

S8 – CONSTRUCTION ELECTRIQUE

Capteurs et détecteurs

Savoirs et connaissances associés au référentiel BTS ATI :

- **S882 : Détecteurs de position**
- **S883 : Capteurs**
- **S86 (Appareillages électriques) : Recherche de caractéristiques de composants**

Séquence associée au référentiel ICAM Apprentissage 1^{er} cycle :

- **GEA 2 : constituants de commande**

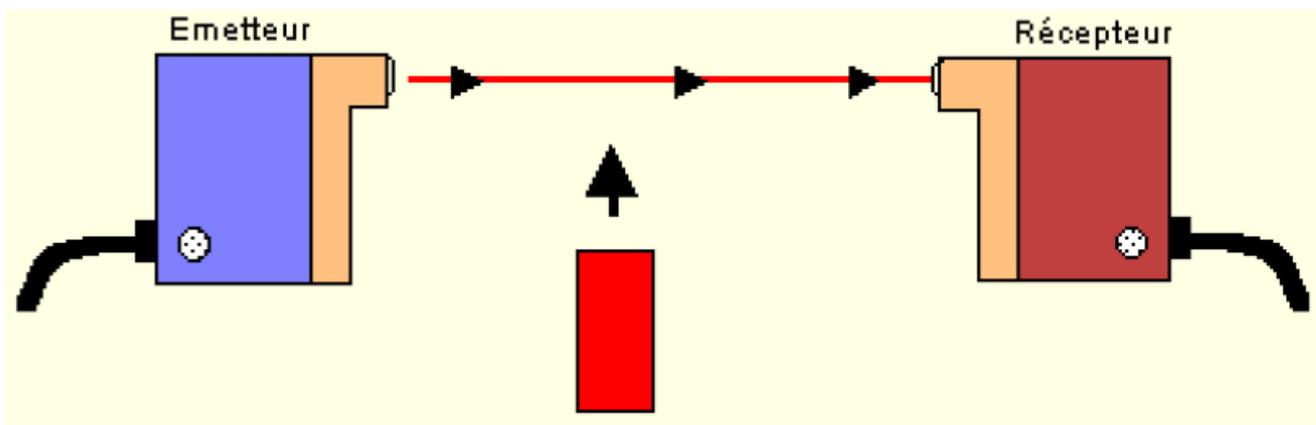
1) Détecteur photoélectrique

Ce capteur signale le passage ou la présence d'un objet à travers un faisceau lumineux. Il se compose essentiellement d'un émetteur à diode électroluminescente (infra rouge) et d'un récepteur photosensible (phototransistor).

Le système est incorporé dans un boîtier d'une grande résistance mécanique et les composants sont enrobés dans une résine époxy.

L'effet photo-électrique est la libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement d'une onde électromagnétique.

Systeme « barrage » :

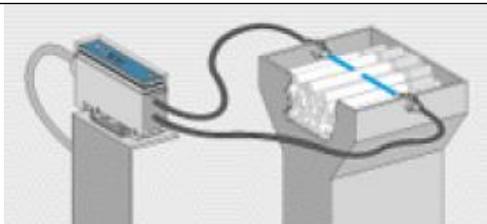


L'émetteur et le récepteur sont situés dans deux boîtiers séparés. C'est le système qui autorise les plus longues portées, jusqu'à 30 m pour certains modèles. Le faisceau est émis en infrarouge. A l'exception des objets transparents qui ne bloquent pas le faisceau lumineux, il peut détecter des objets de toutes natures (opaques, réfléchissants ...), ceci avec une excellente précision grâce à la forme cylindrique de la zone utile du faisceau.

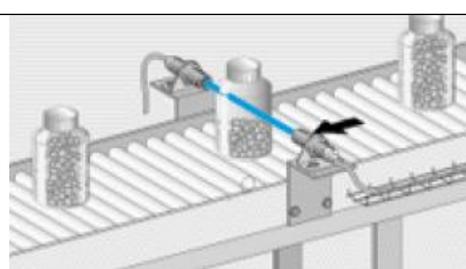
Les détecteurs barrage disposent d'une marge de gain très importante. Ils sont de ce fait particulièrement bien adaptés aux environnements pollués (fumées, poussières, emplacements soumis aux intempéries, etc.).

L'alignement entre émetteur et récepteur doit être réalisé avec soin.

Application : détection de remplissage de bac



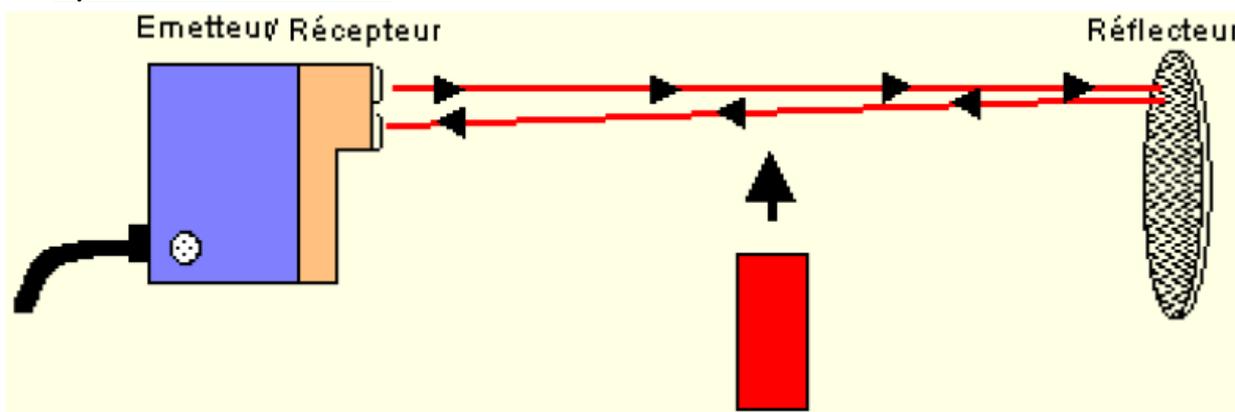
Application : détection de remplissage de pots



Pour insensibiliser le système à la lumière ambiante, on module le signal de façon à obtenir une émission lumineuse pulsée. Seul le signal pulsé sera traité par le récepteur pour commuter la sortie.

L'importante portée utile (jusqu'à 30m) permet l'utilisation du système barrage dans des ambiances polluées en réduisant la distance entre émetteur et récepteur.

Systeme « reflex » :



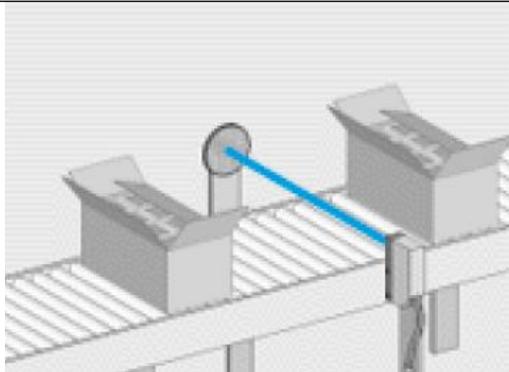
L'émetteur et le récepteur sont regroupés dans un même boîtier. En l'absence de cible, le faisceau émis en infrarouge par l'émetteur est renvoyé sur le récepteur par un réflecteur. Celui-ci est constitué d'une multitude de trièdres tri-rectangles à réflexion totale et dont la propriété est de renvoyer tout rayon lumineux incident dans la même direction.

La détection est réalisée lorsque la cible bloque le faisceau entre l'émetteur et le réflecteur.

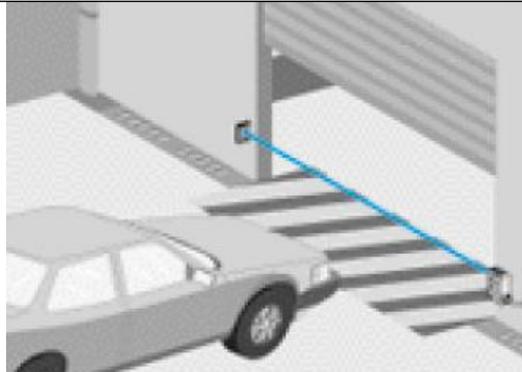
C'est donc un système qui n'est pas adapté pour la détection d'objets réfléchissants qui pourraient renvoyer une quantité plus ou moins importante de la lumière sur le récepteur.

La portée nominale d'un détecteur photoélectrique reflex est de l'ordre de deux à trois fois inférieure à celle d'un système barrage.

Application : détection de passage de colis



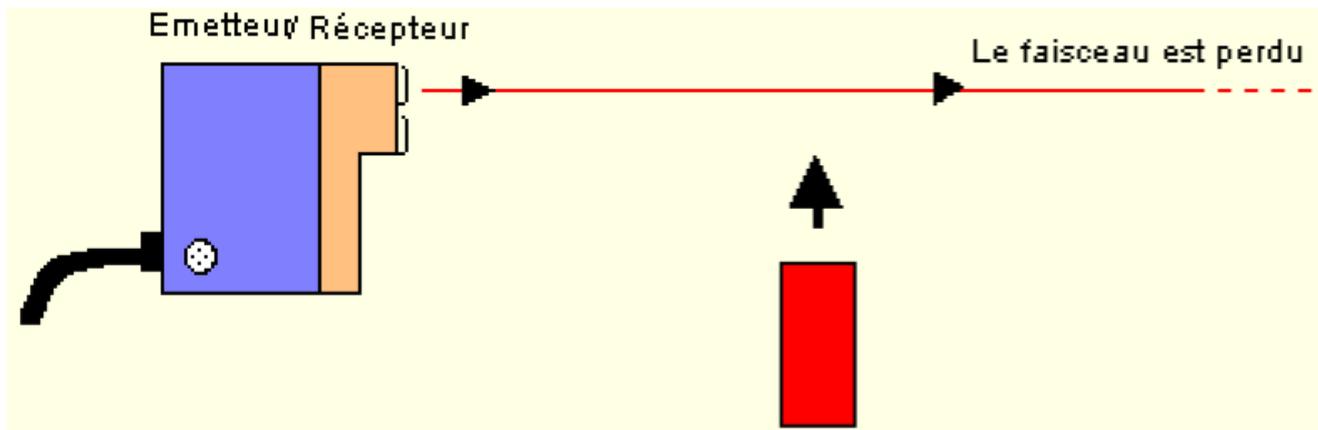
Application : détection de passage véhicule



Contraintes :

- Le réflecteur doit être plus petit que l'objet à détecter
- Le réflecteur doit être bien positionné par rapport à l'émetteur récepteur.
- On peut utiliser des réflecteurs qui polarisent la lumière pour détecter des objets brillants.

Systeme de proximité :



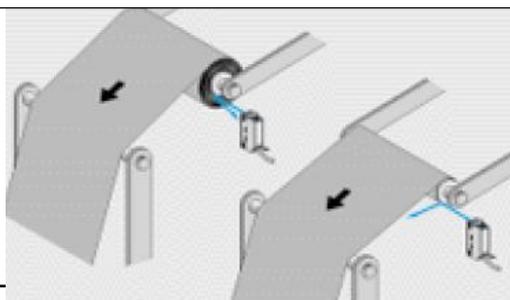
Comme pour le système reflex, émetteur et récepteur sont regroupés dans un même boîtier. Le faisceau lumineux, émis en infrarouge, est renvoyé vers le récepteur par tout objet suffisamment réfléchissant qui pénètre dans la zone de détection. La portée d'un système proximité est inférieure à celle d'un système reflex. Pour cette raison, son utilisation en environnement pollué est déconseillée.

Cette portée dépend :

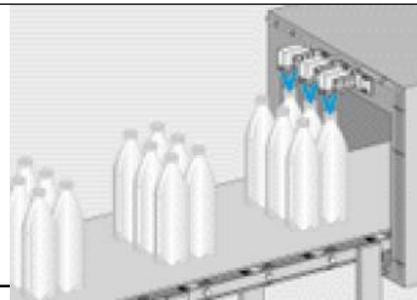
- de la couleur de la cible et de son pouvoir réfléchissant (un objet de couleur claire est détecté à une distance plus grande qu'un objet de couleur sombre),
- des dimensions de la cible (la portée diminue avec les dimensions).

Les portées nominales annoncées sont définies à l'aide d'un écran blanc de dimensions 20 x 20 cm. Les détecteurs de proximité sont souvent équipés d'un potentiomètre de réglage de la sensibilité. Pour une distance donnée cible/émetteur, la détection d'une cible moins réfléchissante nécessite d'augmenter la sensibilité. Ceci peut entraîner une détection de l'arrière-plan si celui-ci est plus réfléchissant que la cible. L'emploi d'un système de proximité avec effacement de l'arrière-plan assure dans ce cas la détection de la cible seule.

Application : détection d'enroulement de tapis



Application : détection de présence de bouchons



Conclusion détecteurs photoélectriques :

Avantages :

- pas de contact direct donc grande durée de vie,
- sortie statique donc pas de rebondissements,
- détection d'objets de toutes natures,
- distance de détection étendue,
- temps de réponse faible.

Inconvénients:

- utilisation seulement en courant continu,
- environnement non pollué.

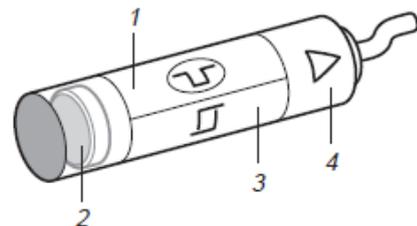
2) Détection par ultrasons

Le principe de fonctionnement de la détection à ultrasons est basé sur la mesure du temps écoulé entre l'émission d'une onde ultrasonique (onde de pression) et la réception de son écho (retour de l'onde émise).

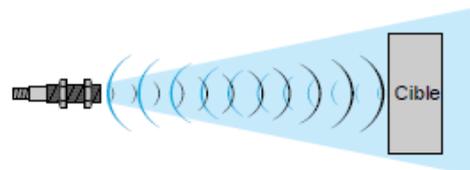
Les détecteurs à ultrasons sont composés de :

- 1 - générateur haute tension
- 2 - transducteur piezzo électrique (émetteur et récepteur)
- 3 - étage de traitement du signal
- 4 - étage de sortie

Excité par le générateur haute tension 1, le transducteur (émetteur-récepteur) 2 génère une onde ultrasonique pulsée (de 200 à 500 kHz suivant le produit) qui se déplace dans l'air ambiant à la vitesse du son.



Dès que l'onde rencontre un objet, une onde réfléchie (écho) revient vers le transducteur.



Un microcontrôleur 3 analyse le signal reçu et mesure l'intervalle de temps entre le signal émis et l'écho.

Par comparaison avec les temps prédéfinis ou appris, il détermine et contrôle l'état des sorties 4.

L'étage de sortie 4 contrôle un commutateur statique (transistor PNP ou NPN) correspondant à un contact à fermeture NO ou NC (détection d'objet).

Les détecteurs à ultrasons permettent de détecter sans contact tout objet quel que soit :

- le matériau (métal, plastique, bois, carton...),
- la nature (solide, liquide, poudre...),
- la couleur,
- le degré de transparence.

Ils sont utilisés dans les applications industrielles pour détecter par exemple :

- la position des pièces de machine,
- la présence de pare-brise lors de l'assemblage d'automobile,
- le passage d'objets sur des convoyeurs : bouteilles en verre, emballages cartonnés, gâteaux...,
- le niveau de peinture de différente couleur dans des pots, de granulés plastiques dans les trémies de machine d'injection...

Les détecteurs à ultrasons sont faciles à mettre en œuvre de par leur connectique de sortie et leurs accessoires de raccordement et de fixation.

Application à la détection de mouvement:

Détection volumétrique hyperfréquence :

Le principe de fonctionnement du détecteur hyperfréquence est fondé sur la technique du radar. C'est d'ailleurs sous ce nom-là qu'est aussi désigné le détecteur hyperfréquence.

Plus précisément, c'est le principe physique de l'effet Doppler-Fizeau que repose le fonctionnement du détecteur hyperfréquence. Un capteur va analyser en permanence la réverbération d'une onde pour en détecter toute perturbation.

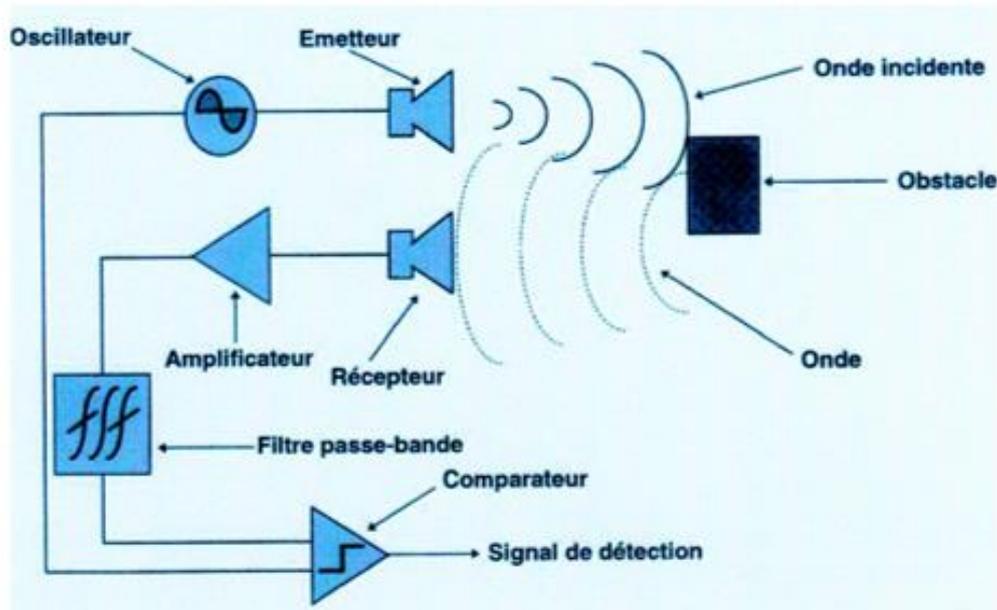
Exemple : un homme qui se déplace dans l'axe du détecteur à 2 Km/h (soit 0,6m/s) génère une déviation de fréquence d'environ 30 Hz. Un homme qui traverse le champ de détection à la même vitesse, mais perpendiculairement à l'axe du détecteur génère une déviation d'environ 3 Hz.

Trois bandes de fréquences sont homologuées en France :

- La bande S de 2,45 Ghz (moins coûteuse, l'émission - réception est assurée par une antenne)
- La bande X de 9,9 Ghz
- La bande K de 24,5 Ghz

L'émetteur émet un signal hyperfréquence dont une partie va être réfléchi dans sa direction et être capté par le récepteur. Si un intrus pénètre dans la zone de couverture du détecteur, il va modifier en partie la réflexion des ondes électromagnétiques, et sera ainsi détecté.

Si le détecteur est installé dans une pièce où il n'y a pas d'intrus, les ondes réfléchies par les obstacles de la pièce seront toujours reçues de la même manière au niveau du détecteur.



Supposons maintenant qu'un intrus pénètre dans la pièce et dans la zone de couverture du détecteur : l'individu provoque une double altération du signal reçu au niveau du détecteur.

La première altération concerne le déphasage entre l'onde réfléchi et l'onde incidente. En effet, une partie des ondes qui se réfléchissait normalement sur les obstacles de la pièce (murs, meubles, etc.) va maintenant être réfléchi par l'intrus qui se situe entre le détecteur et les obstacles habituels. Le chemin parcouru par ces ondes va donc être plus court, et celles-ci mettront moins de temps pour effectuer le chemin émetteur-réflexion-récepteur. Ceci implique que le déphasage reçu par rapport à l'onde émise sera plus faible dans le cas de l'intrus.

La deuxième altération du signal est directement liée à l'effet Doppler-Fizeau. L'individu qui se déplace va provoquer une modification de la fréquence du signal réfléchi par rapport à la fréquence du signal incident.

Ce sont ces deux altérations qui vont permettre au détecteur hyperfréquence de déceler la présence d'un intrus dans sa zone de détection et de pouvoir fournir une information d'alarme à la centrale.

AVANTAGES :

- Faisceau invisible
- Insensibilité aux mouvements de l'air, aux bruits, à la température et à l'humidité
- Dissimulation possible derrière une paroi

INCONVENIENTS :

- Vibrations
- Risques de débordements des locaux à surveiller (cloisons, vitres, bois, ...)
- Risque de réflexion
- Présence des animaux

Détection volumétrique ultrasons :

Comme les détecteurs à hyperfréquence, ces détecteurs sont des détecteurs de mouvement. Ils utilisent l'effet Doppler-Fizeau pour fonctionner.

La principale différence avec les détecteurs à hyperfréquences réside dans le type d'ondes émises et analysées. Il s'agit d'ondes mécaniques qui se déplacent à la vitesse du son (environ 330 m/s). Elles sont électromagnétiques et se déplacent à la vitesse de la lumière (300 000 km/s) pour les détecteurs hyperfréquences.

Les fréquences de travail des détecteurs à ultrasons sont généralement comprises entre 22 KHz et 45 KHz. Les fréquences ultrasons du détecteur vont permettre de ne pas polluer l'univers sonore de l'homme. Quant au détecteur, il ne risque pas d'être perturbé par les sons émis par l'homme.

La particularité des matériaux piézo-électriques est de développer une différence de potentiel (tension électrique) entre leurs deux faces lorsqu'on exerce une pression sur l'une d'entre-elles. Et inversement, lorsqu'on exerce une différence de potentiel entre leurs deux faces, celles-ci génèrent une modification de pression à leurs alentours créant ainsi un phénomène d'ondes mécaniques dans la bande de fréquence acoustique ou ultrasonique.

Le capteur en lui-même est constitué d'un émetteur et d'un récepteur qui comportent tous deux une pastille céramique piézo-électrique munie de deux électrodes.

Les ondes mécaniques ont la propriété, tout comme les ondes électromagnétiques, de se réfléchir sur tous les objets environnants.

Le principe de fonctionnement du détecteur à ultrasons est donc très simple : il est le même que pour le détecteur hyperfréquence.

Un certain nombre de sources ultrasonores existent dans l'environnement de l'homme. Celles-ci peuvent générer un niveau de bruit tel qu'il va empêcher le détecteur à ultrasons de fonctionner correctement. On peut citer notamment la sonnerie du téléphone, l'air brassé par une climatisation, ... Enfin, il convient de noter que ce détecteur peut provoquer une certaine gêne vis à vis des animaux dont l'ouïe est développée pour pouvoir entendre les ultrasons (chien et chat par exemple).

AVANTAGES :

- Insensible aux variations de températures et aux tubes fluorescents
- Pas de réflexion
- Ne traverse pas les vitrages

INCONVENIENTS :

- Portée limitée à 10 m
- Zones d'ombres lorsque les locaux surveillés sont encombrés
- Sensible à tout ce qui bouge (animaux, ventilateur, ...)
- Peut réagir à des ultrasons (sonneries, sifflements) et à des interférences radio ou à des lignes haute tension

3) Capteurs à effet HALL

Utilisation :

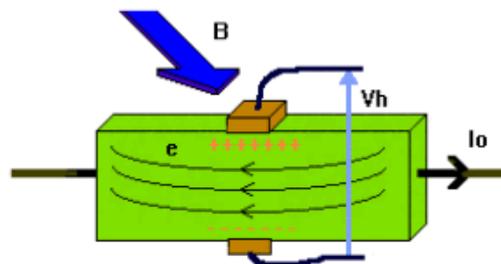
Leur principe est basé sur une découverte déjà ancienne. En 1879, le physicien américain Edwin Herbert Hall découvre que si l'on introduit un élément conducteur de courant dans un champ électromagnétique, il apparaît alors une force électromotrice proportionnelle au champ magnétique appliqué et au courant qui traverse le conducteur. C'est l'effet Hall.

Un capteur à effet hall donne donc un signal lorsqu'il détecte un champ magnétique. La tension de Hall est alors amplifiée dans le capteur.

Principe de fonctionnement :

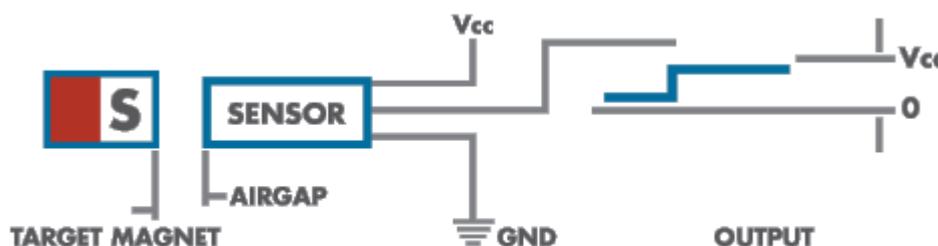
Si un courant I_0 traverse un barreau en matériau conducteur ou semi-conducteur, et si un champ magnétique d'induction B est appliqué perpendiculairement au sens de passage du courant, une tension V_h , proportionnelle au champ magnétique et au courant I_0 , apparaît sur les faces latérales du barreau.

Les électrons sont déviés par le champ magnétique, créant une différence de potentiel appelée tension de Hall. Le champ magnétique déforme la trajectoire des électrons car il engendre une force de LORENTZ (e) : $V_h = K_h \cdot B \cdot I_0$
avec K_h : constante de Hall, qui dépend du matériau utilisé.



Principe de l'effet Hall

La Constante de HALL étant inversement proportionnelle à la densité des porteurs, la tension de HALL est beaucoup plus importante dans les semi-conducteurs que dans les métaux.



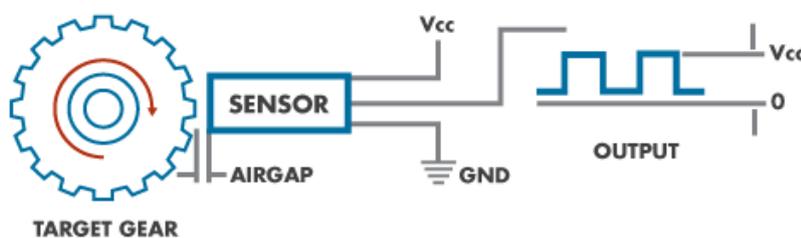
Principe d'un détecteur à effet Hall



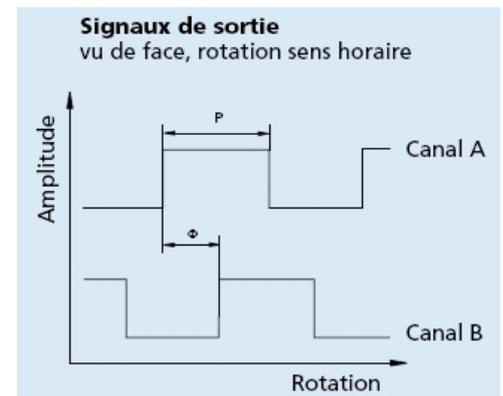
Exemple de détecteur à effet Hall

Les détecteurs à effet Hall peuvent être utilisés comme capteur de position et/ou de vitesse angulaire, ils permettent aussi de connaître le sens de rotation.

Le codeur utilise un disque magnétique multipolaire à faible inertie et deux sondes à effet Hall pour générer deux signaux de sortie déphasés de 90° . En cas de rotation dans le sens horaire, le signal du canal A précède celui du canal B. La résolution dépend du nombre de pôles du disque en rotation.



Principe d'un codeur à effet Hall



Le capteur de régime moteur est un capteur à effet HALL, il délivre une tension de 5V lorsqu'il voit passer un pôle nord (une dent) et 0V lorsqu'il voit passer un pôle sud (creux).

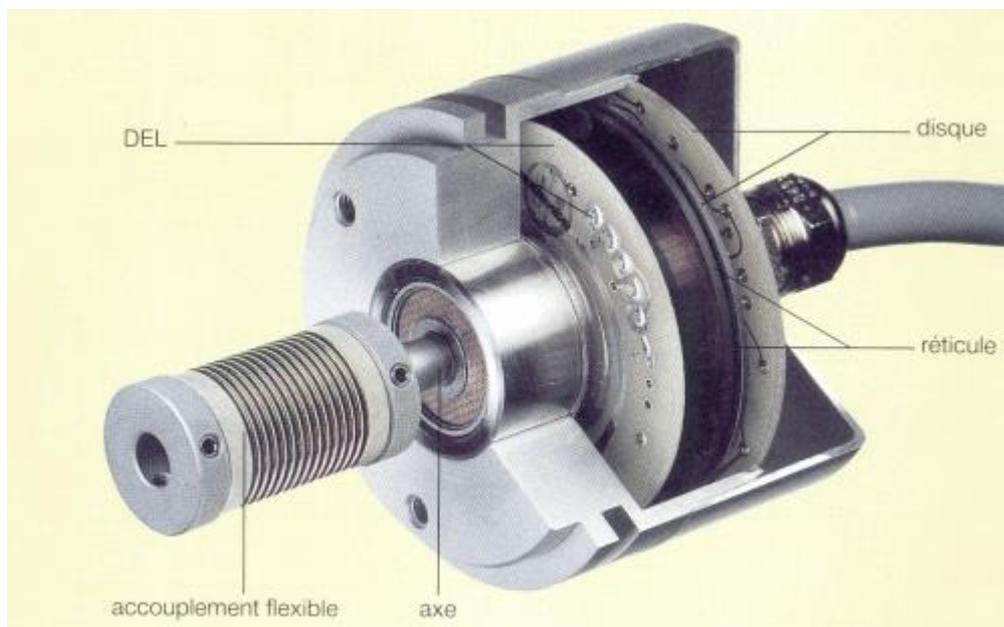
De cette manière les points morts hauts sont détectés, ce qui permet d'enclencher les allumages des bougies de chaque chambre de combustion.

AVANTAGE : Ces codeurs sont plus résistants et moins onéreux que les codeurs optiques (incrémentaux ou absolus).

4) Codeurs optiques

Un codeur optique est un capteur de position angulaire délivrant une information numérique :

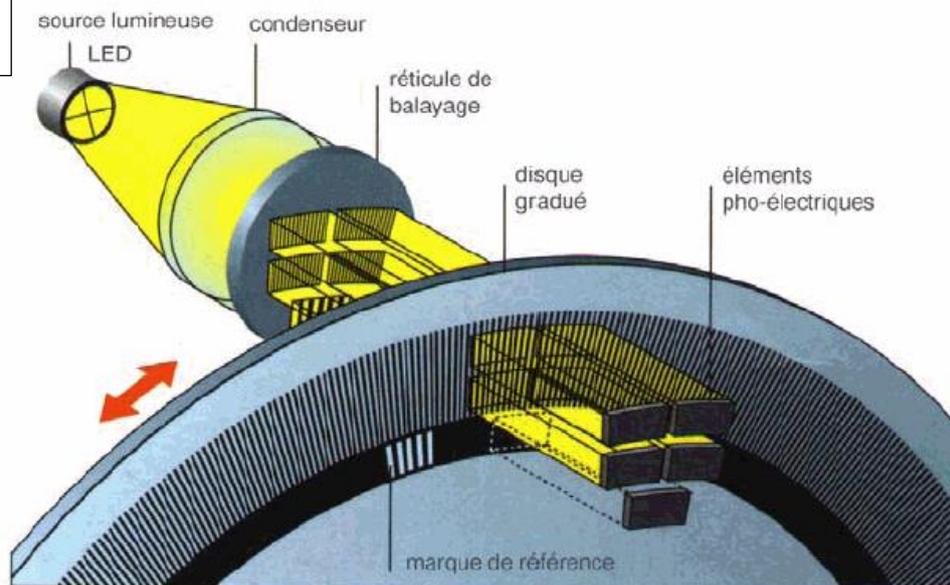
- lié mécaniquement à un arbre qui l'entraîne, son axe fait tourner un disque qui lui est solidaire. Le disque comporte une succession de parties opaques et transparentes.
- une lumière émise par des Diodes Electro-Luminescentes (DEL), traverse les fentes de ce disque créant sur les photodiodes réceptrices un signal analogique.
- électroniquement ce signal est amplifié puis converti en signal carré, qui est alors transmis à un système de traitement.



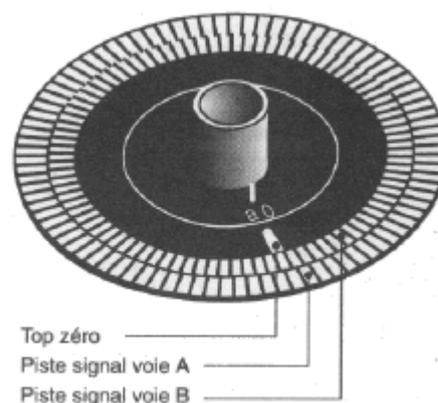
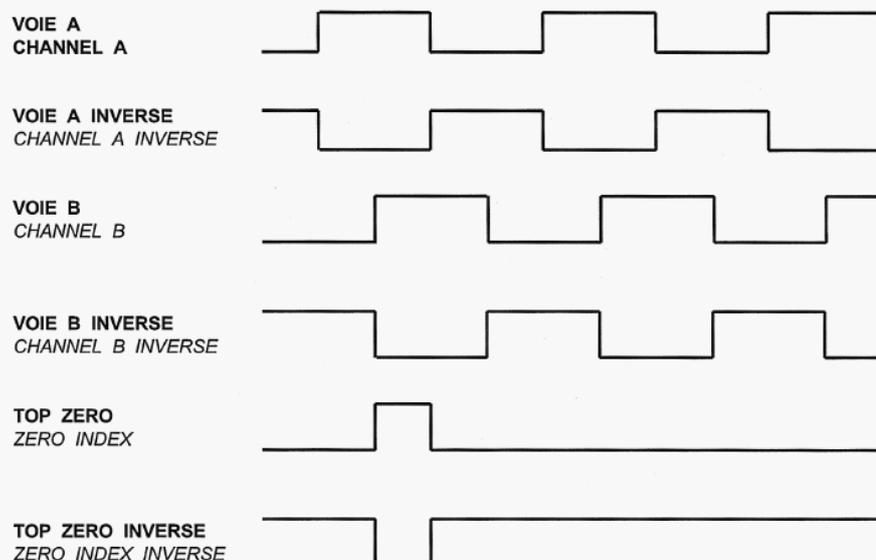
Un codeur optique est donc un dispositif électromécanique dont la sortie électrique représente sous forme numérique une fonction mathématique de la position angulaire de l'axe d'entrée. Il est composé de 3 parties :

- un axe codeur (partie mécanique),
- un disque gradué (partie optique),
- une étage de lecture et traitement du signal (partie électronique).

Codeur incrémental



Le disque du codeur incrémental comporte au maximum 3 pistes :
 Une ou deux pistes extérieures sont divisées en (n) intervalles d'angles égaux alternativement opaques et transparents.
 Pour un tour complet du codeur, le faisceau lumineux est interrompu (n) fois et délivre (n) signaux carrés (A et B) en quadrature.



Disque de codeur incrémental

ROTATION SENS HORAIRE VUE DU COTE DE L'AXE.
 CLOCKWISE ROTATION SEEN FROM THE SHAFT SIDE.

Le déphasage de 90° électrique des signaux A et B permet de déterminer le sens de rotation :

- Dans un sens pendant le front montant du signal A, le signal B est à zéro.
- Dans l'autre sens pendant le front montant du signal A, le signal B est à un.

La piste intérieure (Z : top zéro) comporte une seule fenêtre transparente et délivre un seul signal par tour. Ce signal Z d'une durée de 90° électrique, détermine une position de référence et permet la réinitialisation à chaque tour.

Le comptage-décomptage des impulsions par l'unité de traitement permet de définir la position du mobile.

AVANTAGES :

- Généralement moins coûteux, encombrants que les codeurs absolus
- Nécessite moins d'entrées sur l'API (6 entrées au maximum)

INCONVENIENTS :

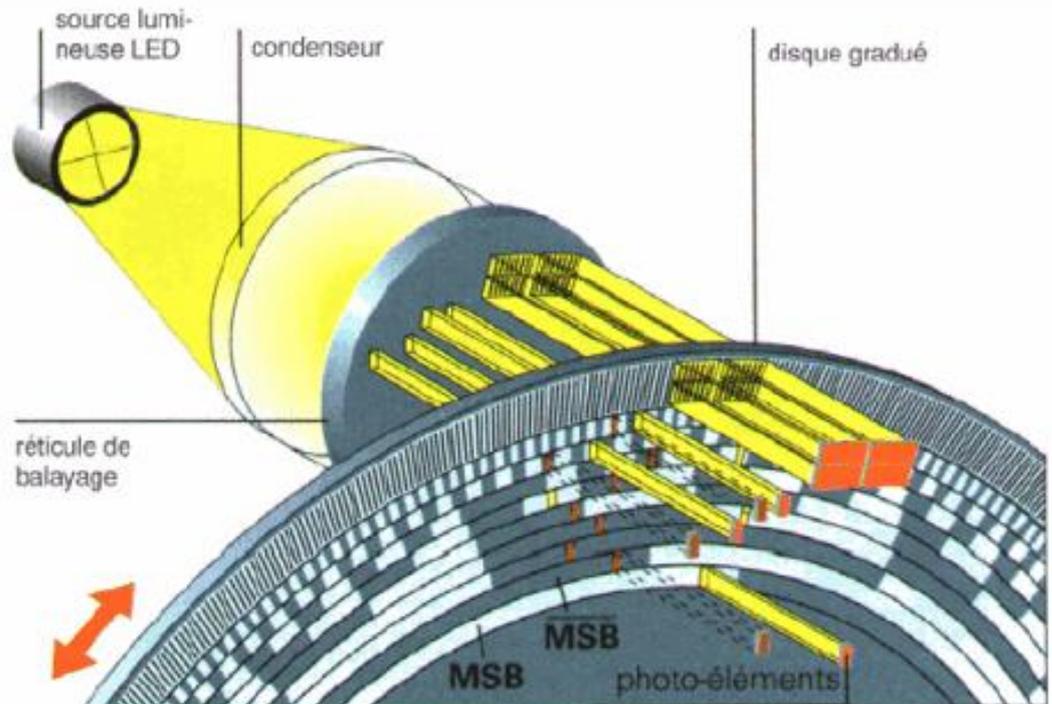
- Sensibilité aux coupures du réseau

Tous les segments étant d'égale longueur et représentés de la même manière par les signaux A et B, chaque coupure du courant fait perdre la position réelle du mobile. Il faut alors procéder à la réinitialisation. Ce temps de réinitialisation peut être pénalisant pour certaines applications.

- Sensibilité aux parasites en ligne

Un parasite reçu sur la ligne peut être comptabilisé par le système de traitement comme un signal d'incrément, sauf en cas de traitement du signal complémentaire.

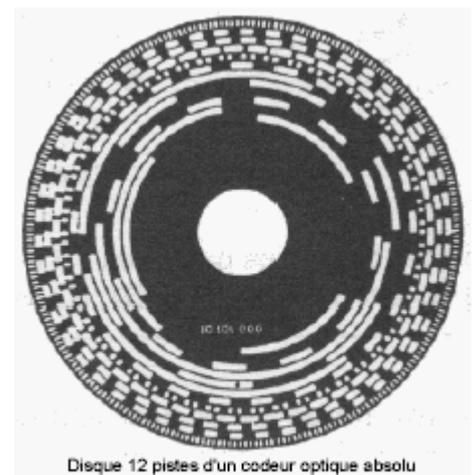
Codeur absolu



Le disque des codeurs absolus comporte un nombre « n » de pistes concentriques divisées en segments égaux alternativement opaques et transparents. A chaque piste est associé un couple émetteur / récepteur optique. Chaque piste a donc son propre système de lecture

La piste intérieure est composée d'une moitié opaque et d'une moitié transparente. La lecture de cette piste (« bit de poids le plus fort ») :
MSB = « Most Significant Bit », permet de déterminer dans quel demi-tour on se situe.

La piste suivante est divisée en quatre quarts alternativement opaques et transparents. La lecture de cette piste combinée avec la lecture de la piste précédente permet alors de déterminer dans quel quart de tour ($\frac{1}{4}$) on se situe.



Disque 12 pistes d'un codeur optique absolu
Disque de codeur absolu

Les pistes suivantes permettent successivement de déterminer dans quel huitième de tour ($\frac{1}{8}$), seizième de tour ($\frac{1}{16}$), ... etc. on se situe.

La piste extérieure donne la précision finale et est appelée :

LSB = « Least Significant Bit » (bit de poids le plus faible).

Cette piste comporte 2 puissances « n » points ($2n$) correspondant à la résolution du codeur.

Pour chaque position angulaire de l'axe, le disque fournit un « code binaire » de longueur « n » correspondant à $1/2n^{\text{ème}}$ de tour.

Un codeur absolu délivre en permanence un code qui est l'image de la position réelle du mobile à contrôler.

Mode de codage :

Le nombre de sorties parallèles est le même que le nombre de bits ou de pistes sur le disque.

Elles sont désignées par $B1...Bn$ (binaire pur), ou $G1...Gn$ (Gray).

Suivant le mode de traitement (automates, commandes numériques, ordinateurs, cartes, ...), le choix se portera soit sur un code binaire pur, soit sur un code de Gray.

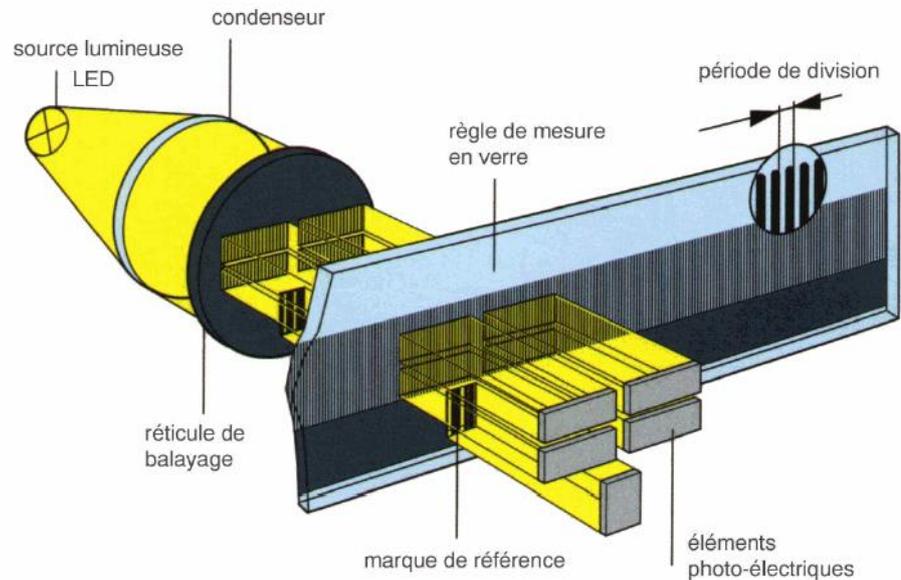
AVANTAGES :

- Insensibilité aux coupures du réseau
- Pas de besoin de réinitialisation en cas d'arrêt d'alimentation désirée ou non.
- Insensibilité aux parasites en ligne

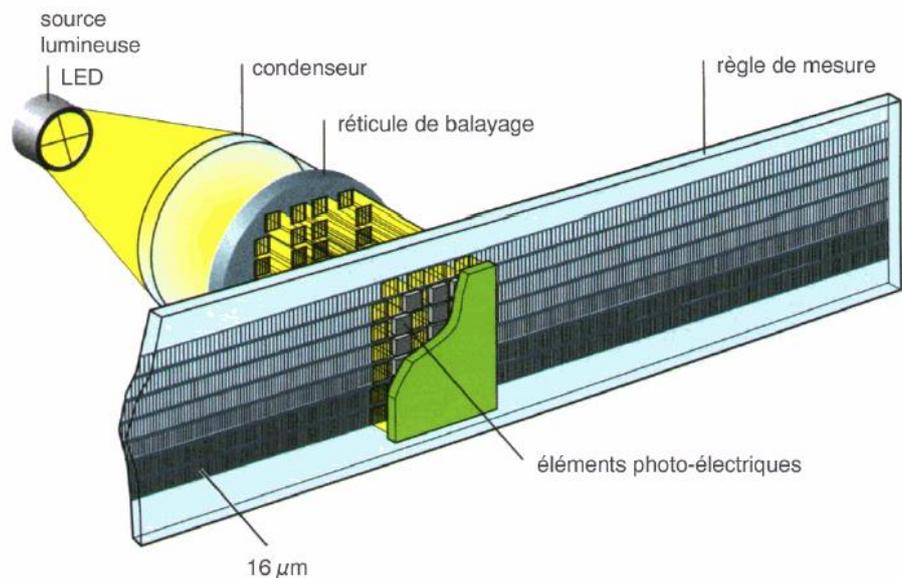
INCONVENIENTS :

- Généralement plus coûteux, encombrants que les codeurs incrémentaux
- Nécessite plus d'entrées sur l'API (au minimum une par bit pour des capteurs 10 ou 12 bits par exemple).

Règle optique à codage incrémental



Règle optique à codage absolu



Le principe de mesure des règles optiques est la détection photoélectrique, sans contact et sans usure d'une piste finement graduée sur une règle en verre ou en acier. Comme pour les codeurs optiques, il existe des règles absolues et des règles incrémentales.

Elles permettent de mesurer un déplacement en translation au plus proche de l'effecteur et non de l'actionneur (moteur et codeur optique) et donc de mesurer plus précisément le déplacement réel.

5) Capteurs de température

La température est un paramètre important dans les processus industriels. Différentes technologies sont employées pour mesurer la température selon de l'étendue et la précision désirée.

La température agit sur les propriétés physiques de la matière :

- Pression
- Résistivité électrique
- Changement de phase
- ...

On retrouve donc plusieurs méthodes de mesure :

- Méthodes optiques (rayonnement spectral)
- Méthodes mécaniques (dilatation d'un solide, d'un liquide ou d'un gaz)
- Méthodes électriques (résistivité, force électromotrice à la jonction de matériaux de natures différentes, fréquence de résonance d'un quartz)

Echelles de température (grandeur intensive) :

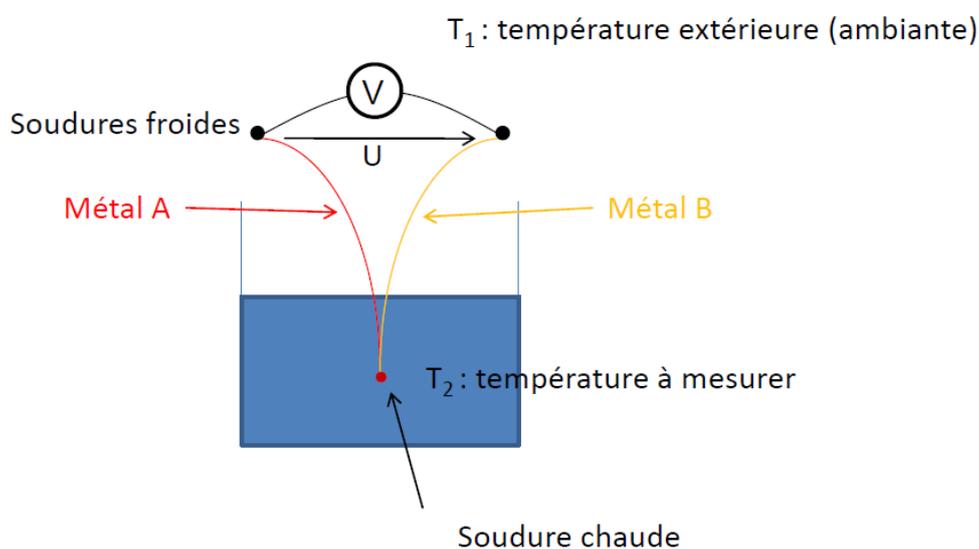
- Kelvin : défini à partir du point triple de l'eau, qui vaut 273,16 K «Le kelvin est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau», 0 K est le zéro absolu (aucune agitation thermique)
- Celsius : $T_{\text{C}} = T_{\text{K}} - 273,15$, le zéro absolu vaut donc $-273,15^{\circ}\text{C}$
- Fahrenheit : L'échelle fahrenheit attribue une plage de 180°F entre la température de solidification de l'eau et sa température d'ébullition (solidification de l'eau à 32°F et point d'ébullition à 212°F). Ainsi :
 $T_{\text{F}} = 9/5 T_{\text{C}} + 32$ ou $T_{\text{C}} = 5/9(T_{\text{F}} - 32)$

Les thermocouples

Les thermocouples sont utilisés principalement dans l'industrie car ils sont très précis et moins délicats que les capteurs à résistance mais ils nécessitent l'utilisation de câbles et de bornes spéciales pour leurs raccordements.

Le thermocouple est constitué de deux conducteurs de métaux différents raccordés à l'une de leurs extrémités. Lorsque la jonction est chauffée il apparaît une tension aux bornes des conducteurs.

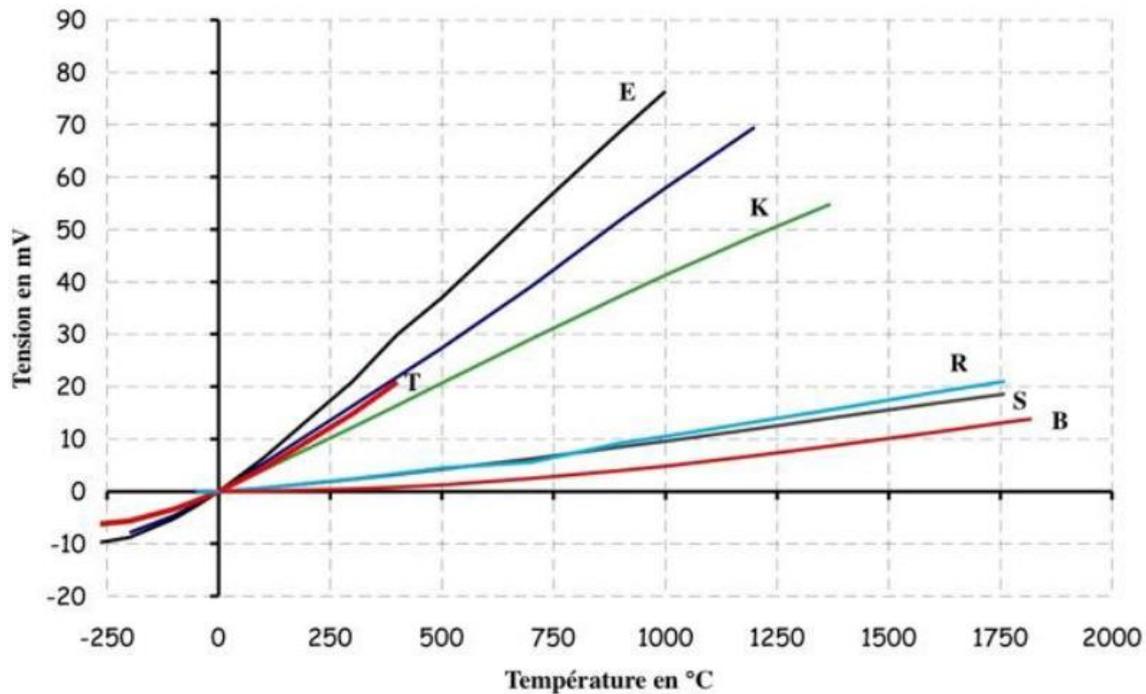
Si $T_2 \neq T_1 \rightarrow$ apparition d'une tension U :



Cette tension U dépend de la température et de la nature des conducteurs. Les thermocouples sont normalisés, les types les plus courants sont :

| Type | Métaux utilisés (+) / (-) Couleurs fils | Plages de temp (°C) | Adaptés à : Inadaptés à |
|------|--|---------------------|--|
| E | Chromel (Ni-Cr) / constantan (Ni-Cu) Violet / blanc | -270 à 1 100 | Milieus oxydants et inertes Vide, milieux réducteurs |
| J | Fer / Constantan Noir / Blanc | 0 à 750 | Milieus réducteurs, inertes, vide Basse température |
| K | Chromel / Alumel (Ni-Al) Vert / Blanc | -250 à 1 250 | Milieus oxydants et inertes Vide, milieux réducteurs |
| N | Nicrosil (Ni-Cr-Si) / Nisil (Ni-Si) Mauve / blanc | -270 à 1 300 | Milieus oxydants à haute température et dans le vide |
| T | Cu / Cu-Ni Marron / blanc | - 250 à 400 | Bonne précision à basse température Limité en hautes températures |

Courbes caractéristiques pour différents thermocouples



AVANTAGES :

- Large gammes de température : de 0 à 1 600 K
- Robustes : résistent aux chocs et aux vibrations
- Réponse rapide (ms à quelques s)
- Fiables et précis
- Reproductibles

INCONVENIENTS :

- Température de référence nécessaire
- Réponse non linéaire
- Faible sensibilité pour certains types de thermocouples

Les capteurs à résistance :

Les capteurs de température à résistance donnent un signal proportionnel à la température. Ces éléments sont fragiles et doivent être protégés par une encapsulation construite de manière à assurer le meilleur transfert thermique entre le procédé et la sonde.

On utilise la variation de la résistivité en fonction de la température.

Le capteur est constitué d'un fil (ou d'un film) métallique, la résistance du capteur est mesurée par un circuit électronique qui effectue la linéarisation et donne un signal proportionnel à la température.

Les métaux les plus couramment utilisés sont :

- Le platine (Pt), étendue de mesure -290..1100 °C, pour les applications industrielles.
- Le nickel (Ni), étendue de mesure -60...180 °C, technique du bâtiment.

La valeur de la résistance d'un capteur au platine est approximée par la formule :

$$R = R_0 \cdot (1 + a \cdot T + b \cdot T^2)$$

Avec :

- R_0 = résistance du capteur à 0 °C (généralement 100Ω, 500Ω ou 1000Ω)
- $a = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ pour le platine
- $b = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$ pour le platine
- T = température du capteur en °C.

La sonde la plus couramment employée est la sonde Pt100 au platine qui a une résistance de 100Ω à 0°C et 138,5Ω à 100°C (variation quasi linéaire entre -200 et 800°C).

Caractéristiques techniques

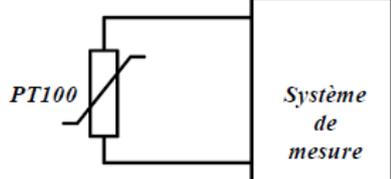
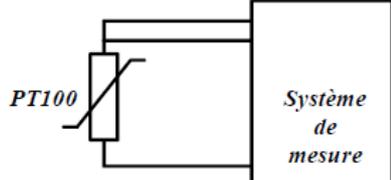
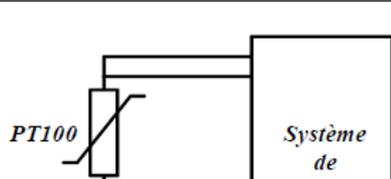
| | | | |
|--|-----------------------------------|---|--------------|
| | Norme | EN 60 751 | |
| | Coefficient de température | $\alpha = 3,850 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (entre 0 et 100 °C) | |
| | Plage de température | -70 à +400 °C | |
| | Tolérance | Plage de température valable pour la classe 1/3 DIN B : -50 à +200 °C Plage de température valable pour la classe A : -70 à +300 °C Plage de température valable pour la classe B : -70 à +400 °C | |
| Courant de mesure/Courant maximal | Pt 100 | recommandé 1,0 mA | maximal 7 mA |
| | Pt 500 | recommandé 0,7 mA | maximal 3 mA |
| | Pt 1000 | recommandé 0,1 mA | maximal 1 mA |
| | Pt 2000 | recommandé 0,1 mA | maximal 1 mA |
| | Pt 5000 | recommandé 0,1 mA | maximal 1 mA |

La précision de la mesure dépend de la sonde, mais aussi de l'électronique de détection et du couplage mécanique, thermique entre la sonde et le milieu étudié qui peut entraîner une erreur de plusieurs degrés :

Tolérances (norme CEI 751) :

- Classe A : $\Delta T = 0,15^\circ\text{C} + 0,002T$
- Classe B : $\Delta T = 0,3^\circ\text{C} + 0,005T$

Pour une grande longueur, les résistances des fils de connections de la sonde au système de mesure ne sont plus négligeables. Il faut donc tenir compte de cette erreur en employant des dispositifs de câblages particuliers :

| | | |
|---------|---|--|
| 2 fils, |  | <p>Il n'a pas de compensation de la résistance des fils.</p> <p>Utilisation pour de faible longueur</p> |
| 3 fils, |  | <p>Le système de mesure possède une compensation interne.</p> <p>Utilisation pour de moyenne longueur</p> |
| 4 fils. |  | <p>Le système de mesure possède une compensation interne encore plus précise.</p> <p>Utilisation pour de grande longueur</p> |

Les thermistances :

Les thermistances sont généralement utilisables jusqu'à environ 300°C. Mais du fait de la forme de leur réponse, elles ne sont utilisées que sur une faible plage de température (100°C) où elles sont très sensibles mais très précises (sensibilité environ 10 fois supérieure aux sondes métalliques).

On distingue 2 types de thermistances :

- Les CTN (Coefficient de Température Négatif, en anglais NTC, Negative Temperature Coefficient) sont des thermistances dont la résistance diminue de façon uniforme quand la température augmente et vice-versa.
- Les CTP (Coefficient de Température Positif, en anglais PTC, Positive Temperature Coefficient) sont des thermistances dont la résistance augmente avec la température.

Elles sont composées de mélanges d'oxydes métalliques :

- Concernant les CTN, elles sont fabriquées à base d'oxydes de métaux de transition (manganèse, cobalt, cuivre et nickel). Ces oxydes sont semi-conducteurs.
- Concernant les CTP, elles sont fabriquées à base de titanate de baryum. Leur valeur augmente brutalement dans un domaine étroit de température, puis diminue progressivement au-delà de cette zone. Elles sont comme les CTN, disponibles en différentes variantes et valeurs, et sont plutôt utilisées comme capteurs.
- Certaines CTP sont fabriquées à base de polymère-carbone. Leur valeur augmente aussi brutalement dans un domaine de température étroit, mais sans diminution au-delà. Elles sont principalement utilisées comme fusibles « réarmables ».

Les thermistances CTN permettent à leur résistance de décroître avec la température selon une loi du type :

$$\frac{R_T}{R_0} = \exp \left(\beta \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right)$$

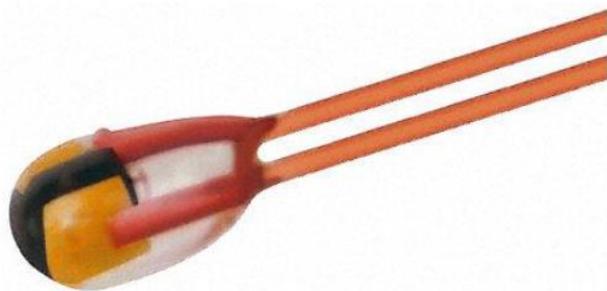
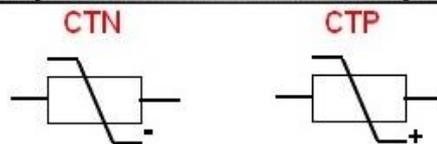
Avec :

- R_T = Résistance (en Ω) du capteur à la température T cherchée (en °K).
- R_0 = Résistance (en Ω) annoncée à une température de référence T_0 (souvent 25°C = 298,15 °K)
- β entre 3000 et 5000 °K qui est un coefficient constant dépendant de la thermistance

Les thermistances ont des plages d'utilisations variées :

- Les CTN peuvent être utilisées dans une large plage de températures, de - 200 à + 1 000 °C, et elles sont disponibles en différentes versions : perles de verre, disques, barreaux, pastilles, rondelles, puces, etc. Les résistances nominales vont de quelques ohms à une centaine de kohms. Le temps de réponse dépend du volume de matériau utilisé.
- Les CTN sont utilisées pour les mesures et le contrôle de la température, la limitation d'impulsions transitoires, la mesure de flux de liquides.
- Les CTP peuvent être utilisées comme :
 - détecteur de température, pour protéger des composants (moteurs, transformateurs) contre une élévation excessive de la température ;
 - protection contre des surintensités² ;
 - détecteur de niveau de liquide : la température de la CTP et donc sa résistance, sera différente lorsque le capteur est dans l'air ou plongé dans un liquide.

Représentation schématique



Thermistance de précision à capsule de verre

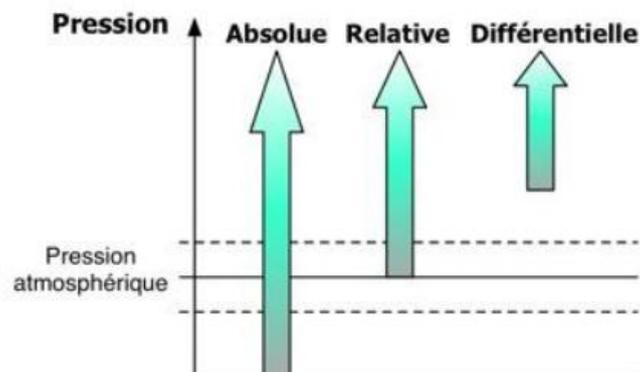
6) Capteurs de pression

Equation aux dimensions de la pression : $P=F/S$ $[P]=ML^{-1}T^{-2}$

Différentes unités de la pression :

| | | |
|---|-----------|---------------------|
| 0 | 100 000 | pascal |
| 0 | 1 | bar |
| 0 | 10,194 | m d'eau |
| 0 | 751,9 | mm de Hg (Torr) |
| 0 | 14,5 | psi |
| 0 | 1 000 000 | barye |
| 0 | 1,02 | kgf/cm ² |

Représentation des pressions mesurables par les capteurs de pression :



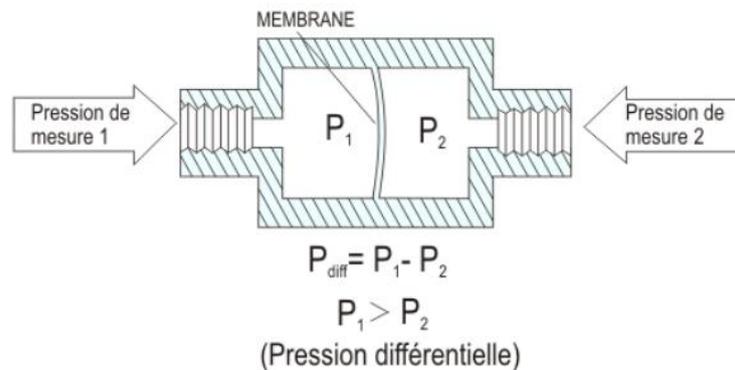
Domaines d'utilisation :

- circuits hydrauliques
- circuits pneumatiques
- contrôle de mise sous pression de récipients
- contrôle de distribution de gaz ou de fluides
- ...

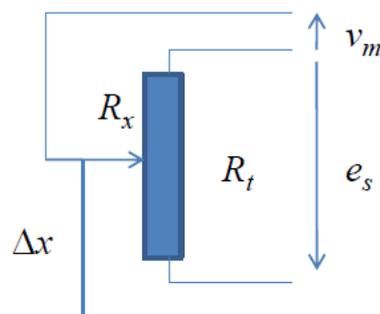
Principaux types de capteurs de pression :

- Les pressostats : dispositifs détectant le dépassement d'une valeur prédéterminée, de la pression d'un fluide.
 - systèmes de contrôle ou régulation (démarrage d'un compresseur d'air ou d'une pompe si la pression du circuit contrôlé descend au-dessous d'une limite déterminée).
 - Enclenchement d'une alarme lorsque la pression dépasse un seuil.
- Les manomètres : instruments servant à mesurer une pression.
- Les baromètres : instruments de mesure, utilisés en physique et en météorologie, qui servent à mesurer la pression atmosphérique.
- Les capteurs de pression à membrane : appareils utilisés 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.

Disposition de base pour la mesure de pression différentielle



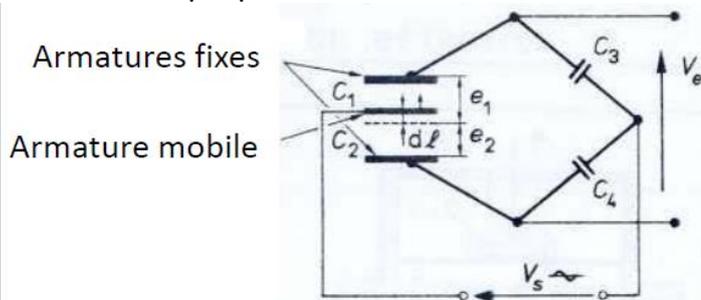
Le curseur d'un potentiomètre est lié à une membrane. La déformation de la membrane entraîne un déplacement Δx du curseur.



$$v_m = e_s \frac{R_x}{R_t}$$

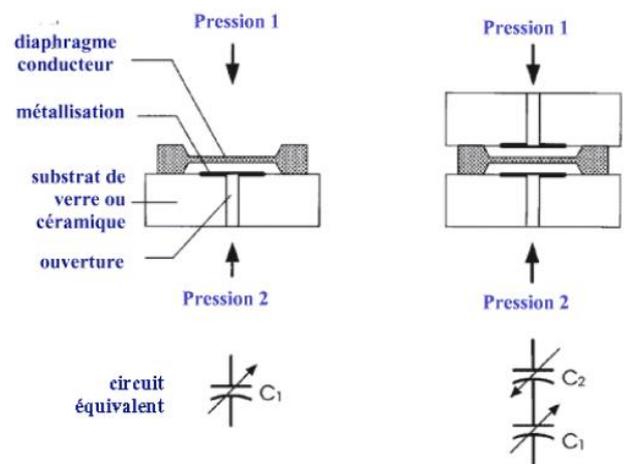
- Cas des capteurs capacitifs à membrane :

Ces capteurs utilisent la variation de distance entre les armatures : le condensateur est destiné à la traduction de déplacements rectilignes ; il est inséré dans un montage en pont. Pour $dl=0$, le pont est équilibré : $V_s=0$. Pour un déplacement dl de l'armature mobile, la tension de sortie V_s est proportionnelle à dl .

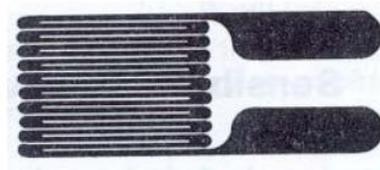


Capteur capacitif associé à un pont de Wheastone

Quand $dl=0$, le pont est équilibré ($V_s=0$)



- Les capteurs de pression piézo-résistifs : appareils utilisés comme jauges de contraintes qui utilisent des piézorésistances (résistances variables avec la variation relative de longueur).



Les jauges sont des éléments résistifs collés sur le corps d'éprouve assurant la conversion directe d'une déformation ϵ de la structure, en variation de résistance électrique ΔR .

- Les capteurs de pression hydraulique : appareil servant à mesurer une pression en envoyant un signal proportionnel à celle-ci.
- Les tensiomètres : appareils servant à mesurer la pression artérielle dans le domaine médical.

7) Capteurs de débit et niveau de fluide

Un écoulement de fluide peut être caractérisé par des mesures en différents points de :

- Son débit.
- Sa masse volumique.
- Sa pression.
- Sa température.
- Sa viscosité.
- Sa diffusion thermique.
- Sa chaleur massique.

Le choix d'un capteur va dépendre de la nature de l'écoulement :

| Type | Nature | Régime | Température |
|--------------------------|---|------------------------|------------------|
| Écoulement monophasique | Liquide ou gaz | Laminaire ou turbulent | Constante ou non |
| Écoulement multiphasique | Interface unique ou interfaces dispersées | | |

Quelques données scientifiques :

Nombre de Reynolds Re (permet de caractériser la nature de l'écoulement dans une conduite) :

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

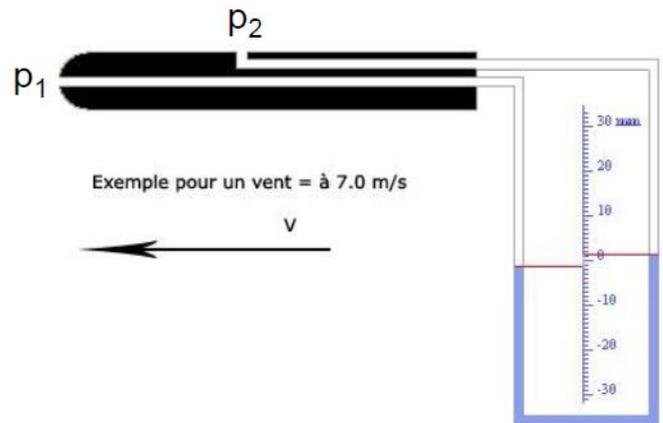
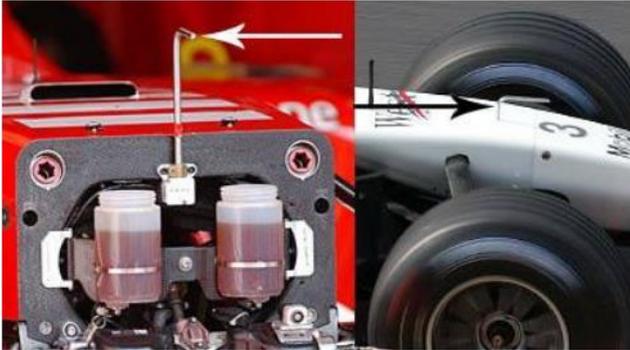
Avec :

- V : vitesse du fluide dans la conduite (en m/s),
- D : diamètre de la conduite (en m).
- ν : viscosité cinématique du fluide (en m^2/s).

Pour une conduite, l'écoulement (monophasique) est turbulent si $Re > 2\ 200$

Mesure de vitesse d'un fluide :

- Anémomètre (par la vitesse de rotation d'une hélice).
- Tube de Pitot : mesure de pression différentielle (loi de Bernoulli) :
Utilisation en aéronautique et en sport automobile :



$$U = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

Mesure de niveau d'un fluide :

Ces mesures permettent de vérifier par exemple des remplissages de réservoirs ou de silos.

Les technologies utilisées sont similaires à celles des capteurs de pression ou de position.

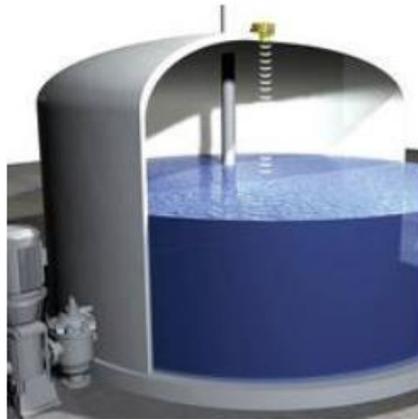
On distingue plusieurs types de capteurs à niveau :

- Capteurs de niveau à palettes :
 - Pour les niveaux de solides pulvérulents ou liquides de forte viscosité.
 - Détection par le couple d'une palette rotative.
- Capteurs de niveau à lames vibrantes :
 - Pour tout type de solide ou de liquide.
 - Détection par variation de la fréquence d'oscillation d'un diapason.



- Capteurs de niveau capacitifs :
 - Principalement destinés pour les produits non conducteurs (pétrole, huile ...).
 - Détection par variation de la capacité électrique (par l'intermédiaire de la constante diélectrique)

- Capteurs de niveau à ultrason :
 - Pour tous produits solides, liquides ou pâteux à toutes températures et jusqu'à des pressions de 40 bars.
 - Détection par émission et réception d'une onde ultrasonore qui se réfléchit sur la surface du produit.



Mesure de débit d'un fluide :

Le débit volumique est défini par : $Q_v = S.v$

Avec S = section de la conduite et v = vitesse du fluide.

L'unité est le $m^3.s^{-1}$

Le débit massique est défini par : $Q_m = \rho . Q_v$

avec ρ = la masse volumique du fluide en kg/m^3 .

L'unité est le $kg.s^{-1}$.

La technologie de mesure dépend de :

- La nature du fluide.
- La vitesse du fluide.
- Le régime d'écoulement.
- La viscosité du fluide.

On distingue plusieurs types de débitmètres :

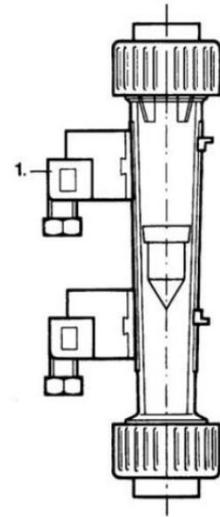
- Les débitmètres à flotteur :

Ils permettent une mesure simple visuelle d'un débit gazeux, liquide ou vapeur.

Ils sont constitués d'un tube conique et d'un flotteur, et sont montés verticalement sur la tuyauterie. Ils ne requièrent pas d'électricité.

La Gamme de débits : 10^{-4} à 200 m³/h.

Pour un débitmètre donné, les limites de l'étendue de mesure sont dans un rapport 10.



- Les débitmètres à turbine :

Principe : rotation d'une micro-turbine Pelton.

Ils sont adaptés aux liquides peu visqueux exempts de bulles ou de matière en suspension : eau, alcool, carburants, acides, gaz liquéfiés ...

On mesure la vitesse de rotation d'une turbine :



- Les débitmètres à ultrasons :

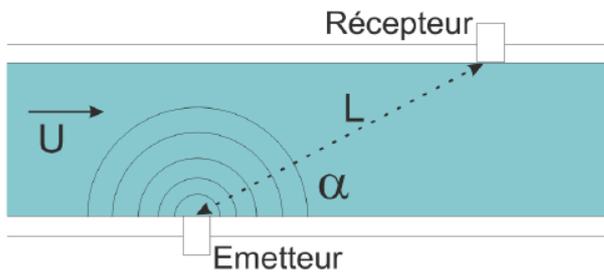
Principe : Ces appareils mesurent le temps de propagation d'une onde ultrasonore dans le fluide entre émetteur et récepteur (éléments piézoélectriques).

Ils s'utilisent sur des fluides sans particule (pour éviter la dispersion des ondes).

Ils sont généralement utilisés pour des diamètres importants de conduites (jusque 6m)

Les gammes de débits vont de 0,1 à 105 m³/h avec une précision de 1% environ.

Leur intérêt d'utilisation réside dans le caractère non intrusif de la méthode de mesure (pas de pertes de charges, insensible à l'agressivité du fluide, remplacement facile) :



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

C : vitesse du son dans le fluide

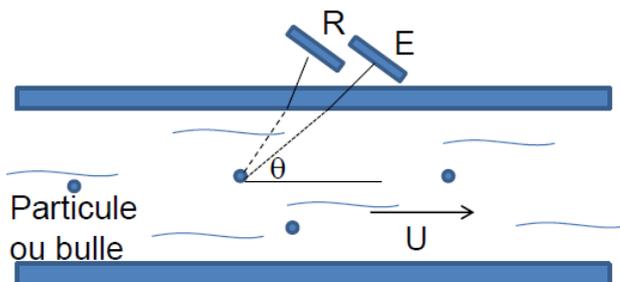
- Les débitmètres à effet « DOPPLER » :

Principe : la modification de la fréquence d'une onde en fonction de sa vitesse de déplacement permet de mettre en évidence le glissement de fréquence entre l'émetteur et le récepteur.

Ce glissement permet de remonter au débit.

Ce principe est utilisé pour des fluides avec une présence de gaz (bulles) ou de solides en suspension pour véhiculer l'onde de l'émetteur au récepteur.

Ces appareils sont utilisés pour les diamètres de conduite importantes (plusieurs mètres).



Emission d'un onde de fréq F_s

$$\frac{\Delta F}{F_s} = \frac{2U \cos \theta}{c}$$