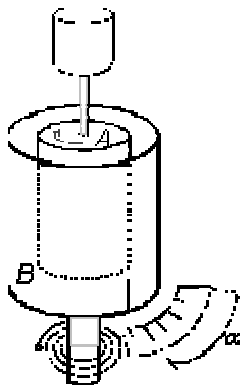
Si on ne connaît pas cette constante, on la détermine préalablement à l'aide de l'eau.

8.2. Viscosimètre à chute de bille ou viscosimètre d'Hoepler



Une bille sphérique tombe lentement dans un tube bien calibré renfermant le liquide visqueux. On mesure la durée t que met la bille pour parcourir une certaine distance. On montre que la viscosité dynamique η est proportionnelle à la durée t : $\eta = K \cdot t$

8.3 - Viscosimètre rotatif ou viscosimètre de Couette



Un cylindre plein (A) tourne à vitesse constante dans un liquide contenu dans un récipient cylindrique (B) ; celui-ci, mobile autour de son axe de révolution, est entraîné par le liquide. Un ressort, exerçant un couple de torsion après avoir tourné d'un angle α , retient (B) en équilibre.

On montre que la viscosité dynamique η est proportionnelle à l'angle α : $\eta = K \cdot \alpha$

8.4. Viscosimètre de type vibrant

Apparue dans les années 50, l'idée du viscosimètre de type vibrant a été reprise, développée et brevetée à la fin des années 70 par la société française **SOFRASER**[®], qui a assuré la promotion de son modèle **MIVI**[™] dans tous les secteurs industriels. Aujourd'hui, les viscosimètres de type vibrant sont reconnus comme étant la solution optimale pour réaliser une mesure de viscosité de process.

Le temps de réponse du capteur est pratiquement nul, et l'information sur la stabilité ou la variation de la viscosité est disponible continuellement, ce qui permet de contrôler les procédés même en présence de phénomènes transitoires de perturbations rapides.

L'absence de pièces en mouvement évite l'usure des pièces et garantit l'absence de dérive, une parfaite stabilité dans le temps, et une maintenance quasiment nulle.

Le fonctionnement à taux de cisaillement élevé, qui réduit la sensibilité de la mesure aux variations de vitesse et de débit lorsque le produit est pseudoplastique ou rhéofluidifiant, est parfaitement adapté aux mesures en process.



9. Analyse des liquides

9.1. PH/REDOX

Qu'est-ce que le pH ?

C'est une valeur, comprise entre 0 et 14, qui traduit l'acidité (ou la basicité) d'une solution.

Une solution est acide si son $\text{pH} < 7$. Plus on se rapproche de 0, plus la solution est acide. (ex: acide chlorhydrique concentré $\text{pH} = 0$, Soda $\text{pH} \# 3$...)

Une solution est basique si son $\text{pH} > 7$. Plus le pH se rapproche de 14, plus la solution est basique. (ex: Soude caustique $\text{pH} = 14$, eau de javel $\text{pH} \# 12$...)

Comment mesurer le pH?

Plusieurs méthodes sont possibles pour mesurer le pH d'une solution.

Les appareils électroniques (pH -mètres) permettent une mesure assez précise de la valeur du pH , à condition d'être correctement étalonnés (réglés).

Les papiers indicateurs de pH , dont la couleur varie en fonction du pH , permettent une mesure un peu moins précise mais suffisante dans certaines situations.

Les bandelettes-tests, basées sur le même principe que les papiers indicateurs, permettent aussi de mesurer d'autres facteurs. (dureté, teneur en nitrates...)

Eau de mer	8,0
Savon	9,0 à 10,0
Ammoniaque	11,5
Chaux	12,5
Soude molaire	14,0
Acide gastrique	2,0
Jus de citron	2,4
Cola	2,5
Vinaigre	2,9
Jus d' orange ou de pomme	3,5
Bière	4,5
Café	5,0
Thé	5,5
Pluie acide	< 5,6
Lait	6,5
Eau pure	7,0
Salive humaine	6,5 – 7,4
Sang	7,34 – 7,45

Pour effectuer les mesures de pH des différents cours d'eau nous avons choisi d'utiliser les



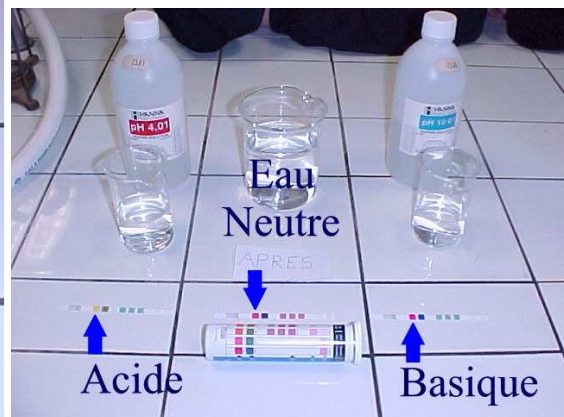
bandelettes-tests Tetra test.

La bandelette comporte 5 zones indicatrices pour 5 paramètres mesurables.

Le tube porte les différentes échelles de teinte servant à la correspondance couleur du test / valeur du paramètre.

Les couleurs jaunes correspondent à un pH plutôt acide, alors que les couleurs violettes correspondent à un pH plutôt basique.

La première étape consiste à plonger la bandelette dans l'eau, en prenant garde de ne pas toucher les zones réactives avec les doigts.



9.2. Conductivité

9.2.1 Sondes à électrodes

La conductivité va déterminer l'ensemble des minéraux présents dans une solution :

Une eau douce accusera généralement une conductivité basse et bien au contraire une eau dite dure affichera une conductivité élevée. Cette mesure détermine la quantité des ions liés contenue dans cette solution qui sont réparties en 2 groupes :

Les Cations :

Calcium
Magnésium
Potassium
Sodium

Les Anions:

Bicarbonates
Chlorures
Sulfates
Nitrates
Phosphates

Ce sont tous ses sels dissous que la conductivité va déterminer en $\mu\text{S}/\text{cm}$ et nous donner une indication sur la qualité de l'eau que nous employons.



DÉFINITION.

La conductivité électrique traduit la capacité d'une solution aqueuse à conduire le courant électrique. Cette notion est inversement proportionnelle à celle de résistivité électrique.

L'unité de mesure communément utilisée est le Siemens (S/cm) exprimé souvent en micro siemens/cm ($\mu\text{S}/\text{cm}$) ou milli siemens (mS/cm).

La conductivité est directement proportionnelle à la quantité de solides (les sels minéraux) dissous dans l'eau.

Ainsi, plus la concentration en solide dissout sera importante, plus la conductivité sera élevée.

Généralement, le rapport entre conductivité et concentration ionique s'exprime par approximation de la façon suivante:

$$2 \mu\text{S}/\text{cm} = 1 \text{ ppm (partie par million),}$$

Ou $1 \text{ ppm} = 1 \text{ mg}/\text{l}$ correspond à la concentration en solide dissous.

MESURE.

On mesure la conductivité en faisant passer un courant alternatif de très basse tension entre deux électrodes.

On plonge la cellule de mesure dans l'eau et on lit la valeur. Le résultat de mesure est le plus souvent indiqué en $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Une élévation de la température augmente la mobilité des ions dans l'eau, la valeur mesurée est alors plus élevée.

Le résultat de la mesure doit toujours comporter l'indication de la température à laquelle elle a été faite, surtout si elle est différente de la température de référence de 20°C .

L'instrument de mesure qui possède une sonde de température incorporée, corrige automatiquement la valeur obtenue en fonction de la température de l'eau.

Pour un conductivimètre ne disposant pas d'une correction automatique on se réfère au tableau suivant. Température lors de la mesure en °c	Facteur de correction
21	0,979
22	0,958
23	0,937
24	0,919
25	0,901
26	0,840
27	0,810
28	0,790
29	0,770
30	0,750

9.2.2 Sondes toroïdales

LARGE GAMME DE MESURE DE CONDUCTIVITE

De 0 à 200 jusqu'à 0 à 2 000 000 $\mu\text{S/cm}$. Une sonde de température intégrée Pt1000 compense les variations de température du procédé.

MAINTENANCE REDUITE

La mesure de conductivité par induction élimine les problèmes d'encrassement et de polarisation qui affectent les capteurs conventionnels à électrodes en contact avec le fluide.

VERSION SANITAIRE NETTOYABLE EN PLACE

Construit avec des matériaux aux normes sanitaires 3-A, elle supporte les nettoyages en lignes avec agents caustiques dans les industries alimentaires (laiteries, brasseries) et pharmaceutiques.



POLYPROPYLENE, PVDF (PolyVinylidene Fluoride, polyfluorure de vinylidène), PEEC (Polymer Electrolyte Electrolysis Cell et TEFLON : SEULS MATERIAUX EN CONTACT AVEC LE FLUIDE

Un seul de ces matériaux est en contact avec le fluide solutionnant ainsi les problèmes de résistance chimique. Isolant, il évite toute boucle de masse qui pourrait perturber la mesure.

Le PEEC a une excellente résistance chimique et convient pour des températures jusqu'à 150°C.

TRES GRANDE VARIETE DE MONTAGES POSSIBLES

Des filetages sont présents à chaque extrémité facilitant le montage sur un té pour usage sur tuyauterie, ou à l'extrémité d'un tube servant de support pour une utilisation en submersion. Raccords union, tés et tubes sont aussi disponibles.



9.3. Analyse de turbidité

La **turbidité** désigne la teneur d'un liquide en matières qui le troublent. Elle est causée par des **particules en suspension** qui absorbent, diffusent et/ou réfléchissent la **lumière**.

Dans le domaine du contrôle de la qualité des eaux, la mesure de la "turbidité" s'avère un paramètre probant dans beaucoup de cas d'applications. C'est le cas dans le traitement des eaux potables et eaux usées, la fabrication des boissons et dans le secteur chimique, depuis la galvanisation à l'industrie pétrochimique.

Les matières solides dissoutes dans un liquide, tels que les algues, la boue, les microbes ou autres particules, absorbent et diffusent la lumière qui les traverse. Plus les particules sont nombreuses, plus le degré de turbidité augmente, à l'oeil nu aussi.

La forme, la taille et la composition des particules influencent le degré de turbidité. Pour mesurer la turbidité, on se contentait naguère de mesurer la lumière qui traversait le liquide.

La mesure de la lumière diffusée sous un angle de 90° s'est avérée supérieure, spécialement dans les champs de mesure plus bas et constitue aujourd'hui dans le monde entier une technique reconnue.

Les appareils de mesure qui utilisent cette méthode sont appelés néphélomètres.

Il existe différents types d'appareils de mesure qui se distinguent surtout par la source de lumière.

Pour les mesures conformes aux normes ISO 7027/DIN EN 27027 (EN ISO 7027), une IR-LED (infrarouge) ayant une longueur d'onde de 860 nm est prescrite.

Les "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" prescrivent une source de lumière à large bande au tungstène ("lumière blanche").

Quelle source de lumière ? Infrarouge ou lumière blanche ?

Une source de lumière infrarouge (IR) minimise, voire rend négligeable, l'effet des colorations d'une solution, car l'absorption est quasiment nulle à la longueur d'onde de 860 nm.

D'un autre côté, la sensibilité de détection des petites particules est légèrement plus basse à cette longueur d'onde, la diffusion étant toujours plus faible pour cette taille de particules.

La lumière blanche (lampe tungstène) présente, elle, une plus grande sensibilité pour ce type d'impuretés. En contrepartie, la coloration propre de la solution perturbe davantage ici.

La norme DIN ISO préconise la mesure IR, et la norme US EPA la mesure avec de la lumière blanche.

Mesure néphélométrique ou de transmission ?

La mesure néphélométrique sous un angle de 90 ° par rapport au faisceau lumineux incident présente des avantages pour les faibles turbidités.

Le procédé de mesure de transmission est, lui, recommandé pour les eaux moyennement ou très troubles, étant donné que l'intensité de la lumière diffusée et la densité d'ombre entre les particules sont proportionnelles à la turbidité.

La baisse d'intensité lumineuse donne en l'occurrence un résultat plus précis que celui obtenu par néphélométrie.

C'est la raison pour laquelle les appareils de laboratoire destinés à la mesure de turbidités élevées sont dotés de bien plus d'options.

Les valeurs de turbidité typiques de différents liquides

Liquide NTU

Eau désionisée 0,02

Eau potable 0,02 ... 0,5

Eau de source 0,05 ... 10

Eaux usées (non épurées) 70 ... 2000

Eau d'égouttage 0 ... 800

(Industrie du papier)