

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique
d'Oran Maurice Audin



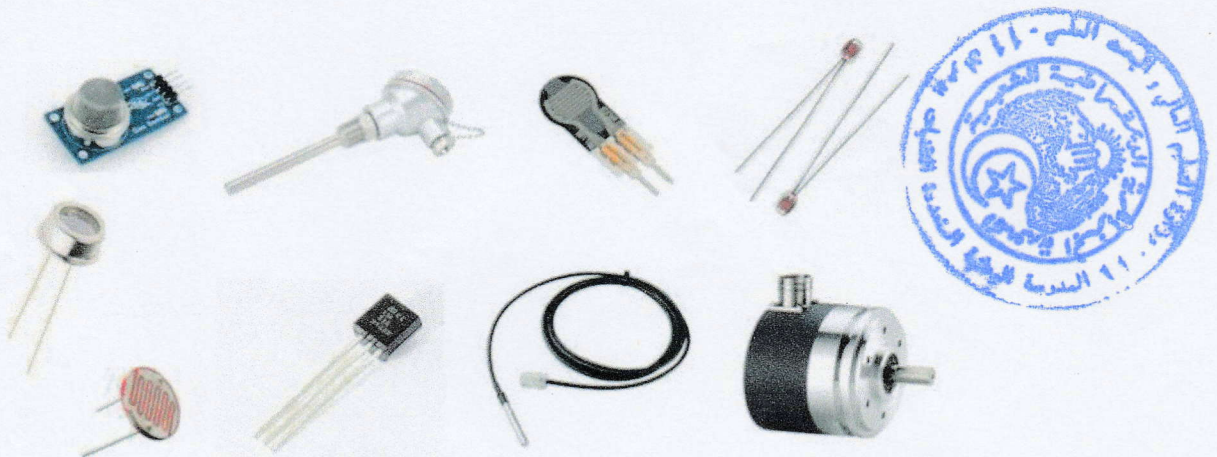
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
بهران موريس أودان

Département de Génie des Procédés et Matériaux

Polycopié pédagogique

Instrumentation Electronique

Etablie par : Dr Rahmouna EL BOUSLEMTI



2025 - 2026

Objectifs de l'enseignement

L'objectif de cet enseignement est de maîtriser les principes fondamentaux du fonctionnement des capteurs, ainsi que les caractéristiques métrologiques à considérer lors de leur utilisation et de leur choix. Il aborde également les différents éléments constitutifs d'une chaîne de mesure.

Ce programme complète le cours de Techniques de mesure du premier semestre.

Connaissances préalables recommandées

Il est recommandé de maîtriser les techniques de mesure de base, ainsi que les bases de l'électronique analogique et numérique.

Préambule

Ce polycopié de cours intitulé « Instrumentation Électronique » est destiné aux étudiants de 2e année en Génie des Procédés et Matériaux, spécialité APCM, ainsi qu'aux étudiants de la formation LMD en ST, licence électronique, télécommunication et électrotechnique, dans le cadre du programme officiel.

L'instrumentation électronique est un cours fondamental pour tous les étudiants en génie électrique. Il est conçu pour faciliter la compréhension des concepts scientifiques tout en respectant la rigueur nécessaire.

Le cours est structuré selon le CANEVAS (programme officiel du LMD, voir l'annexe A) et se divise en sept grands chapitres. En premier lieu, il aborde les notions de base et les principes fondamentaux de l'instrumentation électronique. Ensuite, il met particulièrement l'accent sur les capteurs et leur rôle essentiel dans les systèmes de mesure. Le cours couvre les concepts clés liés aux capteurs, notamment leur fonctionnement, leurs caractéristiques métrologiques, ainsi que leur intégration dans une chaîne de mesure complète, incluant le conditionneur approprié. Il présente également de manière structurée la chaîne d'acquisition des données, depuis la détection des grandeurs physiques jusqu'au traitement et à l'exploitation du signal mesuré.

Les notions abordées incluent :

- Les capteurs : principes de fonctionnement, classifications (actifs, passifs), critères de choix.
- Les phénomènes physiques exploités : effet Hall, effet thermoélectrique, induction électromagnétique, effet piézoélectrique, etc.
- Les caractéristiques métrologiques : sensibilité, linéarité, résolution, rapidité, étalonnage, etc.
- Le conditionnement du signal : circuits de mise en forme, amplification, filtrage et conversion du signal mesuré.
- Les différents types de capteurs.

Ce support est conforme aux directives du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique (CPND) en Algérie et est conçu pour être progressif, adapté au niveau universitaire. Il vise à faciliter l'apprentissage des étudiants en leur offrant une base théorique solide ainsi que des applications pratiques dans le domaine de l'instrumentation électronique.

J'espère que ce modeste travail puisse aider les étudiants à acquérir des outils précieux pour comprendre et assimiler le principe des capteurs et de l'instrumentation électronique, et qu'il serve également à toute personne intéressée par ce domaine. Je souhaite que chaque étudiant puisse y trouver les clés de sa réussite.

Table des matières

Table des matières	4
Introduction générale	10
Chapitre 1 : Généralités	11
1.1 Terminologie	11
1.2 Définitions et caractéristiques générales	12
1.2.1 Définition	12
1.2.2 Constitution du capteur	14
1.2.3 Grandeurs d'influence	15
1.2.4 Chaîne de mesure	15
1.3 Caractéristiques métrologiques	15
1.3.1 Etendue de mesure	15
1.3.2 Mobilité	16
1.3.3 Les erreurs	16
1.4 Limites d'utilisation	16
1.5 Caractéristiques Fonctionnelles des Capteurs	17
1.5.1 Caractéristique d'entrée-sortie d'un capteur	17
1.5.2 Sensibilité	18
1.5.3 Résolution	18
1.5.4 Finesse	18
1.5.5 Linéarité	18
1.6 Caractéristiques statistiques d'un capteur	19
1.6.1 Fidélité	19
1.6.2 Justesse	19
1.6.3 Précision	19
1.6.4 Hystérésis	20
1.6.5 Rapidité	20
1.6.6 Temps de réponse	21
1.6.7 Fiabilité	21
1.7 Choix d'un capteur	21
1.8 Différents Types de capteurs	21
1.8.1 Les capteurs passifs	22
1.8.2 Les capteurs actifs	23
1.9 Capteurs composites	26

1.10 Capteur intégré.....	26
1.11 Capteur intelligent.....	27
1.12 Quelques capteurs	29
1.13 Conversion analogique/numérique	29
1.14 Conditionneurs de capteurs.....	31
1.14.1 Conditionneurs de capteurs passifs	31
A. Montage potentiométrique	31
B. Pont de Wheatstone	32
C. Montage 1/4 de pont avec 3 résistances fixes et un capteur	33
1.14.2 Amplificateurs	34
A. Amplificateur d'instrumentation	34
B. Linéarisation et amplification	35
1.15 Conclusion.....	36
1.16 Exercices corrigés	36
Chapitre 2 : Les capteurs de température	38
2.1 Généralités	38
2.2 Introduction	38
2.3 Thermocouples	39
2.3.1 Principe	39
2.3.2 Effet Peltier	39
2.3.3 L'effet Thomson	40
2.3.4 L'effet Seebeck	40
2.3.5 Principes pratiques d'utilisation des thermocouples	41
A. Thermomètre à thermocouple	41
B. Types de thermocouples	41
2.3.6 Résistance métallique.....	42
2.3.7 Pt 1000.....	44
2.4 Thermomètre à résistance de platine.....	44
2.4.1 Résistance à semi-conducteur	45
A. Thermorésistantes.....	45
B. Thermistances.....	45
C. Capteurs de température au silicium	45
2.4.2 Classification.....	45
A. Coefficient de Température Négatif (CTN)	46
B. Coefficient de Température Positif (CTP).....	46

2.5 Conclusion.....	47
2.6 Exercices corrigés.....	47
Chapitre 3 : Capteur de déplacement, proximité, et de position	49
3.1 Introduction	49
3.2 Capteurs de déplacement.....	49
3.2.1 Capteur de déplacement résistif	50
A. principe.....	50
B. Caractéristiques principales.....	51
C. Utilisations.....	51
3.2.2 Capteurs de déplacement inductifs.....	52
A. Le capteur à LVDT.....	52
B. Avantages du capteur LVDT.....	53
3.3 Capteur de proximité.....	53
3.3.1 Capteur de proximité inductif.....	53
3.3.2 Capteur de proximité capacitif	54
A. Principe de fonctionnement.....	54
B. Avantages	55
3.3.3 Capteur de proximité photoélectrique	55
A. Système barrage	56
B. Système reflex	56
C. Système de proximité	57
3.3.4 Capteur de proximité ultrasonique	58
3.4 Capteur de position	58
3.5 Les codeurs.....	59
3.5.1 Généralités	59
3.5.2 Codeur incrémental	60
A. Codeur à une piste	60
B. Codeur à deux pistes.....	61
3.5.3 Codeur absolu.....	62
3.5.4 Comparaison des deux concepts	64
3.6 Conclusion.....	64
3.7 Exercices corrigés.....	65
Chapitre 4 : Capteur de vitesse et d'accélération.....	67
4.1 Introduction	67
4.2 Capteurs de vitesse	67

4.2.1	Mesure de la vitesse.....	67
4.2.2	Tachymètres linéaires à fil.....	67
4.2.3	Tachymètre à impulsions.....	68
4.2.4	Génératrices tachymétriques à courant continu	70
4.2.5	Génératrice tachymétrique à courant alternatif	71
4.3	Capteurs d'accélération	72
4.3.1	La mesure d'accélération	72
4.3.2	Accéléromètres piézoélectriques	73
4.3.3	Accéléromètres piézorésistifs	74
4.3.4	Accéléromètres asservis	75
4.4	Conclusion.....	76
4.5	Exercices corrigés	76
Chapitre 5 : Capteurs de force et de pression.....		78
5.1	Introduction	78
5.2	capteurs de déformation	78
5.3	Capteurs de force.....	79
5.3.1	Capteur de force à jauge de contrainte	80
5.4	Capteurs de pression	82
5.4.1	Définition de la pression	82
5.4.2	Principes de fonctionnement	82
5.4.3	Types de capteurs de pression.....	83
A.	Le capteur de pression absolue.....	83
B.	Le capteur de pression relative	84
C.	Le capteur de pression différentielle	85
5.5	Conclusion.....	85
5.6	Exercices corrigés	85
Chapitre 6 : Capteur de débit, niveau de liquide et d'humidité.....		87
6.1	Capteur de débit	87
6.1.1	Définition de débit.....	87
A.	Débit Massique.....	88
B.	Débit volumique	88
C.	Régimes d'écoulement des fluides	88
6.1.2	Capteurs de débit volumique	89
A.	Débitmètre à tube de Pitot	89
B.	Rotamètre	90

6.1.3 Débitmètre à coupelle, à hélice ou à turbine.....	91
6.1.4 Débitmètre à palette.....	91
6.1.5 Débitmètre ionique.....	92
6.1.6 Débitmètres ultrasoniques.....	92
6.1.7 Capteurs de débit massique.....	93
A. Capteur électromagnétique.....	93
B. Capteur thermique	94
C. Débitmètre à effet Coriolis	94
6.2 Capteur de niveau de liquide.....	95
6.2.1 Introduction.....	95
6.2.2 Capteurs hydrostatiques.....	95
A. Rappel de physique	95
B. Principe.....	95
C. Flotteur	96
D. Plongeur	96
6.2.3 Mesure de niveau par capteur de pression	97
6.2.4 Mesure de niveau par bullage	97
6.3 Capteur de pression différentielle.....	98
6.3.1 Par mesure de masse volumique.....	98
6.4 Capteurs électriques.....	99
6.4.1 Capteurs conductimétriques	99
6.4.2 Domaine d'utilisation.....	100
6.4.3 Capteurs capacitifs.....	100
6.4.4 Capteurs acoustiques	100
6.4.5 Radar.....	101
6.4.6 Capteurs de niveau par Gammamétrie.....	101
6.5 Comparaison des différentes méthodes de mesure de niveau	102
6.6 Les type des capteurs d'humidités	102
6.6.1 Capteur d'humidité résistive.....	102
6.6.2 Capteur d'humidité à condensateur.....	103
6.6.3 Capteur d'humidité hygrométrie.....	103
6.7 Conclusion.....	104
6.8 Exercices corrigés.....	104
Chapitre 7 : Capteurs Optiques	105
7.1 Introduction	105

7.2 Définitions et principes	105
7.2.1 Définitions	105
A. Le photon.....	105
B. La longueur d'onde.....	105
C. L'effet photoélectrique	105
7.3 Capteurs passifs.....	106
7.3.1 Photorésistances	106
7.3.2 Capteurs à fibre optique.....	107
7.3.2 Bolomètre (capteur IR thermique)	108
7.4 Capteurs actifs.....	109
7.4.1 Les photodiodes	109
A. Principe.....	109
B. Applications.....	110
7.4.2 Phototransistor	110
A. Principe.....	110
B. Application	110
7.4.3 Les capteurs CCD	110
7.5 Conclusion.....	112
7.6 Exercices corrigés	112
Synthèse générale des capteurs passifs et actifs étudiés dans ce polycopié	115
Conclusion générale	117
Bibliographie.....	118
Annexes	120
Annexes A : Canevas	120
Annexe B : Erreurs de Mesure	121
Annexe C : Unités de températures	123
Annexe D : Les unités de pression.....	124

Introduction générale

L'instrumentation électronique est une discipline essentielle qui permet la mesure, le contrôle et la régulation de différents paramètres dans les systèmes électroniques et industriels. Le terme 'instrumentation' provient du latin *instrumentum*, signifiant « **outil** » ou 'équipement', dérivé du verbe *instruire*, qui signifie 'construire' ou 'préparer'. À l'origine, ce terme désignait l'ensemble des outils utilisés pour accomplir une tâche. Au fil du temps, il a évolué pour se spécialiser dans les dispositifs et systèmes employés pour mesurer et contrôler les grandeurs physiques. Cette branche de l'ingénierie couvre une large gamme de technologies et de techniques, avec une attention particulière portée sur les capteurs et leur rôle central dans les systèmes de mesure.

Dans ce contexte, l'instrumentation électronique joue un rôle crucial dans les processus industriels et scientifiques, permettant une surveillance précise et en temps réel des paramètres physiques. Elle repose sur une chaîne de mesure composée de capteurs, de conditionneurs de signaux et de systèmes de traitement de l'information, transformant ainsi des grandeurs physiques en signaux électriques exploitables. Les capteurs sont au cœur de cette chaîne, assurant la conversion des phénomènes physiques en informations utilisables.

De plus, la mesure, notamment à travers l'automatisme, est désormais omniprésente dans la conception et la fabrication de biens de consommation, l'électroménager, l'automobile, l'aviation, et bien d'autres secteurs. Elle est devenue un facteur indispensable de l'économie moderne. Rien ne se fait désormais sans le "capteur", véritable pilier de l'édifice de la "mesure".

Ce polycopié a pour objectif de fournir une compréhension approfondie des capteurs, de leurs principes de fonctionnement, ainsi que des caractéristiques métrologiques essentielles telles que la sensibilité, la linéarité, la résolution et la rapidité. Il s'inspire largement des concepts clés dans le domaine de l'instrumentation électronique, avec une présentation détaillée des types de capteurs et des phénomènes physiques associés.

Chapitre 1 : Généralités

1.1 Terminologie

Le vocabulaire international des termes généraux et fondamentaux de métrologie (VIM), norme ISO définit les termes qui suivent de la façon :

Grandeur : l'attribut d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, qui est susceptible d'être distingué qualitativement et déterminé quantitativement.

Mesure : c'est l'évaluation d'une grandeur par comparaison avec une autre grandeur de même nature prise pour unité. Exemple : 2 mètres, 3 grammes, 6 secondes, ...

Mesurage : un ensemble d'opérations ayant pour but de déterminer la valeur d'une grandeur.

Métrologie : C'est la science des mesures : c'est le domaine des connaissances relatives aux mesurages.

Instrumentation : ce terme désigne l'ensemble des systèmes permettant soit l'acquisition des mesures sur un objet d'investigation, soit le contrôle par rétroaction d'un procédé. En ce sens, les instruments ou systèmes de mesure constituent les « outils » de la mesure et de la métrologie.

Transducteur est un dispositif (souvent un simple matériau) réalisant intrinsèquement la conversion de la grandeur physique à mesurer en une grandeur de nature différente, le plus souvent électrique.

Incertitude : le résultat de la mesure x d'une grandeur X ne peut pas être entièrement défini par un seul nombre. Il faut le caractériser par un couple (x, dx) où dx représente l'incertitude sur x due aux différentes erreurs liées au mesurage : $x - dx < X < x + dx$.

Erreur systématique : C'est toute erreur due à une cause connue ou connaissable. Elles ont pour causes : L'opérateur, L'appareil de mesure....

Erreur aléatoire : C'est toute erreur qui n'obéit à aucune loi connue lorsqu'elle est prise sur un seul résultat. Elle obéit aux lois de la statistique lorsque le nombre de résultats devient très grand. Elles peuvent provenir de : L'opérateur, L'appareil de mesure....

Erreur absolue : est le résultat de la valeur absolue de la différence entre d'une part la valeur réelle de la grandeur que l'on mesure et d'autre part une valeur de référence que nous avons choisie comme une bonne approximation de celle-ci

$$e = \text{valeur approchée} - \text{valeur réelle}$$

Si on note x la valeur réelle, a la valeur de référence, et e l'erreur absolue, on peut écrire :

$$e = |\alpha - x| = |x - \alpha|$$

Erreur relative : C'est le rapport de l'erreur absolue au résultat du mesurage. Elle s'exprime en pourcentage de la grandeur mesurée.

1.2 Définitions et caractéristiques générales

1.2.1 Définition

La grandeur physique objet de la mesure : déplacement, température, pression, etc, est désignée comme le **mesurande** et représentée par m ; l'ensemble des opérations expérimentales qui concourent à la connaissance de la valeur numérique du mesurande constitue son **mesurage**. Lorsque le mesurage utilise des moyens électroniques de traitement du signal, il est nécessaire de produire à partir du mesurande une grandeur électrique qui en soit une représentation aussi exacte que possible : ceci signifie que la grandeur électrique et ses variations apportent toute l'information nécessaire à la connaissance du mesurande [1,2].

Le **capteur** est le dispositif qui soumis à l'action d'un mesurande non électrique présente en sortie une caractéristique de nature électrique (charge, tension, courant ou impédance (R, L, C)) désignée par s et qui est fonction du mesurande :

$$s = F(m)$$

s est la **grandeur de sortie** ou réponse du capteur, m est la **grandeur d'entrée** ou **excitation**. La mesure de s doit permettre de connaître la valeur de m (figure 1.2).

En toute rigueur, le capteur désigne l'enveloppe mécanique qui protège le transducteur proprement dit et assure parfois également une part du conditionnement. En pratique, on fait souvent l'amalgame entre les deux notions.

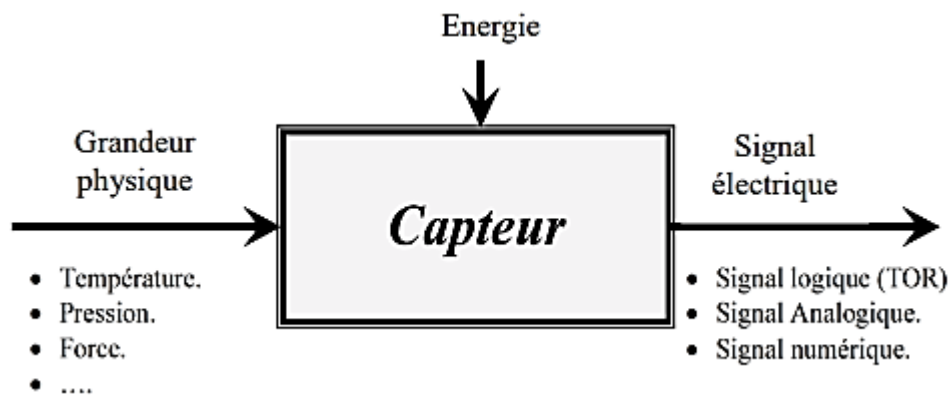


Fig. 1. 1 : Grandeur physique et signal électrique d'un capteur.

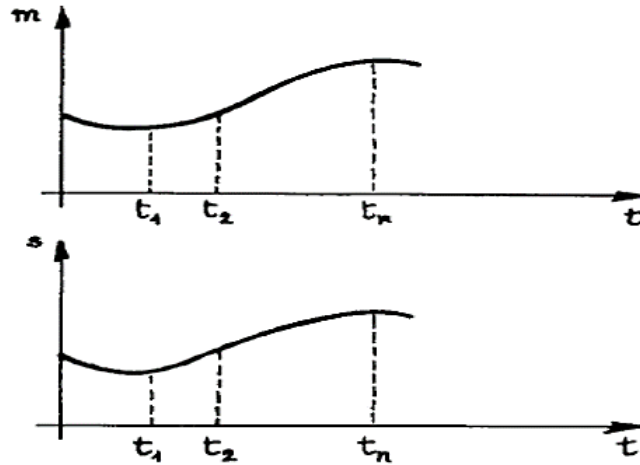
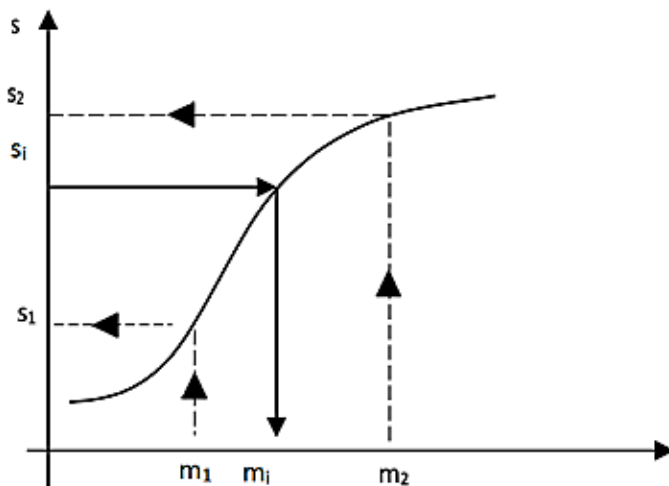


Fig. 1. 2 : Exemple d'évolution d'un mesurande m et de la réponses correspondante du capteur.

La relation $s = F(m)$ résulte dans sa forme théorique des lois physiques qui régissent le fonctionnement du capteur et dans son expression numérique de sa construction (géométrie, dimensions), des matériaux qui le constituent et éventuellement de son environnement et de son mode d'emploi (température, alimentation). Pour tout capteur la relation $s = F(m)$ sous sa forme numériquement exploitable est explicitée par étalonnage : pour un ensemble de valeurs de m connues avec précision, on mesure les valeurs correspondantes de s ce qui permet de tracer la courbe d'étalonnage.

L'utilisation du capteur consiste à lire la valeur du signal électrique s lorsqu'un mesurande m inconnu est appliqué. La courbe d'étalonnage permet alors d'en déduire m .

- Toute valeur de s doit permettre de remonter à chaque instant a une seule valeur de m et inversement



- 1- son établissement : des valeurs connues du mesurande $m \rightarrow s$;
- 2- son exploitation $s_i \rightarrow m_i$.

Fig. 1. 3 : Courbe d'étalonnage d'un capteur :

Nature du signal de sortie

Analogique :

- généralement électrique sous forme de tension ou de courant
- La grandeur du signal peut prendre une infinité de valeurs dans un intervalle donné.

L'information peut alors être :

Continue - on mesure le niveau (tension ou intensité)

Temporelle - on mesure la période ou la fréquence

Numérique : - l'information est binaire.

L'information peut alors être :

Tout ou rien - exemple de l'état d'une vanne ouverte ou fermée

Train d'impulsions - on compte le nombre de train d'impulsions

Numérique - il s'agit alors d'une grandeur analogique numérisée.

1.2.2 Constitution du capteur

Un capteur est constitué des parties suivantes (Fig. 1.4) :

- ✓ **Corps d'épreuve** : élément mécanique qui réagit sélectivement à la grandeur à mesurer, dont le but est de transformer la grandeur à mesurer en une autre grandeur physique dite mesurable.
- ✓ **Transducteur** : élément sensible lié au corps d'épreuve. Il traduit les réactions du corps d'épreuve en une grandeur électrique constituant le signal électrique de sortie.
- ✓ **Conditionneur de signaux** : Un circuit électronique dont le rôle principal est l'alimentation électrique du capteur, la mise en forme et l'amplification du signal délivré par le capteur si nécessaire.
- ✓ **Transmetteur** : Élément secondaire (**Module électronique**) qui transmet un signal normalisé après conditionnement et amplification. il a, selon les cas, les fonctions suivantes :
 - Alimentation électrique du capteur (si nécessaire)
 - Mise en forme et amplification du signal de sortie
 - Filtrage,
 - Conversion du signal (CAN,...)
- ✓ **Boîtier** : élément mécanique de protection, de maintien et de fixation du capteur.

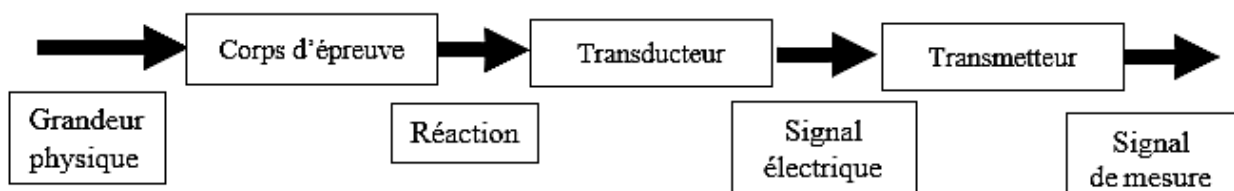


Fig. 1.4 : Constitution d'un capteur.

1.2.3 Grandeurs d'influence

Les grandeurs d'influence sont des grandeurs étrangères qui, selon leur nature et leur importance, peuvent provoquer des perturbations sur les capteurs. C'est donc une cause d'erreurs agissant sur le signal de sortie [1,2,3].

Exemple :

- La température
- La pression environnante
- Les vibrations mécaniques ou acoustiques
- La position du capteur et sa fixation
- L'humidité, la projection d'eau, l'immersion
- Les ambiances corrosives
- Les perturbations électromagnétiques
- Les rayonnements nucléaires
- Les accélérations et la pesanteur
- L'alimentation électrique du capteur.

Nécessité de :

- Réduire les grandeurs d'influence (tables anti-vibration, blindages magnétiques...)
- Stabiliser les grandeurs d'influence à des valeurs parfaitement connues
- Compenser l'influence des grandeurs parasites par des montages adaptés (pont de Wheatstone)

1.2.4 Chaîne de mesure

C'est l'ensemble des traitements du signal issu du capteur qui va permettre l'interprétation, adaptation, conversion, linéarisation, amplification et l'affichage correct du signal avant sa lecture sur le support de sortie.

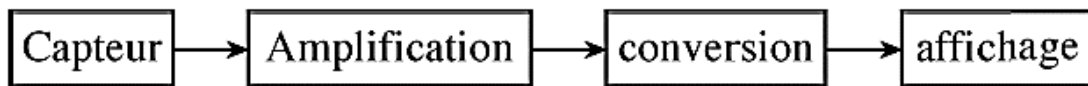


Fig. 1.5 : Chaîne de mesure simple.

On parle aussi de conditionnement du signal.

1.3 Caractéristiques métrologiques

1.3.1 Etendue de mesure

La différence algébrique entre les valeurs extrêmes pouvant être prise par la grandeur à mesurer, pour laquelle les indications d'un capteur, obtenues à l'intérieur du domaine nominal d'emploi en une seule mesure, ne doivent pas être entachées d'une erreur supérieure à l'erreur maximale tolérée.

A. Portée : valeurs de la grandeur à mesurer correspondant aux limites minimales et maximales de l'étendu de mesure.

B. Zéro : c'est la valeur prise comme origine de l'information délivrée par le capteur.

- soit la valeur de l'information de sortie pour une valeur nulle du paramètre d'entrée.

- soit la valeur de l'information de sortie qui correspond à la portée minimale.

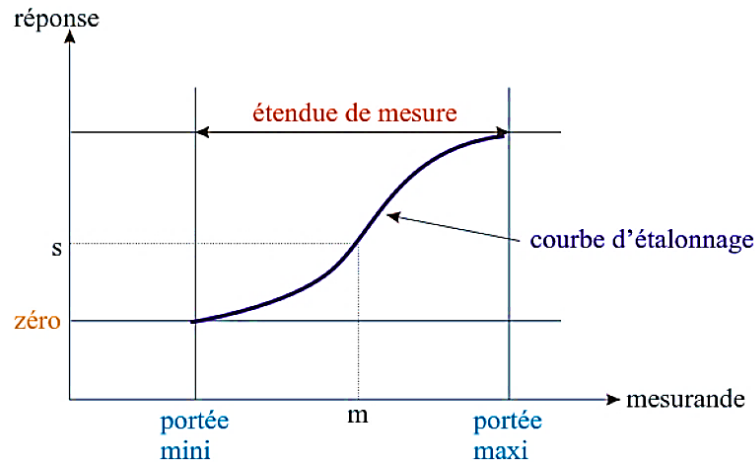


Fig. 1.6 : Étendue de mesure et courbe d'étalonnage.

1.3.2 Mobilité

La qualité qui caractérise l'aptitude d'un capteur à réagir aux petites variations de la grandeur mesurée.

1.3.3 Les erreurs

Le capteur et toute la chaîne de traitement de la mesure introduisent des erreurs (voir annexe) : bruit, décalage, référence, linéarité...

L'erreur globale de mesure ne peut être qu'estimée. Une conception rigoureuse de la chaîne de mesure permet de réduire les erreurs et donc l'incertitude sur le résultat.

On parle de : fidélité, justesse, précision, incertitude, linéarité.

Étalonnage

L'étalonnage permet d'ajuster et de déterminer, sous forme graphique ou algébrique, la relation entre le mesurande et la grandeur électrique de sortie. Très souvent l'étalonnage n'est valable que pour une seule situation d'utilisation du capteur.

1.4 Limites d'utilisation

Les contraintes mécaniques, thermiques ou électriques auxquelles un capteur est soumis entraînent, lorsque leurs niveaux dépassent des seuils définis, une modification des caractéristiques du capteur. Au-dessus d'un certain seuil, l'étalonnage n'est plus valable. Au-dessus d'un autre plus grand le capteur risque d'être détruit. On peut définir quatre domaines d'utilisation :

Domaine nominale d'emploi (domaine normal): Zone dans laquelle la mesurande peut évoluer sans modification des caractéristiques du capteur.

Domaine de non-détérioration : Valeurs limites des grandeurs influençant le capteur (mesurande, température environnante, etc....) sans que les caractéristiques du capteur ne soient modifiées après annulation de surcharges éventuelles.

Domaine de détérioration ou de non-destruction : Elle définit les limites garantissant la non-destruction du capteur mais dans laquelle il peut y avoir des modifications permanentes des caractéristiques du capteur.

Domaine de destruction : où le capteur est hors d'usage.

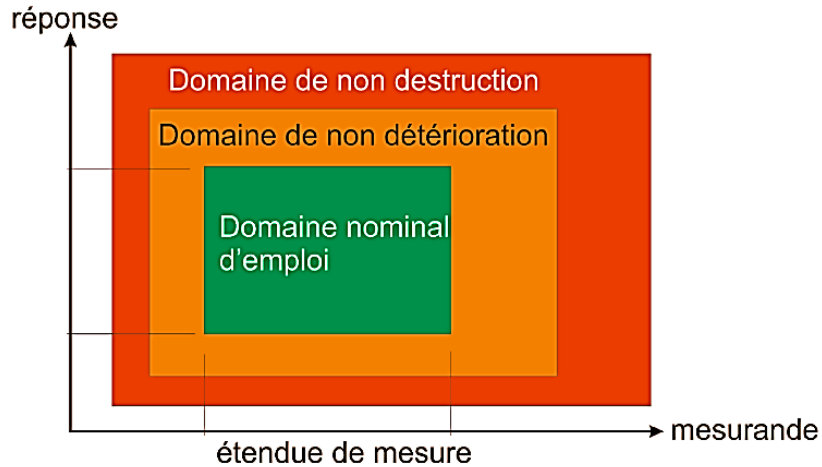


Fig.1.7 : Domaines d'utilisation.

1.5 Caractéristiques Fonctionnelles des Capteurs

1.5.1 Caractéristique d'entrée-sortie d'un capteur

Elle donne la relation d'évolution de la grandeur de sortie en fonction de la grandeur d'entrée. Elle est donnée classiquement par une courbe en régime permanent. Elle ne donne pas d'informations sur les caractéristiques transitoires du capteur.

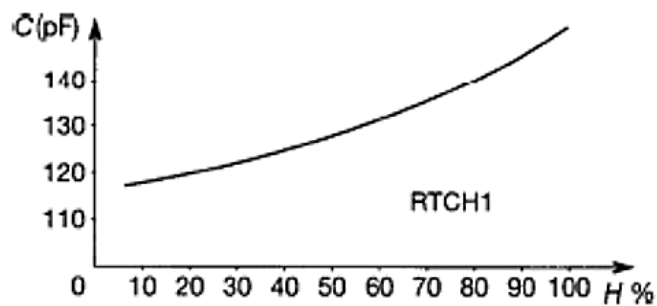


Fig. 1.8 : Exemple de caractéristique d'un capteur d'humidité du type capacitif.

1.5.2 Sensibilité

Plus un capteur est sensible plus la mesure pourra être précise. C'est une caractéristique importante pour l'exploitation et l'interprétation des mesures.

Elle détermine l'évolution de la grandeur de sortie en fonction de la grandeur d'entrée en un point donné. C'est la pente de la tangente à la courbe issue de la caractéristique du capteur. Dans le cas d'un capteur linéaire, la sensibilité du capteur est constante :

$$\text{Sensibilité} = \frac{\Delta(\text{grandeur de sortie})}{\Delta(\text{mesurande})}$$

Il faut noter que la sensibilité d'un capteur peut être fonction du conditionneur auquel il est associé. Dans l'exemple de la figure 1.8, la sensibilité moyenne du capteur est de 0.4 pF / %H.

1.5.3 Résolution

La résolution est la plus petite variation du mesurande qui provoque une variation détectable et répétable du signal de sortie.

1.5.4 Finesse

C'est la qualité d'un capteur à ne pas perturber par sa présence la grandeur à mesurer. Cela permet d'évaluer l'influence du capteur sur la mesure. On la définit non seulement vis à vis du capteur mais aussi vis à vis de l'environnement d'utilisation du capteur. La finesse est d'autant plus grande que l'influence du capteur est faible. Par exemple, dans le cas d'une mesure thermique, on cherchera un capteur à faible capacité calorifique vis à vis des grandeurs l'environnant. Finesse et sensibilité sont en général antagonistes. Il peut y avoir un compromis à faire. Pour un capteur d'induction B, un capteur à forte perméabilité sera très sensible, par contre sa présence aura tendance à perturber les lignes de champ et la mesure de l'induction ne sera pas celle sans capteur, d'où une mauvaise finesse. Mais cette erreur peut être évaluée en vue d'une correction post-mesure et ainsi faire abstraction de la présence du capteur.

1.5.5 Linéarité

C'est la zone dans laquelle la sensibilité du capteur est indépendante de la valeur de la mesurande. Cette zone peut être définie à partir de la définition d'une droite obtenue comme approchant au mieux la caractéristique réelle du capteur, par exemple par la méthode des moindres carrés. On définit à partir de cette droite l'écart de linéarité qui exprime en % l'écart maximal entre la courbe réelle et la droite approchant la courbe.

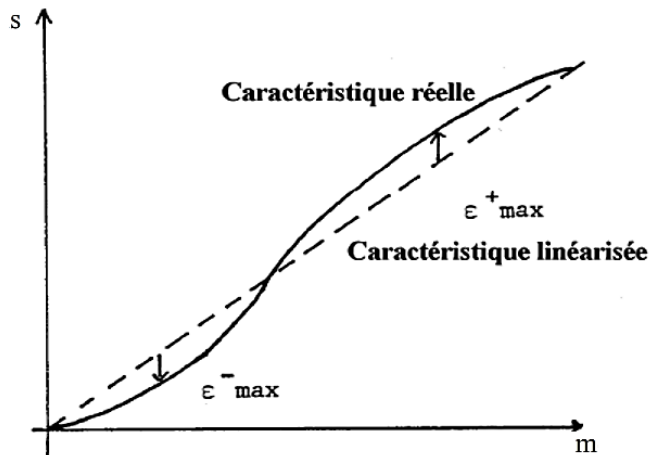


Fig. 1.9 : Exemple de linéarisation de caractéristiques.

1.6 Caractéristiques statistiques d'un capteur

Ces paramètres permettent de prendre en compte la notion d'erreurs accidentelles qui peuvent survenir sur un capteur.

Rappel : soit n mesures effectuées sur un mesurande, on définit à partir de ces n mesures :

1. La valeur moyenne :

$$\langle m \rangle = \frac{\sum_i m_i}{n}$$

2. L'écart type (dispersion des résultats autour de la valeur moyenne) :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i (m_i - \langle m \rangle)^2}{n}}$$

1.6.1 Fidélité

Elle définit la qualité d'un capteur à délivrer une mesure répétitive sans erreurs. L'erreur de fidélité correspond à l'écart type obtenu sur une série de mesures correspondant à une mesurande constante.

1.6.2 Justesse

C'est l'aptitude d'un capteur à délivrer une réponse proche de la valeur vraie et ceci indépendamment de la notion de fidélité. Elle est liée à la valeur moyenne obtenue sur un grand nombre de mesures par rapport à la valeur réelle.

1.6.3 Précision

Qualité qui caractérise l'aptitude d'un capteur à donner une valeur exacte de la grandeur mesurée

Elle définit l'écart en % que l'on peut obtenir entre la valeur réelle et la valeur obtenue en sortie du capteur. Ainsi un capteur précis aura à la fois une bonne fidélité et une bonne justesse.

Fidélité + Justesse \Leftrightarrow Précision

$$\text{précision (par rapport à la valeur vraie)} = \frac{\text{valeur mesurée} - \text{valeur vraie}}{\text{valeur vraie}} \times 100$$

$$\text{précision (par rapport à la pleine échelle)} = \frac{\text{valeur mesurée} - \text{valeur vraie}}{\text{pleine échelle}} \times 100$$

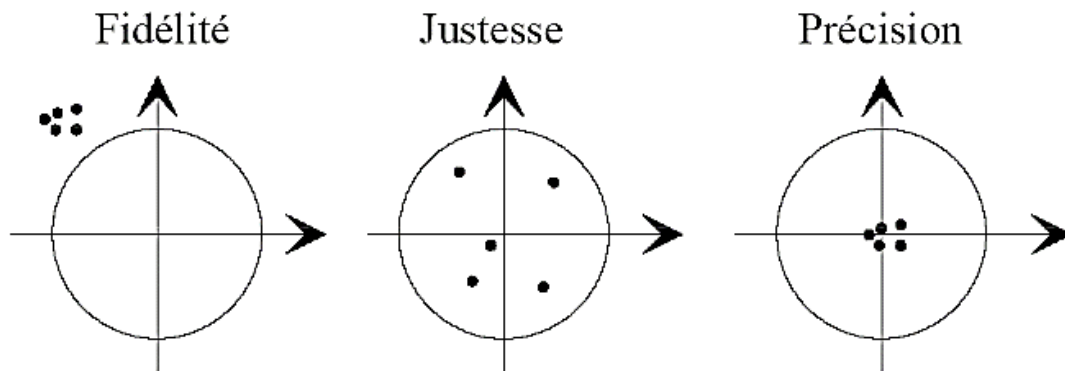
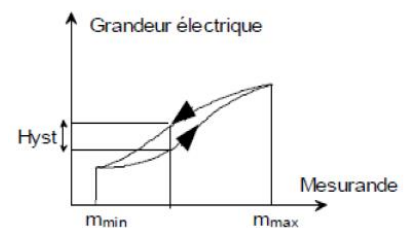


Fig. 1.10 : Caractéristiques statistiques d'un capteur.

1.6.4 Hystérésis

L'hystérésis désigne la différence entre les valeurs de sortie obtenues pour une même valeur du mesurande selon que celle-ci est atteinte en croissance ou en décroissance.



L'hystérésis d'un capteur

1.6.5 Rapidité

C'est la qualité d'un capteur à suivre les variations du mesurande. On peut la chiffrer de plusieurs manières :

- Bande passante du capteur. (à -3 dB par exemple).
- Fréquence de résonance du capteur.
- Temps de réponse (à x %) à un échelon du mesurande.

1.6.6 Temps de réponse

C'est l'aptitude d'un capteur à répondre aux variations du mesurande avec le temps. Si on prend, par exemple, notre thermomètre affichant 20°C et on le place dans un four à 100°C, il prendra un certain temps τ pour afficher 100°C : τ est appelé temps de réponse.

1.6.7 Fiabilité

La fiabilité est un terme moderne qui définit bien ce qu'on entend en ce sens qu'un appareil fiable sera un appareil qui ne tombera jamais en « panne » alors qu'un appareil peu fiable est toujours sujet à des révisions ou à des réparations et par conséquent perd beaucoup de son intérêt.

1.7 Choix d'un capteur

Nous pouvons maintenant définir un capteur idéal. Ce capteur :

1. est sensible, c'est à dire qu'il donne un signal important sous basse impédance en fonction d'une grandeur physique : pression, température, etc.
2. est précis, fidèle et n'a pas d'hystérésis. En d'autres termes il indique exactement la valeur de la grandeur physique et cette indication ne dépend que d'elle seule.
3. est linéaire, ce qui facilite l'utilisation du signal et rapide, ce qui aide l'emploi dans les asservissements.
4. est fiable et possède un large domaine de non détérioration. On peut donc faire confiance à un tel appareil.
5. est peu encombrant et bon marché.

Il est bien évident qu'un tel capteur est malheureusement mythique. Aussi, pratiquement, on fera passer en fonction des circonstances telle ou telle « qualité » en premier, par exemple, la fiabilité, dans l'industrie sera, à juste titre considéré comme plus importante que la linéarité.

Pour choisir un capteur :

- Nature du mesurande, capteur basé sur quel principe physique ?
- Performances (mobilité, précision, plage de mesure) ?
- Performances (résolution, précision, plage de mesure, ...) ?
- Caractéristiques d'environnement, grandeurs d'influence ?
- Encombrement ?
- Prix ?
- Fiabilité ?

1.8 Différents Types de capteurs

Les capteurs peuvent être classés selon les principes physiques utilisés. De manière générale, on distingue deux classes de capteurs ; capteurs actifs et capteur passifs. Les capteurs actifs sont basés sur des effets physiques permettant de traduire directement le mesurande en

grandeur électrique tandis que les capteurs passifs utilisent des matériaux passifs en tant qu'impédance dont l'un des paramètres est sensible à la grandeur physique.

1.8.1 Les capteurs passifs

La variation de l'impédance de ce type de capteur est due à l'action du mesurande qui peut agir soit sur les paramètres dimensionnels soit sur les propriétés électriques des matériaux utilisés. Dans le premier cas, le capteur se comporte comme un élément mobile ou déformable. C'est le principe de fonctionnement de la plupart des capteurs de position et de déplacement et des capteurs de pression et d'accélération. Dans le deuxième cas, ce sont les propriétés électriques des matériaux (résistivité, perméabilité, . . .) qui sont sensibles aux grandeurs physiques mesurées. L'impédance d'un capteur passif et ses variations ne sont mesurables qu'en intégrant le capteur dans un circuit électrique, par ailleurs alimenté : c'est son conditionneur. Les différents types de conditionneurs, leurs avantages et leurs inconvénients seront abordés plus loin.

Le tableau 1.1 suivant présente un aperçu des principaux mesurandes permettant de modifier les propriétés électriques des matériaux utilisés dans la conception des capteurs passifs.

Mésurande	Caractéristique électrique sensible	Types de matériaux utilisés
Température Très basse température	Résistivité Constante diélectrique	Métaux : platine, nickel, cuivre. Semi-conducteurs, Verres.
Flux lumineux	Résistivité	Semi-conducteurs.
Déformation	Résistivité Perméabilité magnétique	Alliages de nickel, silicium dopé. Alliage ferromagnétique.
Position (aimant)	Résistivité	Matériaux magnétorésistants : bismuth, antimoine d'indium.
Humidité	Résistivité Constante Diélectrique	Chlorure de lithium. Alumine ; polymères.

Tableau 1.1: Matériaux utiliser dans les capteurs passifs.

1.8.2 Les capteurs actifs

Ces capteurs sont basés sur des effets physiques permettant de convertir directement la grandeur physique à mesurer en grandeur électrique (courant, tension ou charge). Le tableau 1.2 ci-dessous regroupe ces effets physiques.

Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux lumineux	Pyroélectricité	Charge
	Photoémission	Courant
	Effet photovoltaïque	Tension
	Effet photoélectromagnétique	Tension
Force Pression Accélération	Piézoélectricité	Charge
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position (aimant)	Effet Hall	Tension

Tableau 1.2: Les capteurs actifs.

Les effets physiques les plus classiques (Tableau 1.2) sont cités dans [1, 2, 3] :

A. Effet thermoélectrique : Un circuit formé de deux conducteurs de nature chimique différente, dont les jonctions sont à des températures T_1 et T_2 , est le siège d'une force électromotrice d'origine thermique $f(T_1, T_2)$.

Application : mesure de T_1 lorsque $T_2 = 0C$.

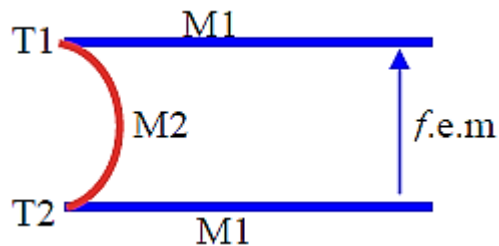


Fig. 1.11 : Effet thermoélectrique – thermocouple.

B. Effet piézo-électrique : L'application d'une contrainte mécanique sur deux faces à certains matériaux dits piézo-électriques (le quartz par exemple) entraîne l'apparition d'une déformation et d'une charge électrique de signes différents sur les faces opposées.

Application : mesure de force ou de grandeur s'y ramenant (pression, accélération) à partir de la tension provoquée par les variations de charge du piézo-électrique aux bornes d'un condensateur associé.

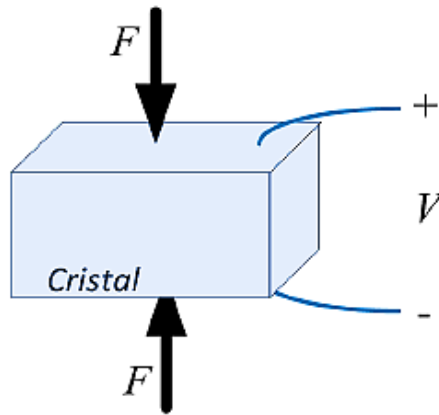


Fig. 1.12 : L'effet piézoélectricité – accéléromètre.

C. Pyro-electricité : certains matériaux ont une polarisation spontanée en l'absence de champ électrique extérieur. Une variation de température induit une variation de cette polarisation et donc l'apparition de charges électriques à la surface du matériau

Application : un flux lumineux absorbé par le cristal élève sa température ce qui entraîne une modification de sa polarisation qui est alors mesurable aux bornes d'un condensateur associé.

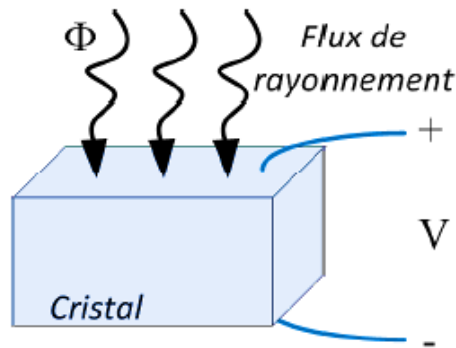


Fig. 1.13: Effet pyroélectrique – Pyromètre.

D. Effet d'induction électromagnétique : un phénomène physique conduisant à l'apparition d'une force électromotrice dans un conducteur électrique soumis à un flux de champ magnétique variable. Cette force électromotrice peut engendrer un courant électrique dans le conducteur.

La variation du flux d'induction magnétique dans un circuit électrique induit une tension électrique sert à la détection de passage d'un objet métallique.

Applications :

- La mesure de la *f.e.m.* d'induction permet de connaître la vitesse de déplacement qui est à son origine.
- Détection de passage d'un objet métallique.

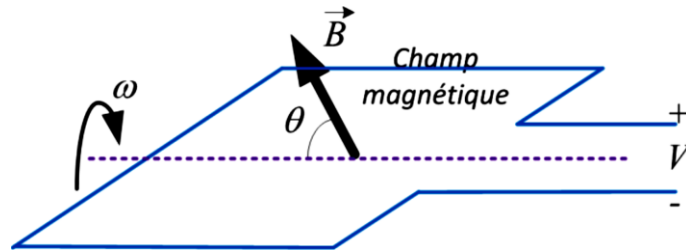


Fig. 1.14: Capteur à effet d'induction magnétique – capteur de vitesse.

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

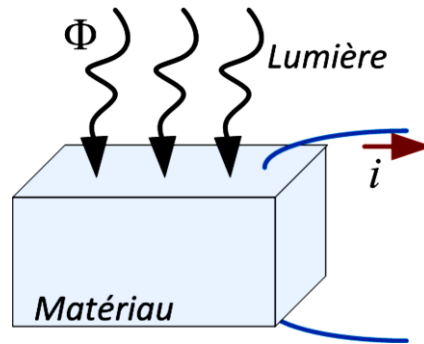


Fig. 1.15: Effet photoélectrique – capteur de lumière.

F. Effet hall : On appelle *effet Hall*, lorsqu'un conducteur est parcouru par un courant électrique et plongé dans une induction magnétique perpendiculaire B à la direction de ce courant, on constate l'apparition d'une différence de potentiel v et d'un champ électrique transversal E .

On peut le schématiser cet effet hall par la figure suivante :

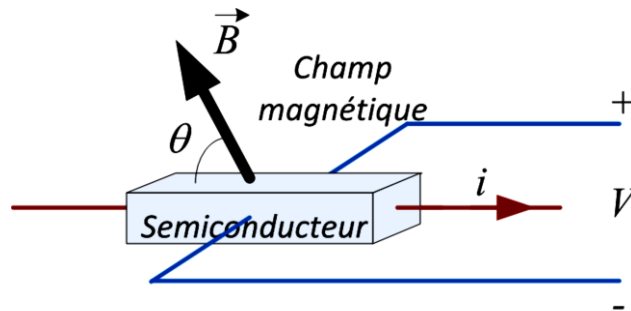


Fig. 1.16: capteur à effet Hall – capteur de distance.

La tension qui règne entre les deux faces A et C et appelée tension de Hall. On peut la mesurer par la relation suivante :

$$V_H = d \cdot E = d v B$$

Avec : d la distance entre A et C.

G. Effet photovoltaïque : Des électrons et des trous sont libérés au voisinage d'une jonction PN illuminée, leur déplacement modifie la tension à ses bornes.

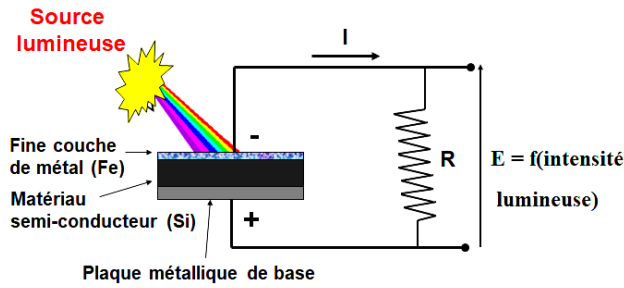


Fig. 1.17 : Effet photovoltaïque.

1.9 Capteurs composites

Pour des raisons de coût ou de facilité d'exploitation, on peut être amené à utiliser un capteur, non pas sensible au mesurande mais à l'un de ses effets. C'est le cas en résistance des matériaux lorsqu'on utilise des jauges extensométriques [4,5].

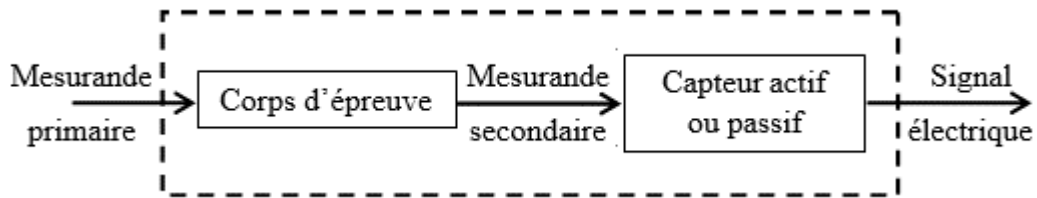


Fig. 1.18 : Capteurs composites

Le **corps d'épreuve** est le dispositif qui, soumis au mesurande en assure une première traduction en une autre grandeur physique non électrique, qu'un capteur adéquat traduit en grandeur électrique.

* L'association corps d'épreuve + capteur actif ou passif est un **capteur composite**.

1.10 Capteur intégré

C'est un composant réalisé par les techniques de la micro-électronique et qui regroupe sur un même substrat de silicium commun, le capteur à proprement dit, le corps d'épreuve et l'électronique de conditionnement.

Ce principe réduit l'encombrement de la chaîne de mesure, facilite la mise en œuvre du capteur et favorise la normalisation des capteurs.

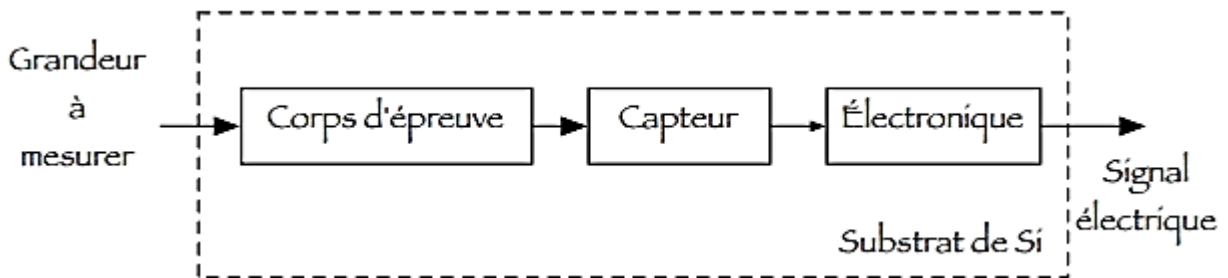


Fig. 1.19 : Capteur intégré.

1.11 Capteur intelligent

Avec le développement de la technologie LSI (large scale integration) et VLSI (very large scale integration), les capteurs peuvent être intégrés aux circuits de traitement du signal sur la même puce, pour réaliser l'ensemble des fonctions. On les appelle « capteurs intelligents » [4].

Il intègre :

- le capteur
- une conversion analogique numérique
- la chaîne de mesure et de traitement numérique du signal pilotée par un microprocesseur
- une mémoire
- une interface de communication numérique standardisée avec un calculateur ou ordinateur via un bus partagé entre plusieurs capteurs intelligents.

Ces capteurs intelligents peuvent ainsi, outre la prise du signal, assurer des fonctions multiples :

- amélioration du rapport signal/bruit par adaptation d'impédance et amplification ;
- Prétraitement du signal, tel que compensation en température et en variation d'alimentation, remise à zéro automatique, filtrage de signaux parasites, corrections de non linéarité ;
- traitement du signal, tel que codage et modulation des signaux de sortie, moyennage redondance pour acquérir le même signal avec plusieurs capteurs, alarmes intégrées pour signaler des défauts de fonctionnement des capteurs ;
- logique et décision ;
- réduction de consommation, par exemple en faisant travailler les capteurs en temps partagé ;

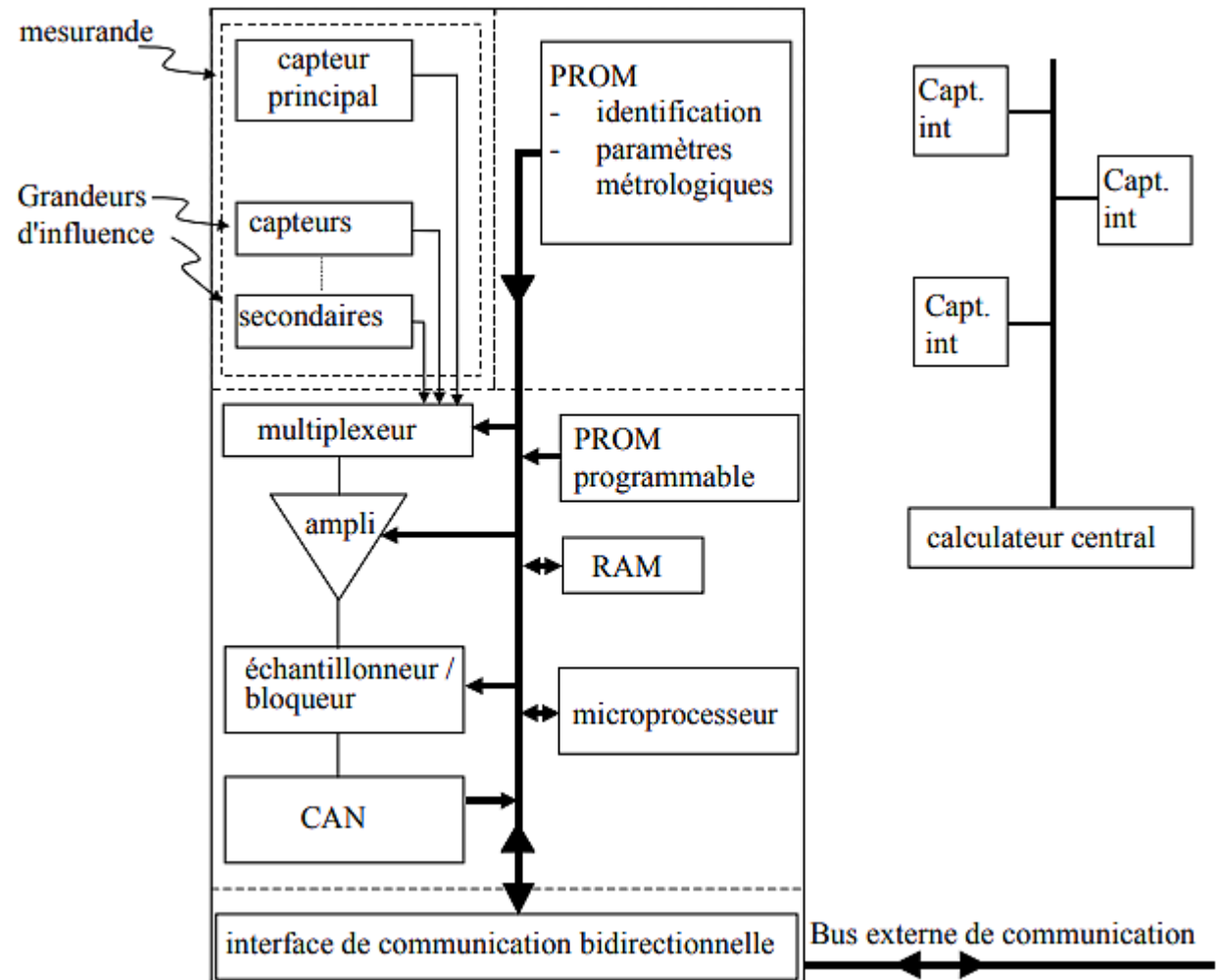


Fig. 1.20 : Structure interne d'un capteur intelligent.

1.12 Quelques capteurs

<ul style="list-style-type: none">▪ Capteurs de position et de déplacement<ul style="list-style-type: none">Potentiomètre résistifCapteurs inductifsCapteurs capacitifsCapteurs de proximité▪ Capteurs de déformation, de force, de pesage, de couple<ul style="list-style-type: none">Jauges d'extensiométrieCapteurs piézoélectriques▪ Capteurs tachymétriques (de vitesse)<ul style="list-style-type: none">Génératrice à courant continuCapteur à reluctance variableTachymètre optique	<ul style="list-style-type: none">▪ Capteurs de pression▪ Capteurs d'humidité▪ Capteurs magnétiques▪ Capteurs de température<ul style="list-style-type: none">VaristancesThermocouplesCapteurs au siliciumThermistances CTNThermistances CTP▪ Capteurs optiques<ul style="list-style-type: none">Photorésistances (LDR)PhototransistorsPhotodiodes
--	---

1.13 Conversion analogique/numérique

La conversion analogique/numérique consiste à transformer la tension analogique (issue du capteur) en un code binaire (numérique) adapté à son exploitation dans un processus de régulation, de contrôle, de calculs ou encore de stockage [3. 7]. La conversion analogique/numérique n'est pas systématique, un stockage ou une régulation pouvant également être réalisés à partir de données analogiques. Le Convertisseur Analogique Numérique (CAN) transforme le signal analogique, signal continûment variable pouvant prendre une infinité de valeurs, en un signal numérique, signal discontinu pouvant être représenté aux moyens de données binaires (0 et 1). La conversion analogique/numérique comporte deux étapes, l'échantillonnage et la conversion proprement dite. L'échantillonnage est une opération qui doit satisfaire un juste équilibre entre précision et rapidité. La rapidité à laquelle sont prélevés les échantillons doit permettre une reconstruction fidèle du signal, elle est représentée par la fréquence d'échantillonnage f_e qui doit être suffisamment grande pour retranscrire les variations rapides du signal (Fig. 1.21). Le théorème d'échantillonnage aussi dénommé théorème de Shannon-Nyquist, permet de déterminer la fréquence d'échantillonnage d'un signal donné. Il énonce que la reconstruction d'un signal de sortie fidèle au signal d'entrée, requiert de choisir une fréquence d'échantillonnage qui soit au moins deux fois supérieure à la fréquence maximale contenue dans le signal d'entrée, soit : $f_e \geq 2.f_{max}$.

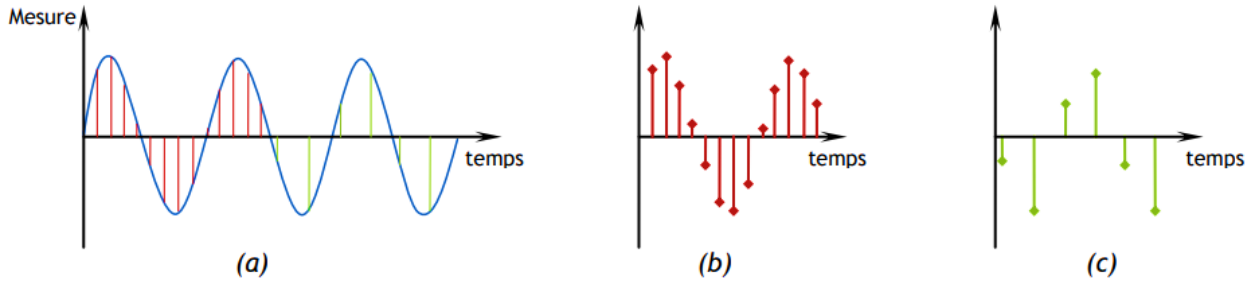


Fig. 1.21 : (a) Echantillonnages d'un signal de mesure, (b) avec une fréquence d'échantillonnage plus élevée et (c) avec $f_{eb} > f_{ec}$

La précision du codage du signal numérique dépend du nombre de bits sur lequel s'effectue ce codage. Chaque peut prendre 2 valeurs (0 ou 1), un codage sur 2 bits peut prendre 4 valeurs, un codage sur n bits peut prendre 2^n valeurs (Fig. 1.22).

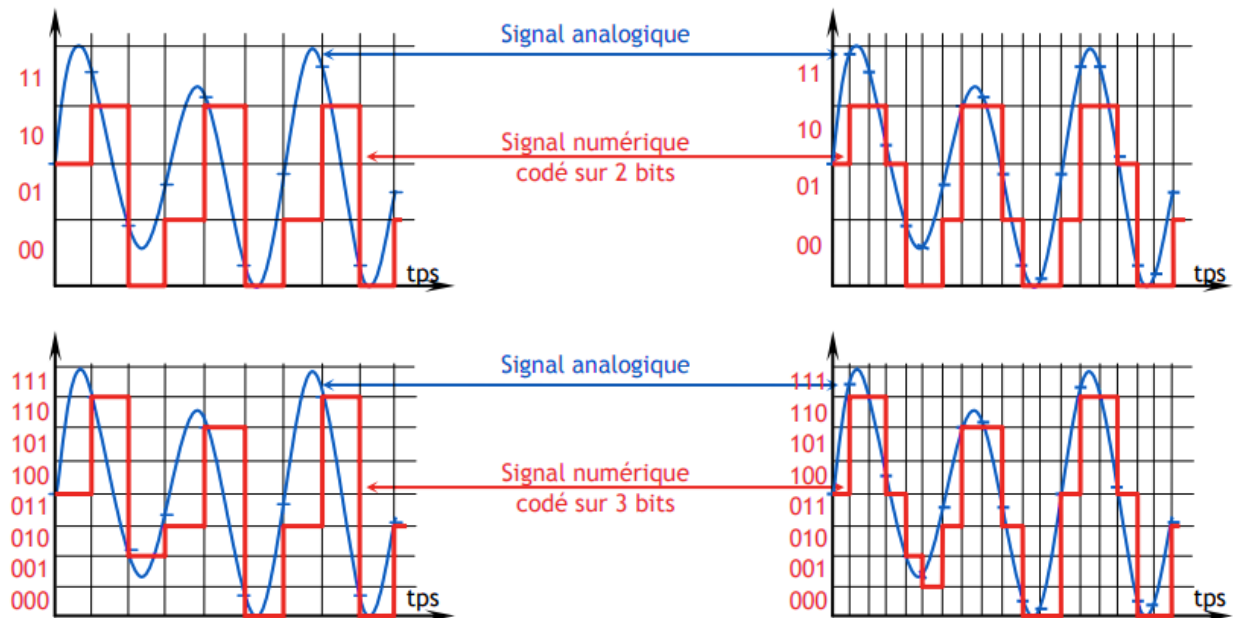


Fig. 1.22 : Représentations de codages d'un signal sur 2 et 3 bits et avec 2 échantillonnages.

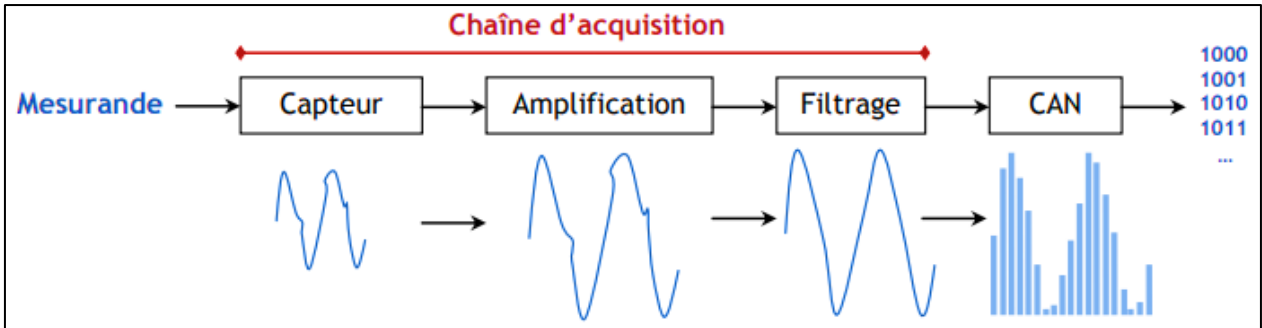


Fig. 1.23 : chaîne d'acquisition.

1.14 Conditionneurs de capteurs

Le choix d'un conditionneur est une étape importante dans la réalisation d'un ensemble de mesure. C'est, en effet, l'association capteur + conditionneur qui détermine le signal électrique. De la constitution du conditionneur dépend un certain nombre de performances de l'ensemble de mesure :

Les types de conditionneurs les plus généralement utilisées sont :

- Le montage potentiométrique qui est l'association en série d'une source, du capteur et d'une impédance qui peut être ou non du même type. C'est un montage simple, dont l'inconvénient majeur est sa sensibilité aux parasites,
- Le pont d'impédances dont l'équilibre permet la détermination de l'impédance du capteur et/ou dont le déséquilibre est une mesure de la variation de cette impédance. C'est donc un double potentiomètre. Le caractère différentiel de la mesure permet de réduire de façon importante l'influence des parasites,
- L'amplificateur opérationnel dont le gain sera déterminé par l'impédance du capteur.

1.14.1 Conditionneurs de capteurs passifs

A. Montage potentiométrique

Diviseur de tension

Le capteur de résistance R est monté en diviseur de tension avec une résistance connue R_0 (Fig. 1.24).

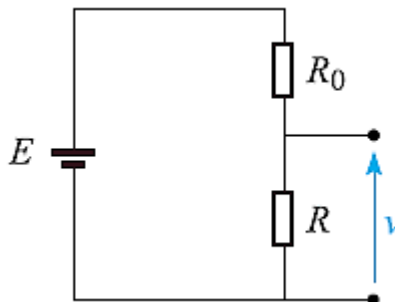


Fig. 1.24 : Capteur résistif placé dans un diviseur de tension.

La tension aux bornes du capteur est donnée par la formule du diviseur résistif :

$$v = \frac{R}{R + R_0} E$$

La relation entre v et R n'est pas linéaire.

Principe du diviseur de tension chargé

Le montage est identique au précédent mais avec en sortie une résistance de charge R_L . Celle-ci est en parallèle avec la résistance R du capteur. La résistance équivalente vue par v s'exprime donc :

$$R_{eq} = \frac{RR_L}{R + R_L}$$

L'équation du diviseur de tension peut alors s'écrire :

$$v = \frac{R_{eq}}{R_0 + R_{eq}} E = \frac{RR_L}{R_0R + R_0R_L + RR_L} E.$$

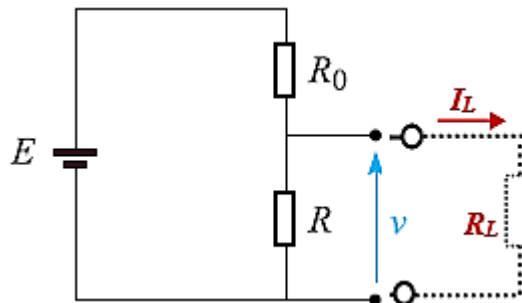


Fig. 1.25 : Diviseur de tension chargé.

Application : le pont diviseur de tension sert généralement à conditionner un signal afin de le traiter par un circuit tout en respectant sa dynamique d'entrée.

B. Pont de Wheatstone

Le pont de Wheatstone est utilisé dans les applications suivantes :

- Capteur de couple ou de pression. La grandeur physique mesurée engendre une variation de la résistance d'un ou de plusieurs éléments du pont de Wheatstone. Une mesure de la tension différentielle aux bornes du pont délivre une tension proportionnelle à la grandeur physique à mesurer [4, 5, 6].
- La quantité de carburant injectée dans un moteur thermique dépend de la masse de l'air et du débit de l'air (débit massique). Le débit massique est déterminé par un montage en pont de Wheatstone. Un élément de ce pont est chauffé et son refroidissement par l'air aspiré est proportionnel au débit massique. Une mesure de la tension différentielle aux bornes du pont délivre une information sur le débit massique.
- Capteur magnétique. Avec des magnétorésistances, la résistance est dépendante du champ magnétique appliqué.

Exemple : Montage en pont de Wheatstone avec un élément sensible : Le montage est présenté sur la Fig 1.26. L'élément sensible délivre une variation de résistance en fonction de la grandeur à mesurer.

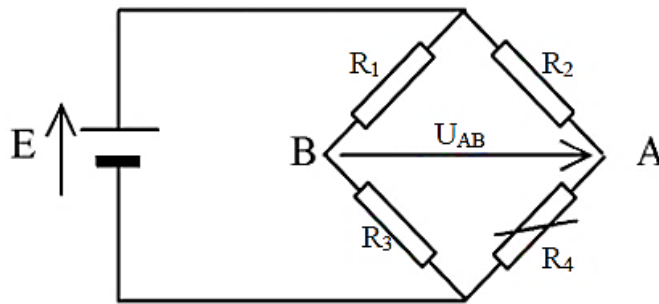


Fig. 1.26 : Montage pont de Wheatstone.

Le pont de Wheatstone est le plus adapté pour la mesure de faibles variations de résistance, car à l'équilibre la tension de sortie U_{AB} est nulle ; si une des résistances varie légèrement on obtient une variation proportionnelle à cette résistance qui pourrait être un capteur passif

$$U_{AB} = \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4)} \quad (\text{Théorème de Millman})$$

On dit que le pont est à l'équilibre lorsque la tension de sortie U_{AB} est nulle soit lorsque

$$R_2 R_3 = R_1 R_4 .$$

C. Montage 1/4 de pont avec 3 résistances fixes et un capteur

Un pont de Wheatstone est constitué par le capteur et trois résistances identiques dont la valeur R_0 est égale à la résistance au repos du capteur (Fig. 1.27).

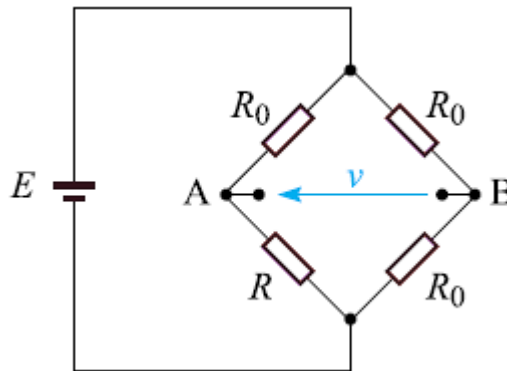


Fig. 1.27 : Capteur résistif placé dans un pont de Wheatstone

La tension entre les points A et B est obtenue par une double application de la formule du diviseur résistif :

$$v = \left(\frac{R}{R + R_0} - \frac{1}{2} \right) E$$

Quand le capteur est au repos, la tension v est nulle, on dit que le pont est à l'équilibre.

La grandeur à mesurer est liée à la variation de résistance du capteur, $\Delta R = R - R_0$:

$$v = \left(\frac{R_0 + \Delta R}{2R_0 + \Delta R} - \frac{1}{2} \right) E = \frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R_0}} E$$

La relation entre la tension de déséquilibre v et la variation relative de résistance n'est pas linéaire, sauf si $\frac{\Delta R}{R_0}$ est très petit devant 1.

1.14.2 Amplificateurs

C'est un système électronique qui augmente la tension et / ou l'intensité d'un signal électrique. L'énergie nécessaire à l'amplification est tirée de l'alimentation électrique du système.

Un amplificateur parfait ne déforme pas le signal d'entrée : sa sortie est une réplique exacte de l'entrée mais d'amplitude majorée [1, 2, 3].

A. Amplificateur d'instrumentation

L'amplificateur d'instrumentation est un amplificateur destiné au traitement des signaux électriques de faibles amplitudes. Il est le plus souvent réalisé à partir d'un ou de plusieurs amplificateurs opérationnels (AOP), où il améliore leurs caractéristiques intrinsèques : composante continue, dérive, bruit, gain en boucle ouverte, taux de réjection du mode commun, impédance d'entrée. Il existe aussi en circuits intégrés [1, 2, 3].

Un exemple en est donné en Fig. 1. 28, réalisé à partir de deux amplificateurs opérationnels.

$$V_S = \frac{R_4}{R_3} \left(V_1 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) - V_2 \left(\frac{R_3 + R_4}{R_4} \right) \right)$$

Si $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ on obtient $V_S = 2(V_2 - V_1)$

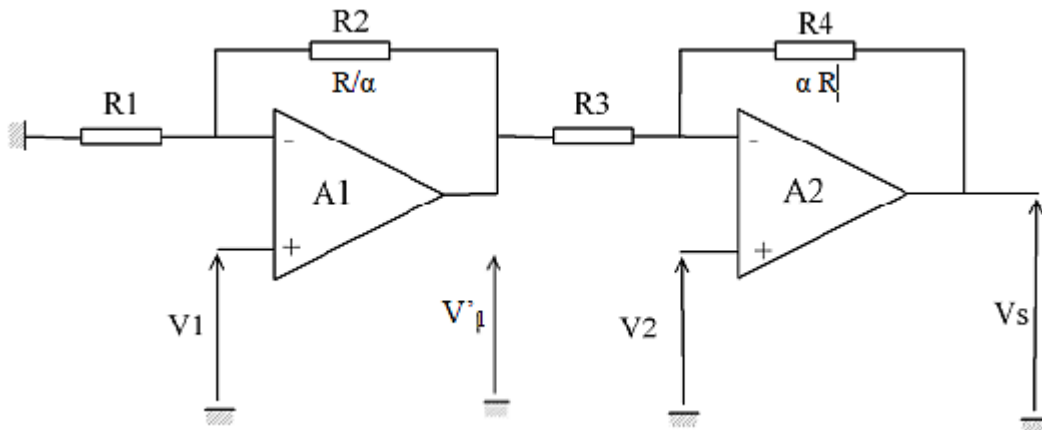


Fig. 1.28 : Amplificateur d'instrumentation à deux amplificateurs opérationnels.

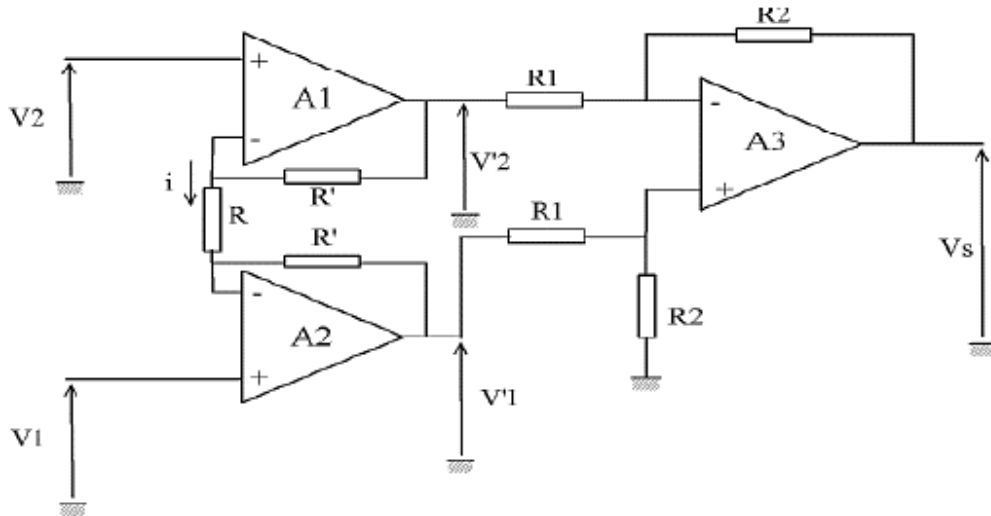


Fig. 1.29 : Amplificateur d'instrumentation à trois amplificateurs opérationnels.

L'amplificateur d'instrumentation de la Fig. 1. 29 est constitué par un amplificateur différentiel A3. A1 et A2 n'amplifient pas la tension de mode commun mais amplifient le mode différentiel. En effet, pour une tension de mode commun présente sur les deux entrées U1 et U2.

B. Linéarisation et amplification

Avec un seul élément sensible, il est possible en utilisant le montage de la Fig. 1.30 de rendre la tension de sortie V_s linéaire en fonction de α [1, 2, 3].

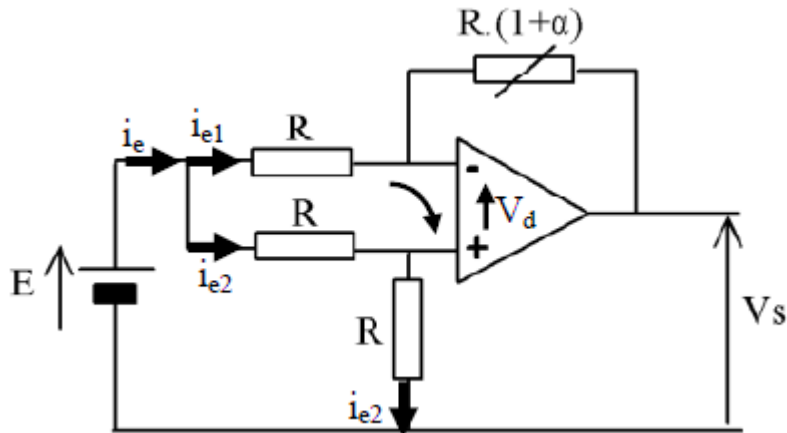


Fig. 1. 30 : linéarisation par l'utilisation d'un amplificateur opérationnel.

$$V_R = \left(\frac{E \cdot R}{2R} \right) = \frac{1}{2} E$$

$$V_S = -R(1 + \alpha)i_{e1} + U_R$$

$$U_R = R i_{e2} \text{ donc } i_{e2} = \frac{U_R}{R} \text{ comme } i_{e1} = i_{e2}$$

$$\text{Car } R i_{e1} - U_d - R i_{e2} = 0 \Rightarrow i_{e1} = i_{e2}$$

$$\text{Donc } V_S = -R(1 + \alpha)(V_R/R) + U_R$$

$$\Rightarrow V_S = U_R[-(1 + \alpha) + 1] \text{ donc } V_S = [-(\alpha \times E)/2]$$

On constate que la tension de sortie V_S est linéaire en fonction de α :

La tension de sortie est donnée par la relation $V_S = [-(\alpha \times E)/2]$

1.15 Conclusion

Ce premier chapitre a présenté les bases des capteurs et de leur chaîne d'acquisition. Il a abordé leur définition, leurs principales caractéristiques métrologiques et fonctionnelles, leurs limites d'utilisation ainsi que les critères de choix. Les différents types de capteurs, classiques, composites et intelligents, ont été introduits, de même que les notions de conditionnement et de conversion des signaux de mesure.

1.16 Exercices corrigés

Exercice 01

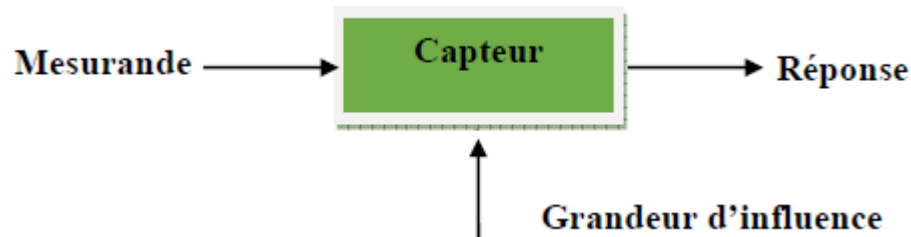


Fig. 1. 31. Fonctionnement d'un capteur.

1. Quelle est la fonction réalisée par ce capteur ?
2. Qu'appelle-t-on mesurande ?
3. a. Que représente la grandeur d'influence ?
 - b. Comment doit être sa contribution au signal de sortie ?
 - c. Peut-on utiliser un capteur pour mesurer une grandeur d'influence ? Si oui donner un exemple.

Réponse :

1. Le capteur a pour fonction de transformer une grandeur physique (mesurande) en un signal exploitable (électrique, pneumatique, numérique, etc.) appelé réponse.
2. Le mesurande est la grandeur physique que l'on souhaite mesurer (par exemple : température, pression, déplacement, intensité lumineuse).

3. a. C'est une grandeur extérieure, différente du mesurande, qui agit sur le capteur et peut modifier la réponse.
- b. Sa contribution doit être aussi faible que possible afin de minimiser les erreurs de mesure.
- c. Oui. Une grandeur considérée comme influence dans un contexte peut devenir un mesurande dans un autre.
Exemple : la température est une grandeur d'influence pour un capteur de déplacement, mais elle devient le mesurande d'un capteur de température (thermocouple).

Exercice 02

Préciser si les erreurs suivantes sont systématiques ou aléatoires :

- Vieillessement de l'instrument.
- erreur sur la sensibilité de l'instrument.
- Erreur de lectures.
- Signaux parasites autour du capteur.

Réponse :

- Vieillessement de l'instrument, **Systématique**
- erreur sur la sensibilité de l'instrument, **Systématique**
- Erreur de lectures, **Systématique**
- Signaux parasites autour du capteur. **Aléatoire**

Exercice 03

Soit un capteur de niveau ayant une étendue de mesure de 0.5 à 20.5 mètres et donnant un signal de sortie 1-5 Volt.

1. Quelle est la sensibilité de ce dispositif ?
2. Écrire la fonction de transfert (équation linéaire $y = Mx + b$) permettant de connaître la valeur des sorties en fonction des entrées ?
3. Si la classe de précision de ce capteur est de ± 0.25 % E.M., quelle est son erreur absolue et son erreur relative à 15 mètre ?

Réponse :

1. La sensibilité du capteur est donnée par :

$$S = \frac{\Delta \text{ sortie}}{\Delta \text{ entrée}} = \frac{5 - 1}{20.5 - 0.5} = \frac{4}{20} = 0.2v/m$$

2. La Fonction de transfert : $y = 0.2x + 0.9$
3. L'erreur absolue du capteur, correspondant à une classe de précision de ± 0.25 % E.M., est :

$$E_{Abs} = \frac{\pm 0.25}{100} \times 20 = \pm 0.05 m$$

Connaissant cette valeur, nous pouvons maintenant calculer l'erreur relative à une mesure de 15 mètre :

$$E_{Rel} = \frac{E_{Abs}}{\text{mesure}} \times 100 = \frac{\pm 0.05}{15} \times 100 = \pm 0.33\%$$

Chapitre 2 : Les capteurs de température

2.1 Généralités

La température est une grandeur différente des autres grandeurs physiques (longueur, masse, ...) qui sont des grandeurs extensives qu'on peut définir numériquement par rapport à une grandeur de même nature prise comme référence. La température est une grandeur intensive, multiplier ou diviser une température n'a pas, a priori, de signification physique évidente. En thermique, la grandeur extensive associée à la température est l'entropie. Afin de mesurer la température il est nécessaire que le capteur mesure une grandeur physique qui dépend de la température de l'élément à mesurer. C'est-à-dire qu'il existe une relation mathématique qui relie la grandeur G à la température [8.9] :

$$G = f(T)$$

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

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

2.2 Introduction

Les capteurs de température sont des dispositifs permettant de transformer l'effet du réchauffement ou du refroidissement sur leurs composants en signal électrique.

Jusqu'à l'invention du thermoscope de Galilée, les hommes étaient incapables de mesurer la température. Les thermomètres virent bientôt le jour et avec eux, les unités comme le degré Celsius et le Kelvin. Par la suite, les techniques automatisées voyant le jour, il a fallu trouver le moyen de traduire les températures en signaux numériques compréhensibles par des machines.

Dans ce chapitre nous allons étudier différents capteurs de température.

Échelles de température (grandeur intensive)(pour plus de détail voir l'annexe C)

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 : $T^{\circ}\text{C} = T\text{K} - 273,15$, 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 :

$$T^{\circ}\text{F} = 9/5 T^{\circ}\text{C} + 32 \text{ ou } T^{\circ}\text{C} = 5/9(T^{\circ}\text{F} - 32)$$

2.3 Thermocouples

2.3.1 Principe

Un thermocouple constitué de deux conducteurs A et B de nature différente, dont les jonctions sont à des températures T_1 et T_2 délivre une f.e.m V_0 qui dépend d'une part de la nature de A et B, et d'autre part des températures des deux jonctions. En général, la température de l'une des jonctions est fixe, connue et sert de référence ($T_1 = T_{\text{ref}}$), tandis que l'autre jonction est placée dans le milieu dont on cherche à mesurer la température. La jonction à la température T_1 est également appelée soudure froide et celle à la température T_2 soudure chaude.

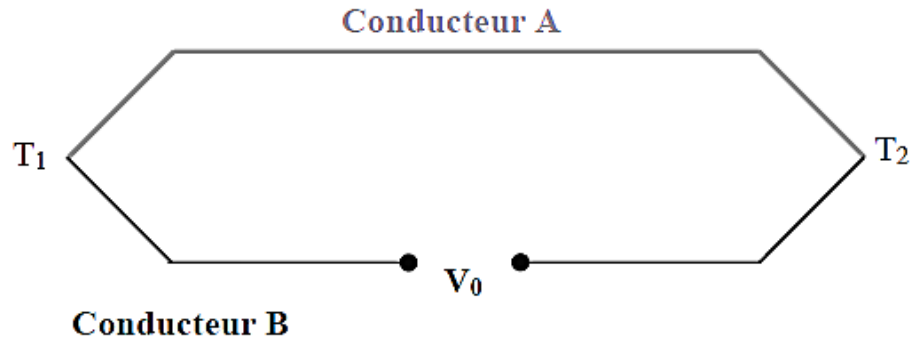


Fig. 2.1 : Principe de la mesure de la f.é.m d'un thermocouple.

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

2.3.2 Effet Peltier

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

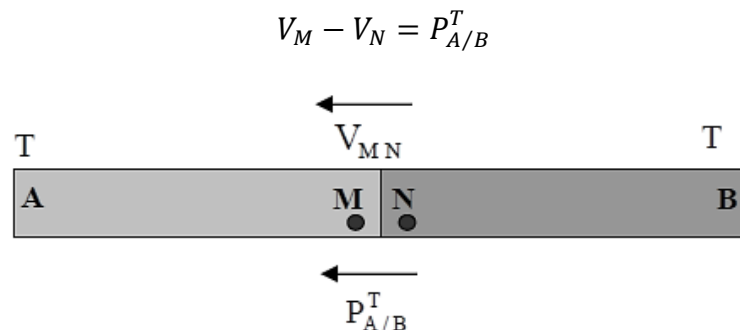


Fig. 2.2 : Effet Peltier.

Loi de Volta

Dans un circuit isotherme, constitué de conducteurs différents, la somme des f.e.m. de Peltier est nulle. On a donc : $V_M - V_N = P_{A/B}^T$

2.3.3 L'effet Thomson

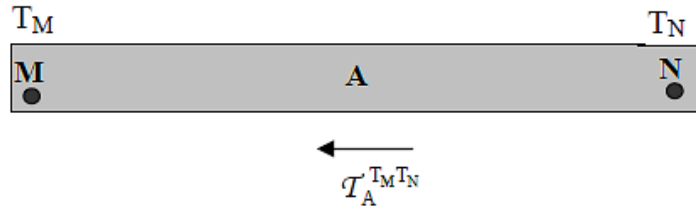


Fig. 2.3 : Effet Thomson.

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

$$\mathcal{T}_A^{T_M T_N} = \int_{T_N}^{T_M} h_A dT$$

avec h_A le coefficient de Thomson du conducteur qui dépend de la température.

2.3.4 L'effet Seebeck

On considère le circuit électrique fermé ci-dessous, constitué des deux conducteurs A et B dont les jonctions sont aux températures T_1 et T_2 . Ce circuit constitue un couple thermoélectrique et est le siège d'une f.e.m dite de Seebeck $\mathcal{S}_{A/B}^{T_2 T_1}$ qui résulte des effets de Peltier et de Thomson qui s'y produisent :

$$\mathcal{S}_{A/B}^{T_2 T_1} = \mathcal{T}_A^{T_2 T_1} + P_{A/B}^{T_2} + \mathcal{T}_A^{T_1 T_2} + P_{B/A}^{T_1} + \mathcal{T}_B^{T_2 T_1}$$

Ou encore :

$$\mathcal{S}_{A/B}^{T_2 T_1} = (\mathcal{T}_B^{T_2 T_1} - \mathcal{T}_A^{T_2 T_1}) + (P_{A/B}^{T_2} + P_{B/A}^{T_1})$$

Si par convention on choisit pour l'une des températures, T_1 par exemple, une valeur de référence déterminée (généralement 0°C), la f.e.m ne dépend que de la température T_2 , pour un couple de conducteurs A et B donnés.

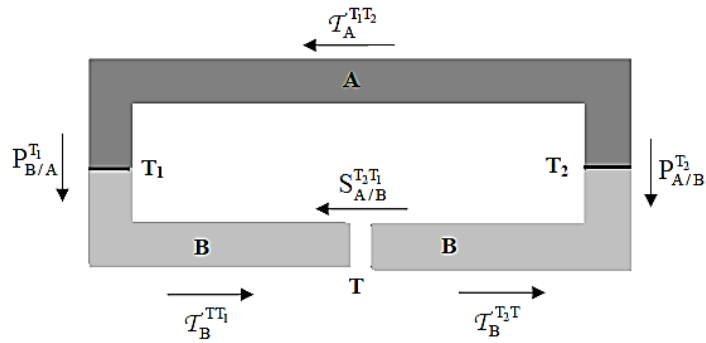


Fig. 2.4 : Effet Seebeck.

2.3.5 Principes pratiques d'utilisation des thermocouples

L'utilisation pratique des thermocouples repose sur les six principes suivants :

A. Thermomètre à thermocouple

On constate que si la température T_2 est différente de T_1 alors il apparaît une tension U aux bornes des deux fils soumis à la température T_1 .

Le phénomène inverse est aussi vrai : si on applique une tension, alors il y aura un échauffement ou un refroidissement au point de liaison des deux conducteurs (modules à effet Peltier).

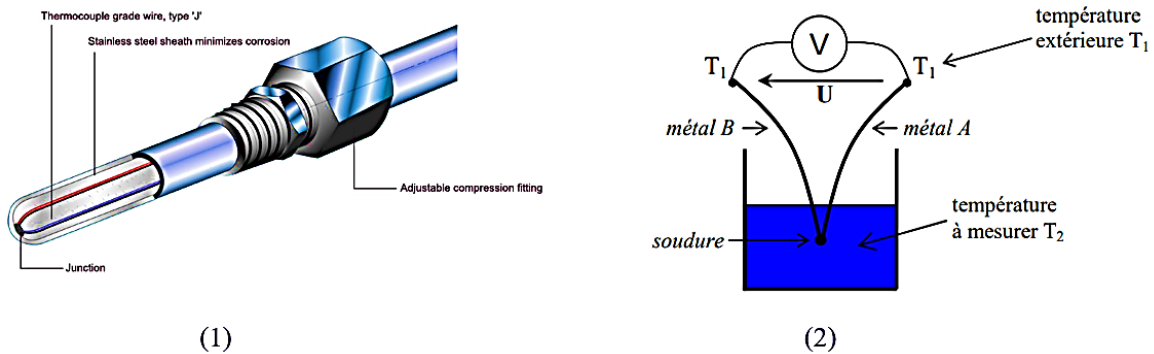


Fig. 2.5 : (1) Capteur thermocouple, (2) Schéma de principe du thermocouple.

Application : Mesure des hautes températures : 900 à 1300 °C.

B. Types de thermocouples

Un thermocouple peut être formé à partir de n'importe quel couple de métaux. En pratique, pour des questions de coût, de sensibilité, de gamme de mesure, d'oxydation, de résistance mécanique, etc., les couples de métaux utilisés sont restreints.

Dans la liste qui suit, il est indiqué usage « continu » et « intermittent » pour les plages de températures. Chaque type de thermocouple peut être utilisé dans toute sa plage d'usage intermittent. Cependant, utiliser un thermocouple hors de sa plage d'usage continu trop longtemps peut dégrader le thermocouple et ses performances, il est donc conseillé de ne l'utiliser dans cette plage d'usage intermittent que de manière ponctuelle [10.11].

Types des thermocouples les plus courants						
Type	Métal A (+)	Métal B (-)	Limites théoriques °C	Coef Seebeck S_{AB} ($\mu V/^\circ C$) à $T^\circ C$	Erreur standard	Erreur Mini
B	Pt 30% Rhodium	Pt 6% Rhodium	0 à 1820	5,96 μV à 600°C	0,5%	0,25%
E	Nickel 10% Cr	Constantan	-270 à 1000	58,67 μV à 0°C	1,7% à 0,5%	1% à 0,4%
J	Fer	Constantan	-210 à 1200	50,38 μV à 0°C	2,2% à 0,75%	1,1% à 0,4%
K	Chromel	Alumel	-270 à 1372	39,45 μV à 0°C	2,2% à 0,75%	1,1% à 0,2%
N	Nicrosil	Nisil	-270 à 1300	25,93 μV à 0°C	2,2% à 0,75%	1,1% à 0,4%
R	Pt 13% Rhodium	Pt	-50 à 1768	11,36 μV à 600°C	1,5% à 0,25%	0,6% à 0,1%
S	Pt 10% Rhodium	Pt	-50 à 1768	10,21 μV à 600°C	1,5% à 0,25%	0,6% à 0,1%
T	Cuivre	Constantan	-270 à 400	38,75 μV à 0°C	1% à 0,75%	0,5% à 0,4%

Tableau 2.1: Types des thermocouples les plus courants avec leurs caractéristiques.

Avantages :

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

Inconvénients :

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

C. Thermomètre à résistance

Les capteurs (thermomètres) à résistance : métallique ou à semiconducteur

Le principe est basé sur l'effet de la température sur la résistance d'un conducteur métallique ou d'un semiconducteur.

2.3.6 Résistance métallique

La relation liant la résistance d'un métal à la température est :

$$R(T) = F(T - T_0) \quad T - T_0 = \Delta T$$

A. Sonde de platine

La sonde à résistance de platine est constituée d'un filament de platine (Pt), entourant une tige de verre ou non, dont la caractéristique est la variation de sa résistance en fonction de la température. Sa résistance augmente en même temps que la température.

Les sondes les plus couramment utilisées sont de type Pt100 (100 Ω à 0°C).

Il en existe de plusieurs tailles et formes en fonction de l'utilisation Fig 2.6(a).

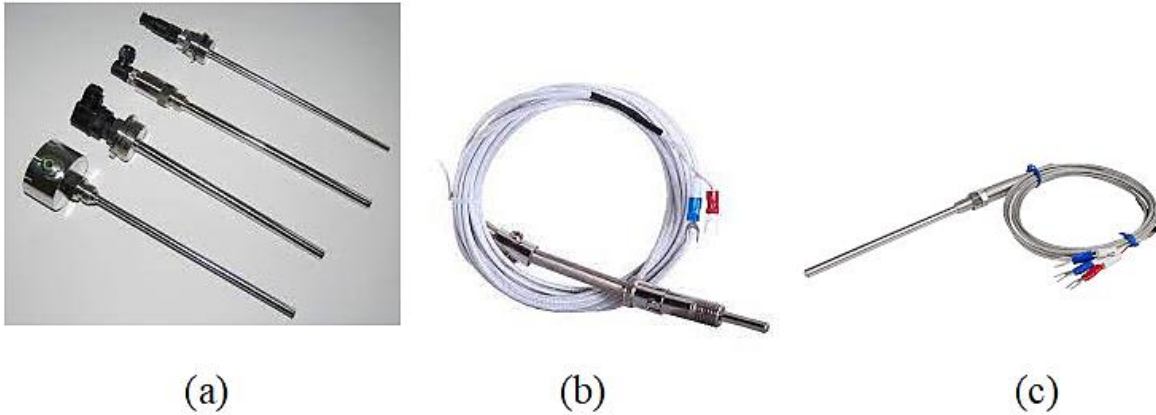


Fig. 2.6 : (a) Sonde de platine, (b) thermocouple, et (c) Pt 100.

C'est le modèle le plus couramment employé dans l'industrie, Une sonde Pt100 est un type de capteur de température aussi appelé RTD (Resistance Temperature Detector, ou Détecteur de Température à Résistance) qui est fabriqué à partir de platine. L'élément Pt100 a une résistance de 100 ohms à 0°C, et il est de loin le capteur Pt 100 le plus utilisé. Le capteur Pt 500 à une résistance de 500 ohms à 0°C et le capteur Pt1000 a une résistance de 1000 ohms à 0°C. Normalement, ces capteurs sont équipés d'une gaine de protection ou de montage pour former une sonde de température et ceux-ci sont couramment appelés des PRT ou TRP (Thermomètre à Résistance de Platine) ou des sondes Pt100.

La plage de variation est compris entre :- 200°C à 850°C avec : $A = 3.9083 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; $B = -5.775 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$; $C = -4.183 \times 10^{-12} \text{ }^\circ\text{C}^{-4}$ (pour $T < 0^\circ\text{C}$, $C=0$ au-dessus)

B. Sensibilité du capteur

Plus un capteur est sensible plus la mesure pourra être précise. C'est une caractéristique importante pour l'exploitation et l'interprétation des mesures.

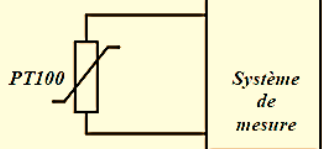
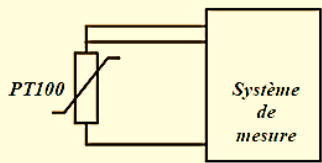
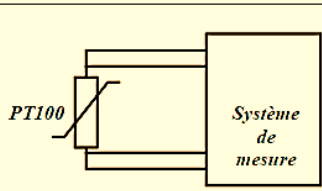
$$S(T) = \frac{dR}{dT}$$

Remarque : La caractéristique du capteur est linéaire, pour une faible variation de température la valeur de résistance change linéairement, ce qui donne une mauvaise (faible) sensibilité.

Comparativement aux thermocouples Fig. 2.6, ils présentent les avantages suivants :

- Grande plage de température de -200 °C à 850 °C,
- Courbe caractéristique quasi linéaire,
- Précision élevée,
- Bonne interchangeabilité [12. 13].

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>

2.3.7 Pt 1000

La valeur élevée de la résistance de cette sonde permet de limiter, pour une tension donnée, l'influence sur la température à mesurer de la dissipation thermique par effet Joule dans la résistance (auto-échauffement, voir ci-dessous). On peut ainsi travailler avec des courants de mesure nettement plus faibles Fig 2.7. [13].



Fig. 2.7: Pt 1000.

2.4 Thermomètre à résistance de platine

Le thermomètre à résistance de platine est un dispositif (un type de thermistance) permettant de mesurer la température. Il est basé sur le fait que la résistance électrique du platine varie

selon la température. Le thermomètre à résistance de platine fut développé en 1888. En anglais on parle généralement de sonde RTD [1. 13].

La production des thermomètres à résistance de platine est standardisée, voir normalisée. La variété de produit sur le marché est donc limitée. En pratique, les thermomètres à résistance de platine se distinguent par la valeur de référence de leur résistance à la température $t_{90} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Elles sont nommées Pt-X, Pt pour platine et X étant la valeur de référence de la résistance (en ohm). Par exemple, une sonde Pt100 possède une résistance de 100 ohms à la température t_{90} de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.4.1 Résistance à semi-conducteur

Les principaux capteurs de température utilisés en électronique sont basés sur la variation de la résistance électrique en fonction de la température [14].

Couramment, on différencie les thermo-résistances des thermistances comme suit :

A. Thermorésistantes

Augmentation régulière de la résistivité de certains métaux (argent, cuivre, nickel, or, platine, tungstène, titane) avec l'augmentation de la température Fig. 2.8(a).

B. Thermistances

Variation (plus importante) de la résistance d'autres matières (oxydes métalliques, composites) en fonction de la température, cette variation pouvant être assez irrégulière ou soudaine, dans un domaine étroit de température Fig. 2.8(b).

C. Capteurs de température au silicium

Dont la plupart basés sur la dépendance de la tension d'une jonction diodes en fonction de la température plutôt que de la résistance proprement dite. Suivant le niveau de dopage, les résistances à base de matériaux semi-conducteurs peuvent avoir un coefficient en température négatif (dopage faible) ou positif (dopage élevé) Fig. 2.8.(c).

2.4.2 Classification

Il est basé sur celui d'une résistance ou on classe deux types de thermistances (Fig. 2.8(d)) : les CTN et les CTP (Fig. 2.8(e)).

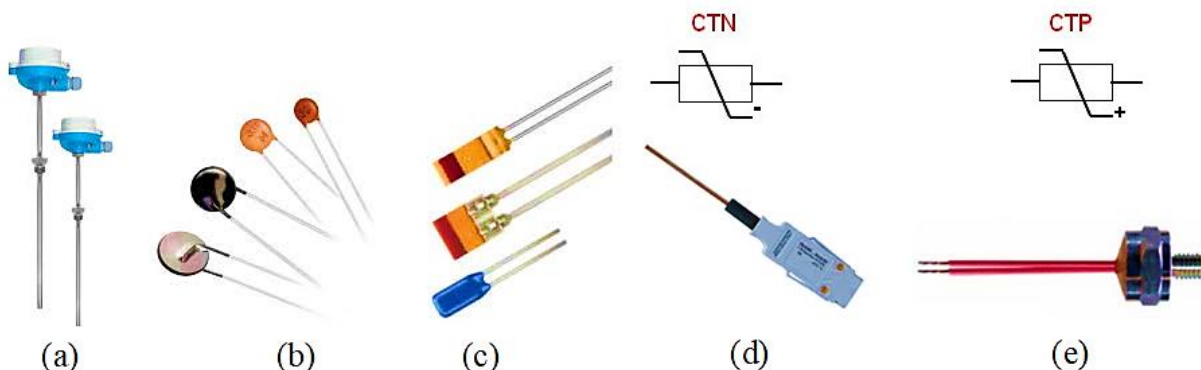


Fig. 2.8 : (a) Thermorésistante, (b) Thermistances, (c) Capteurs de température au silicium, et Représentations schématiques et Capteur de température CTN(d) et CTP(e).

A. Coefficient de Température Négatif (CTN)

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 (Fig 2.3)

Les CTN sont fabriquées à base d'oxydes de métaux de transition (manganèse, cobalt, cuivre et nickel). Ces oxydes sont semiconducteurs.

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 kilo ohms.

Le temps de réponse dépend du volume de matériau utilisé (Fig 2.2.b). Les CTN sont utilisées pour les mesures et le contrôle de la température [14].

B. Coefficient de Température Positif (CTP)

Les CTP (Coefficient de Température Positif, en anglais PTC, Positive Temperature Coefficient) sont des thermistances dont la résistance augmente avec la température. On distingue les thermo-résistances (augmentation continue et régulière de la résistance avec la température) des CTP dont la valeur augmente fortement avec la température dans une plage de température limitée (typiquement entre 0 °C et 100 °C) Fig 2.4.

Pour ces dernières, il y a deux types principaux :

CTP 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.

CTP 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 CTP peuvent être utilisées comme (Fig 2.2.b):

- Détecteur de température, pour protéger des composants (moteurs, transformateurs) contre une élévation excessive de la température ;
- Protection contre des surintensités ;
- 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 [14].

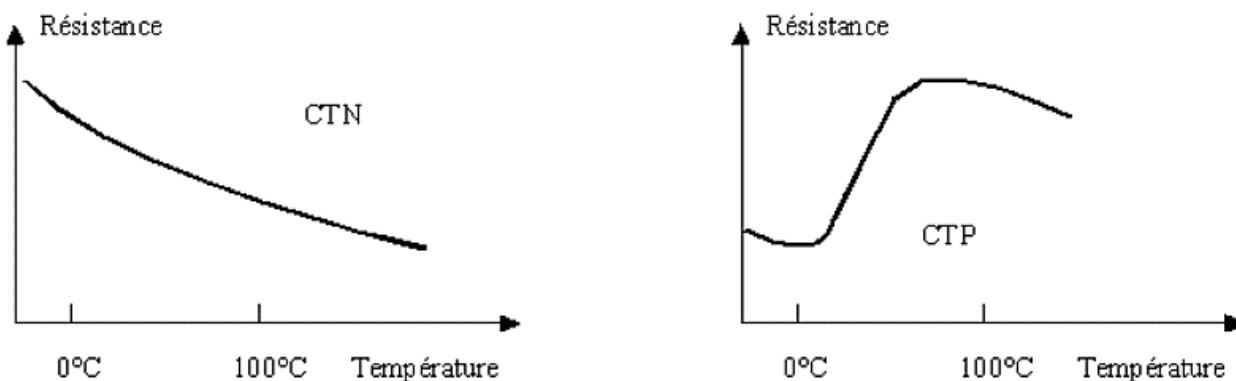


Fig 2.3: (à droite) Caractéristique typique d'une CTN, (à gauche) d'une CTP.

Caractéristiques des thermistances :

- Une bonne sensibilité thermique
- Elle permet des mesures ponctuelles grâce à sa petite dimension.
- Grande précision.

2.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté les principaux capteurs de température en détaillant leurs principes physiques et leurs applications. Après une introduction générale, l'étude s'est portée sur les thermocouples et les différents effets thermoélectriques (Seebeck, Peltier, Thomson), ainsi que sur leurs conditions pratiques d'utilisation. Les capteurs à résistance, tels que le Pt1000, et les thermistances, ont également été abordés, de même que les capteurs au silicium. Cette classification met en évidence la diversité des technologies disponibles pour la mesure de température et leur adaptation aux besoins spécifiques des systèmes de mesure modernes.

2.6 Exercices corrigés

Exercice 01

1. Exprimer les températures suivantes en °C, °F et °K :

– $\theta_1 = 22 \text{ K}$;

– $\theta_2 = 22^\circ\text{C}$;

– $\theta_3 = 22^\circ\text{F}$.

Lorsqu'une tige métallique est portée à la température θ , sa longueur varie. La relation entre sa longueur L et θ est : $L = L_0(1 + \lambda \theta_c)$. Avec L et L_0 en m, θ_c en °C et λ de °C⁻¹.

b) Exprimer L en fonction de L_0 , λ et θ_f , pour θ_f en °F.

Réponse

1. Les températures converties sont :

– $\theta_1 = 22 \text{ K}$: $\theta_{1\text{C}} = -251.15^\circ\text{C}$ et $\theta_{1\text{F}} = -419.07^\circ\text{F}$.

– $\theta_2 = 22^\circ\text{C}$: $\theta_{2\text{K}} = 295.15 \text{ K}$ et $\theta_{2\text{F}} = 71.6^\circ\text{F}$.

– $\theta_3 = 22^\circ\text{F}$: $\theta_{3\text{C}} = -5.56^\circ\text{C}$ et $\theta_{3\text{K}} = 267.59 \text{ K}$.

b) l'expression de L en fonction de L_0 , λ et θ_f , pour θ_f en °F :

Si la température est donnée en fonction de °F, on convertit :

$$\theta_c = \frac{5}{9}(\theta_f - 32)$$

$$\text{Donc } L = L_0 \left(1 + \lambda \frac{5}{9}(\theta_f - 32) \right)$$

Exercice 02

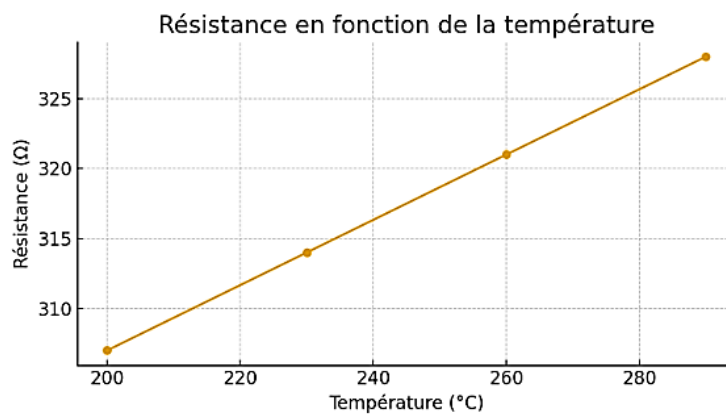
Les valeurs de résistances suivantes d'un thermomètre à résistance de platine, sont mesurées pour une plage de températures déterminer la sensibilité de mesure de l'instrument en ohms/°C.

Résistances (Ω)	Température ($^{\circ}\text{C}$)
307	200
314	230
321	260
328	290

Réponse

Sensibilité en ohms/°C :

$$S = \frac{328 - 307}{290 - 200} = 0.32 \Omega/^{\circ}\text{C}$$



Chapitre 3 : Capteur de déplacement, proximité, et de position

3.1 Introduction

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

Les capteurs de déplacement existent en trois grandes technologies :

- Capteurs de déplacement résistifs.
- Capteurs de déplacement inductifs.
- Inductance variable.
- LVDT (Linear Variable Displacement Transformer).
- Synchro-machine.

Dans tous les cas, les capteurs de déplacement sont en contact avec l'objet dont il faut mesurer la distance. Chaque technologie possède une plage de distance sur laquelle elle opère bien. Le choix de la technologie sera donc en partie, basé sur la plage de distance à mesurer pour l'application.

Un capteur de proximité est un élément de mesure détectant si un objet est présent à proximité sans avoir de contact avec l'objet. La détection s'opère par des effets physiques que l'objet peut produire sur le détecteur, sans contact. Il existe 4 technologies :

- Capteur de proximité inductif : l'objet est détecté par ses effets sur un champ magnétique émis par le détecteur.
- Capteur de proximité capacitif : l'objet est détecté par ses effets sur un champ électrique émis par le détecteur.
- Capteur de proximité photoélectrique : l'objet est détecté par ses effets sur un faisceau de radiations optiques.
- Capteur de proximité ultrasonique : l'objet est détecté par ses effets sur une onde ultrasonique émise par le détecteur.

Un capteur de position est un élément de mesure ayant un contact avec l'objet dont on doit vérifier s'il occupe une position donnée. Une seule technologie est utilisée, ce sont les interrupteurs de fin de course.

3.2 Capteurs de déplacement

Un capteur de déplacement permet de transformer un déplacement mesuré en signal électrique proportionnel.

Le capteur de déplacement est devenu un élément essentiel dans de nombreuses industries comme l'industrie automobile et l'industrie du sport automobile, les machines outils numériques, la robotique, l'aérospatiale et la défense, automatisation industrielle, l'industrie

médicale et pharmaceutique où une mesure de déplacement fiable et de haute précision est primordiale.

3.2.1 Capteur de déplacement résistif

A. principe

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

Plus généralement, un potentiomètre est une résistance variable à 3 bornes, dont un est relié à un curseur **C** se déplaçant le long d'une piste résistive se terminant par les deux autres bornes (schéma ci-dessous). Ce système permet de récupérer une tension qui varie en fonction de la position du curseur **C**.

Un capteur de déplacement potentiométrique linéaire est un potentiomètre dont la valeur de résistance varie proportionnellement à la distance entre ses 2 bornes et le curseur. Ainsi lorsque le curseur se trouve au centre de la piste, la valeur de résistance ohmique que l'on peut mesurer entre le curseur et les 2 bornes est égale.

De conception simple et sans électronique complexe, le capteur potentiométrique est très économique et simple d'installation.

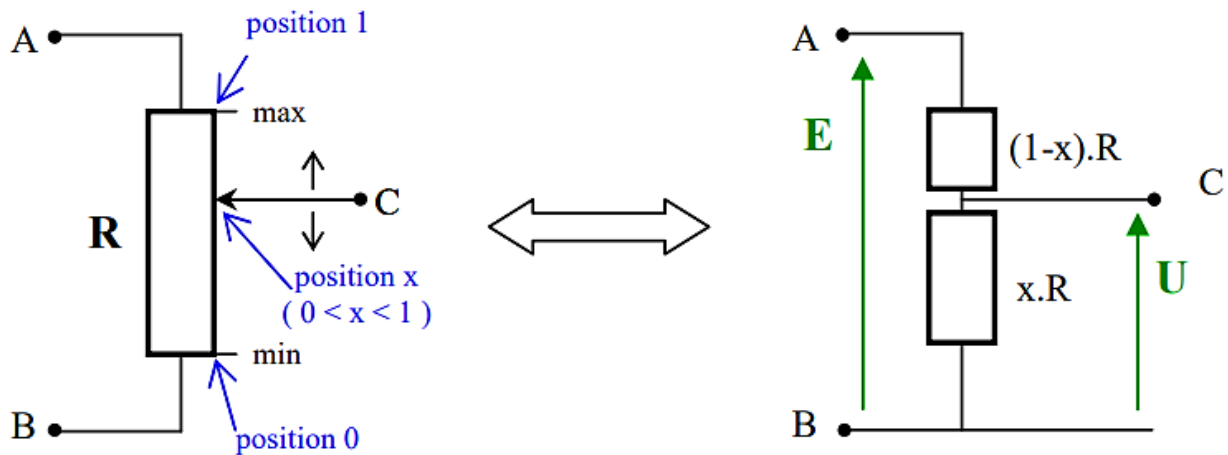


Fig. 3.1 : Capteur de déplacement résistif.

On applique une tension continue E entre les extrémités A et B du potentiomètre.

La tension U en sortie aura l'expression suivante :

$$U = E \frac{x \cdot R}{R} = x \cdot E$$

La tension U en sortie est donc proportionnelle à la position x du curseur.



Fig. 3.2: Capteur linéaire potentiométrique

Avantages :

- simplicité d'utilisation
- faible coût.

Inconvénient

- usure mécanique (utilisation déconseillée dans les asservissements très dynamiques)

B. Caractéristiques principales

- Capteur très économique et simple;
- Course relativement étendue;
- Le problème majeur est celui de l'usure;
- Un potentiomètre n'est pas étanche;
- Besoin d'un lien (fil) avec l'objet;
- La vitesse de l'objet est limité.

C. Utilisations

1. Mesures de déplacements rectilignes (potentiomètre rectiligne).
2. Mesures d'angles de rotations (potentiomètre rotatif monotour ou multitour).
3. Mesure de débit de fluide : Le débit du fluide exerce une force sur un clapet relié au curseur d'un potentiomètre. La tension en sortie du potentiomètre augmente avec la vitesse d'écoulement.

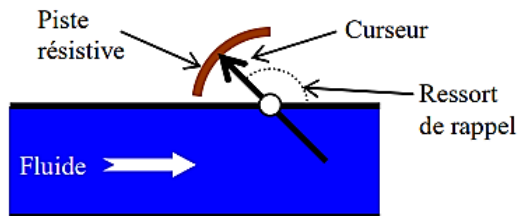


Fig. 3.3 : Mesure de débit de fluide

3.2.2 Capteurs de déplacement inductifs

A. Le capteur à LVDT

Un capteur LVDT (transformateur différentiel linéaire variable) est constitué d'un système de bobines composé d'un enroulement primaire et de deux enroulements secondaires, convertissant le déplacement linéaire en un signal électronique [15].

L'électronique de conditionnement alimente la bobine primaire avec un courant alternatif. Un noyau ferromagnétique, en contact avec l'objet à mesurer, est situé à l'intérieur des bobines cylindriques et induit une tension dans les bobines secondaires (U_{sec}).

Lorsque le noyau est positionné au centre, les tensions de la bobine secondaire 1 et de la bobine secondaire 2 sont égales. Si le noyau est déplacé hors du centre, la tension monte dans une bobine et diminue dans l'autre.

L'électronique effectue une analyse différentielle et convertit en un signal de sortie standard (0...10 V, 4...20 mA, etc.) offrant une excellente précision de mesure



Fig. 3.4 : Capteurs de déplacement à LVDT.

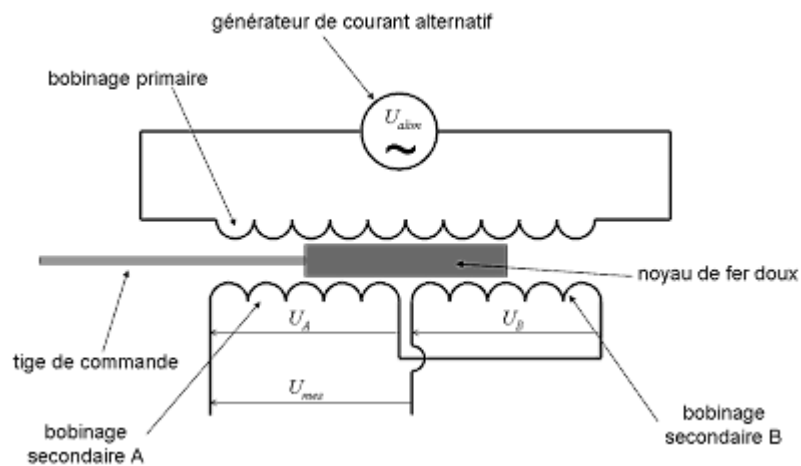


Fig. 3.5 : Principe fondamental du LVDT.

La tension mesurée en sortie vaut :

$$x = k \frac{U_A - U_B}{U_A + U_B}$$

Le sens du déplacement est déterminé à partir de l'angle de phase de la tension de sortie par rapport à la tension d'entrée

Lorsque le noyau est centré, les rapports de transformation entre la bobine primaire et les deux bobines secondaires est équivalent. Par conséquent, la tension de sortie est nulle. Lorsque le noyau se déplace du côté de la bobine A, le rapport de transformation est meilleur du côté bobine A que du côté bobine B. Nous avons alors $U_A > U_B$, donc $U_{mes} > 0V$ et U_{mes} en phase avec la tension d'entrée U_{alim} . Quand le noyau est du côté de la bobine B, on a toujours $U_{mes} > 0V$, mais à cause du sens d'enroulement différent de la bobine B, la tension mesurée est en opposition de phase avec la tension d'alimentation.

B. Avantages du capteur LVDT

1. Adapté aux conditions et environnement sévère, idéal pour application militaire, aérospatiale, turbines, centrales électriques, automatisation industrielle, etc...
2. Principe de mesure différentiel permettant le filtrage des défauts
3. Principe de mesure sans contact, entre la bobine et le noyau, donc "sans usure". Par conséquent, permet d'assurer une mesure fiable sur longue durée de vie,
4. Les capteurs LVDT inductifs ne réagissent que lorsque le noyau est déplacé dans le sens de l'axe. Le décalage radial de la tige de poussée, qui peut se produire en cas de montage excentré, n'influence pas le signal de sortie.

3.3 Capteur de proximité

3.3.1 Capteur de proximité inductif

Les capteurs de proximité inductifs permettent de détecter tout objet métallique qui se trouve à proximité de la tête de détection. Tout objet non-métallique ne sera pas détecté.



Fig. 3.6 : Capteur de proximité inductif.

Un capteur inductif se compose essentiellement d'un oscillateur.

Le champ électromagnétique est créé à l'avant de la face sensible.

Toute pièce métallique pénétrant dans ce champ devient le siège de courants de Foucault qui provoquent l'arrêt des oscillations.

C'est donc l'arrêt des oscillations qui est détecté.

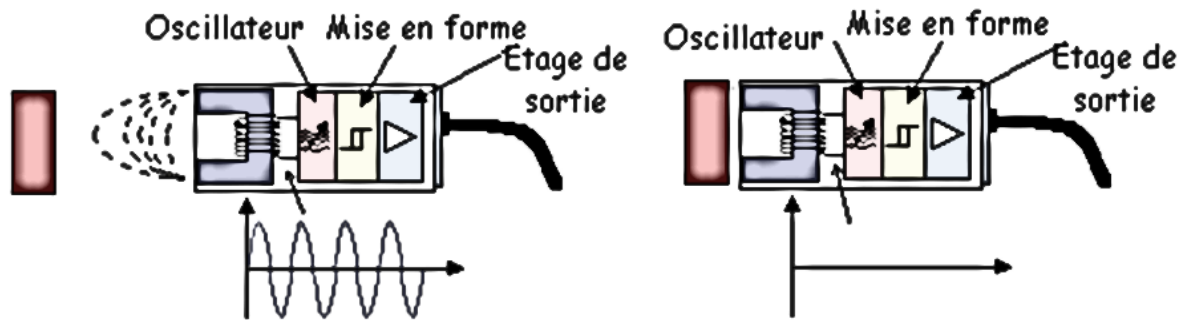


Fig. 3.7 : Fonctionnement d'un détecteur inductif.

Les caractéristiques principales des capteurs de proximité inductifs sont :

- Robustes et fiables.
- Ne détectent que les métaux.
- Les portées disponibles sur le marché vont de 25 micromètres à 6 centimètres.
- Ces détecteurs utilisent des principes basés sur le magnétisme, ils sont sensibles aux champs magnétiques. Il faut donc éviter de les utiliser dans un environnement où des champs magnétiques sont présents.
- Ils ne peuvent détecter que des matériaux métalliques

3.3.2 Capteur de proximité capacitif

Un capteur capacitif permet de détecter la présence d'un objet métallique ou non. Lorsqu'un objet de nature quelconque ($\epsilon_r > 2$) se trouve en regard de la face sensible du détecteur, ceci se traduit par une variation du couplage capacitif ($C1$). Cette variation de capacité ($C1 > C0$) provoque le démarrage de l'oscillateur. Après mise en forme, un signal de sortie est délivré.

A. Principe de fonctionnement

Les détecteurs de proximité capacitifs sont conçus pour fonctionner par création d'un champ électrostatique et par détection des modifications de ce champ créées par une cible approchant de la face de détection.

Ce type de détecteur est recommandé quand :

- Les distances de détection sont relativement faibles.
- Les conditions de montage nécessitent que le détecteur soit noyable.
- On doit effectuer la détection d'un matériau non conducteur à travers une paroi elle-même non conductrice (exemple : détection de verre à travers un emballage en carton).

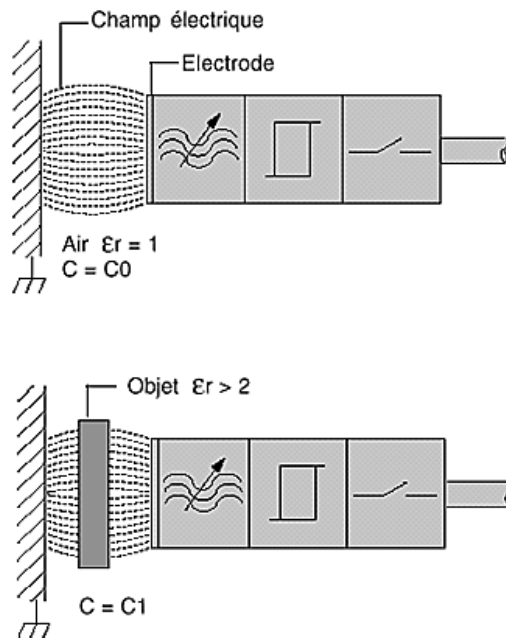


Fig. 3.8 : Capteur capacitif

B. Avantages

- Pas de contact physique avec l'objet détecté : possibilité de détecter des objets fragiles, fraîchement peints
- Pas d'usure, durée de vie indépendante du nombre de manœuvres
- Détecteur statique, pas de pièces en mouvement
- Produit entièrement encapsulé dans la résine (étanche)
- Très bonne tenue à l'environnement industriel (atmosphère polluante)
- Portée nominale 2 à 5 mm
- Détection d'objets de toutes natures, conducteurs ou non conducteurs, tels que : métaux, minerais, bois, plastique, verre, carton, cuir, céramique, fluides, etc...

3.3.3 Capteur de proximité photoélectrique

Un détecteur photoélectrique se compose essentiellement d'un émetteur de lumière (diode électroluminescente) associée à un récepteur sensible à la quantité de lumière reçue (phototransistor) [16].

Une diode électroluminescente est un composant électronique semi-conducteur qui émet de la lumière lorsqu'il est traversé par un courant électrique.

Cette lumière peut être visible ou invisible selon la longueur d'onde d'émission. Il y a détection quand la cible pénètre dans le faisceau lumineux émis par le détecteur et modifie suffisamment la quantité de lumière reçue par le récepteur pour provoquer un changement d'état de la sortie.

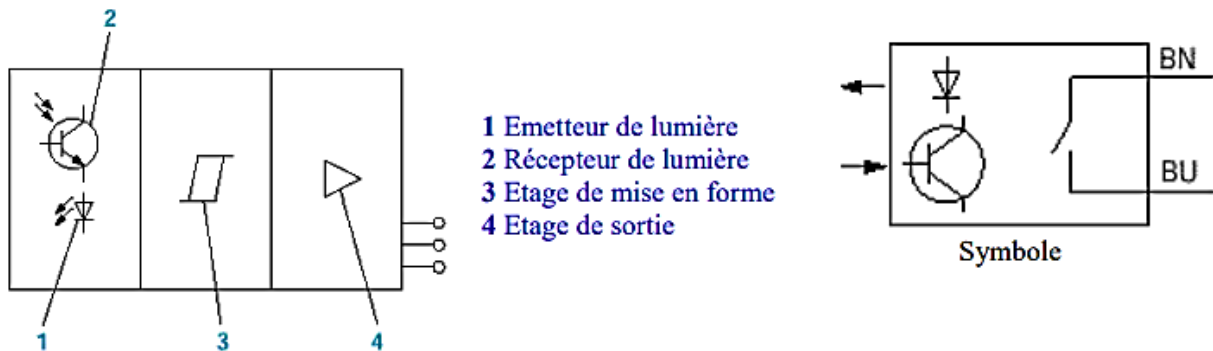


Fig. 3.9 : Composition d'un détecteur photoélectrique.

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

A. Système barrage

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

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

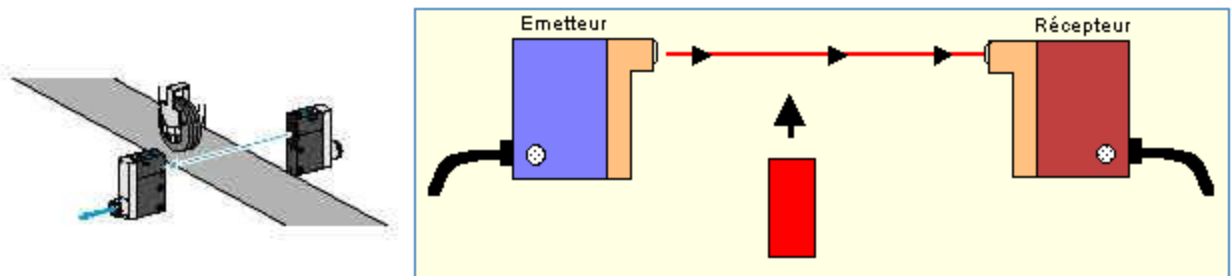


Fig. 3.10 : Système barrage.

B. Système reflex

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

Contrainte : Ne convient pas pour les objets réfléchissants.

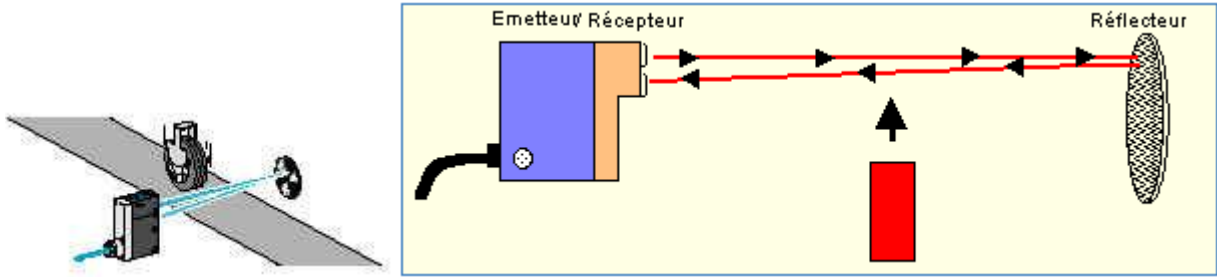


Fig. 3.11 : Système reflex.

C. Système de proximité

Emetteur et récepteur sont dans le même boîtier. L'objet permet le retour du faisceau lumineux. Adapté pour les applications où la détection n'est possible que d'un coté et les objets transparents et translucides.

Contrainte : les portées dépendent de la capacité des objets à réfléchir la lumière et à éviter dans les environnements pollués.

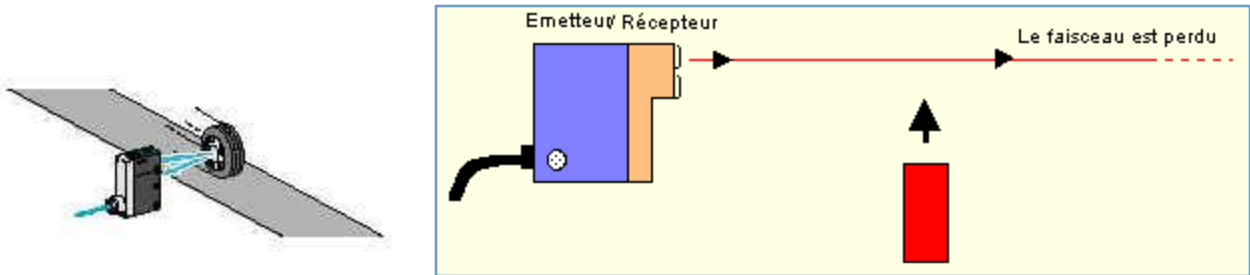


Fig. 3.12 : système de proximité.

Avantages

- Pas de contact physique avec l'objet détecté : possibilité de détecter des objets fragiles, fraîchement peints
- Pas d'usure, durée de vie indépendante du nombre de manoeuvres
- Détecteur statique, pas de pièces en mouvement
- Produit entièrement encapsulé dans la résine (étanche)
- Très bonne tenue à l'environnement industriel (atmosphère polluante)

Détections

toute matière

Portée de détection

- Jusqu'à 50mm pour les plus courants
- Dépend de l'épaisseur des objets

Utilisations

- Contrôle de remplissage de liquides dans des flacons ou des cuves
- Détection de la présence de matériaux pulvérulents dans des trémies

Les domaines d'utilisation les plus significatifs se rencontrent dans l'agroalimentaire, la chimie, la transformation des matières plastiques, le bois, les matériaux de construction.

3.3.4 Capteur de proximité ultrasonique

L'ultrason est une onde acoustique dont la fréquence est trop élevée pour être audible par l'être humain. Il peut dans certaines applications, remplacer avantageusement le capteur inductif ou capacitif et il peut détecter des objets jusqu'à plusieurs mètres. L'émetteur et le récepteur sont situés dans le même boîtier. L'émetteur envoie un train d'ondes qui va se réfléchir sur l'objet à détecter et ensuite revenir à la source. Le temps mis pour parcourir un aller-retour permet de déterminer la distance de l'objet par rapport à la source. Plus l'objet sera loin plus il faudra longtemps pour que le signal revienne.

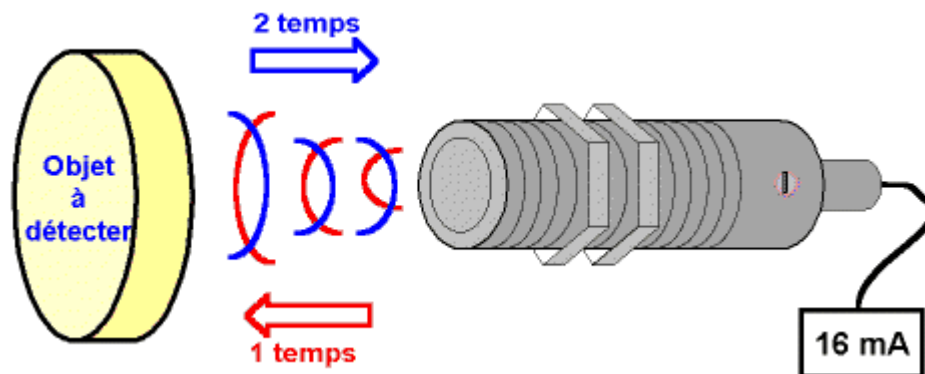


Fig. 3.13 : Capteur à ultrasons

Caractéristiques

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

3.4 Capteur de position

Un capteur de position est un détecteur connu sous le nom d'interrupteur de fin de course. C'est un dispositif qui permet de recueillir des informations sur la position d'un objet dans un espace de référence.

Ces informations peuvent être obtenues :

- Par contact direct avec l'objet, grâce à un contacteur constitué de divers éléments tels que : galet, tige souple, bille, roue codeuse ;
- À distance, par des capteurs magnétiques (interrupteur reed) ou des barrières lumineuses ; l'information donnée par ce type de capteur est de type tout ou rien (0 ou 1) et peut être électrique, optique ou pneumatique.



Fig. 3.14 : capteur de position.

3.5 Les codeurs

3.5.1 Généralités

Les codeurs optiques sont des capteurs rotatifs montés sur l'axe d'un élément en rotation. Ils convertissent un mouvement angulaire en un signal numérique, proportionnel à la position de l'axe. Ce signal peut ensuite être exploité pour déterminer la position, la vitesse ou encore le déplacement angulaire.

On distingue principalement deux grandes familles de codeurs :

- Codeurs incrémentaux : ils délivrent une suite d'impulsions binaires (0 ou 1) en fonction de la rotation. Ces impulsions peuvent être comptées pour mesurer un déplacement ou une vitesse. Le comptage peut se faire soit à chaque changement d'état (logique combinatoire), soit à chaque transition du signal (logique séquentielle). Cependant, la position absolue n'est connue qu'après un point de référence (souvent appelé "zéro").
- Codeurs absolus : ils fournissent un code unique à chaque position angulaire. Ainsi, la position exacte est connue à tout moment, même après une coupure d'alimentation. Ces codeurs sont particulièrement adaptés pour les systèmes nécessitant une précision immédiate sans besoin de réinitialisation.

Dans les deux cas, les codeurs sont généralement constitués d'un disque tournant perforé ou gravé, associé à un système d'émission et de réception lumineuse. Le principe repose sur le passage ou l'interruption d'un faisceau lumineux à travers des zones transparentes du disque. Leur fonctionnement n'est pas limité en nombre de tours, ce qui facilite également la mesure de vitesses de rotation.

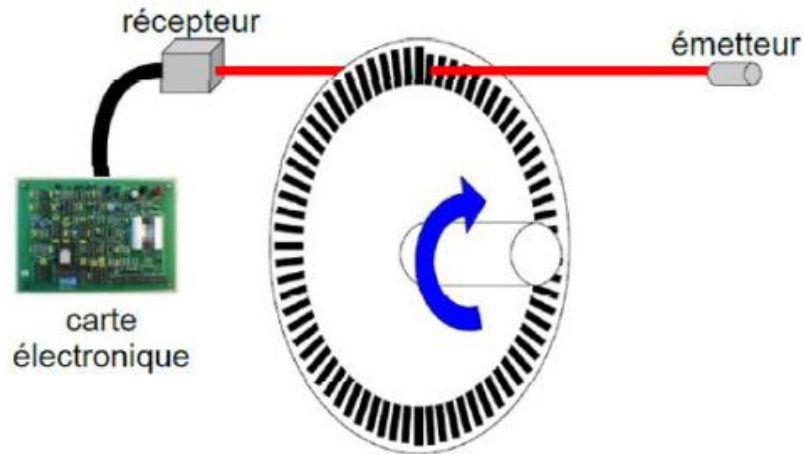


Fig. 3.15 : codeurs optiques.

3.5.2 Codeur incrémental

A. Codeur à une piste

Un codeur à une seule piste comporte un disque avec N fentes régulièrement espacées. Chaque passage d'une fente génère un signal binaire (0 ou 1), correspondant à un "top".

- Si on ne lit que les états logiques (0 ou 1), on obtient N tops par tour.
- Si on lit aussi les transitions (fronts montants et descendants), on peut obtenir $2N$ tops par tour.

Limites :

- Ce type de codeur ne permet pas de déterminer le sens de rotation.
- Une remise à zéro appelée POM (Prise d'Origine Machine) est nécessaire à chaque démarrage, en utilisant une fente unique servant de référence d'origine.

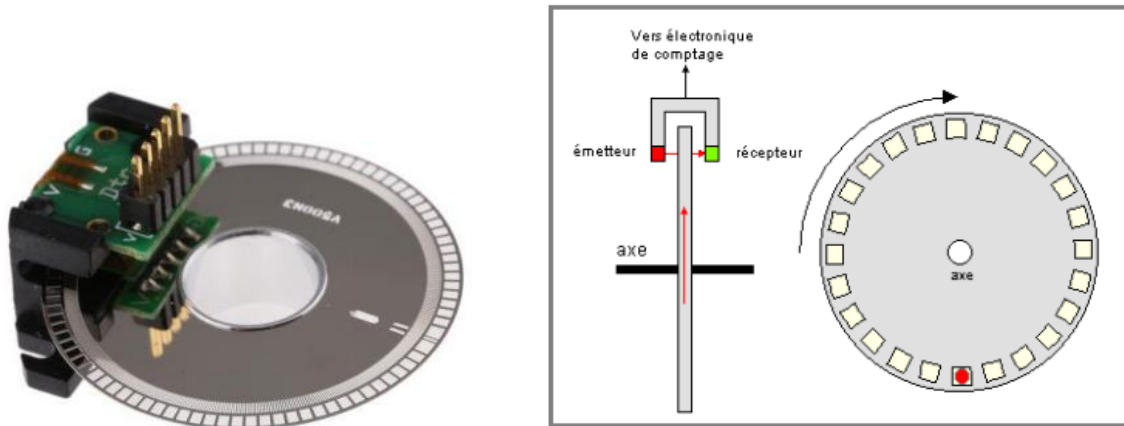


Fig. 3.16 : Codeur à une piste.

B. Codeur à deux pistes

Une seconde piste est ajoutée au disque, décalée d'une demi-période par rapport à la première. Cela génère deux signaux déphasés lors de la rotation.

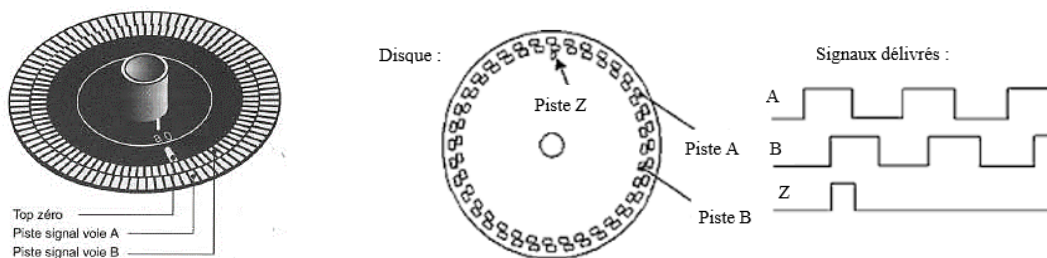


Fig. 3.17 : Codeur à deux pistes.

On obtient alors :

- $2N$ impulsions par tour si l'on lit uniquement les niveaux logiques
- $4N$ impulsions par tour si l'on lit tous les fronts (montants et descendants)
- Le sens de rotation peut aussi être déterminé selon l'ordre d'apparition des fronts sur les deux pistes

Grâce à la deuxième piste, le codeur ne renvoie pas le même type de signal en fonction de son sens de rotation. S'il va dans un sens, A et B sont déphasés de 90° alors que s'il tourne dans l'autre sens, A et B sont déphasés de -90° ce qui donne le résultat suivant :

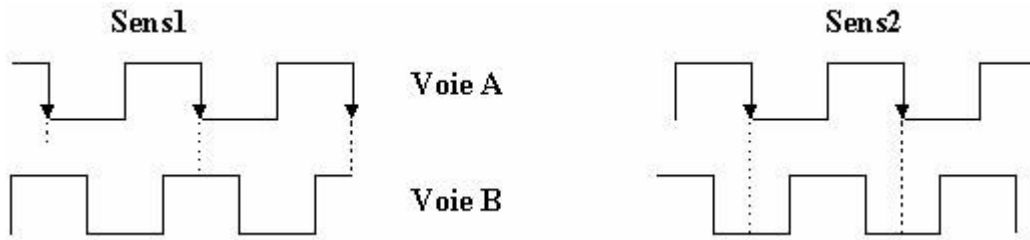


Fig. 3.18 : Détermination du sens de rotation.

3.5.3 Codeur absolu

Le codeur absolu est basé sur un disque perforé à n pistes concentriques, chacune étant lue indépendamment par un capteur optique. Chaque piste fournit un bit d'information, et l'ensemble des n capteurs restitue un code numérique indiquant la position angulaire de l'axe. Ce code peut être transmis en parallèle ou en série selon le type de codeur.

La valeur binaire obtenue représente un nombre compris entre 0 et $2^n - 1$, ce qui donne 2^n positions distinctes.

Par exemple, un codeur à 10 bits permet de distinguer 1024 positions, avec une précision angulaire de $360^\circ / 1024 \approx 0,35^\circ$.

Pour éviter les erreurs de lecture lors du passage d'une position à une autre, le disque est généralement codé en code Gray, un système où un seul bit change à chaque transition. Ce code est ensuite converti en binaire via un transcodage interne, afin d'obtenir la valeur entière correspondant à la position réelle du disque.

Avantages : - A chaque instant, et dès l'alimentation du système, on sait où l'on est

Inconvénients : - Ce capteur est le plus cher des 3 capteurs abordés dans cette fiche



Fig. 3.19 : Codeur absolu.

Il existe des codeurs absolus simple tour ou multi tours.

- Le codeur absolu simple tour, décrit précédemment, donne la position absolue dans chaque tour.
- Le codeur absolu multi tours

- **Codeur multi tours**

On peut dans certains codeurs avoir un second disque qui permet de mesurer le nombre de tours réalisés. Pour cela, on ajoute un réducteur de rapport k et un second disque possédant m pistes. Il est alors possible de mesurer $T = 2^m$ tours, chaque tour étant codé sur $P = 2^n$ positions.

A chaque tour d'un disque principal, il faut donc que le disque secondaire tourne de $\Delta\theta = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{2^m}$ radians.

Le rapport de réduction k est alors choisi tel que :

$$k = \frac{\Delta\theta}{2\pi} = \frac{2\pi}{2^m} = \frac{1}{2^m}$$

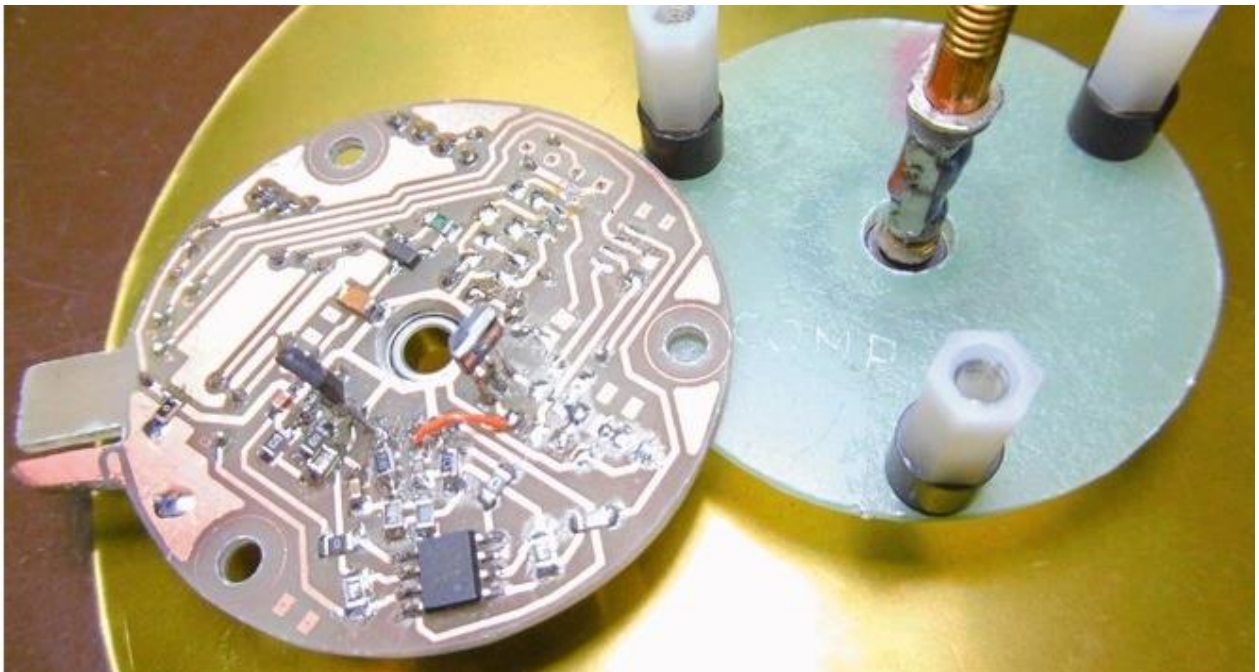


Fig. 3.20 : Codeur magnétique absolu multi tours.

3.5.4 Comparaison des deux concepts : codeur incrémental et codeur absolu

Codeur incrémental	Codeur absolu
Avantages	
<p>Le codeur incrémental est de conception simple (son disque ne comporte que deux pistes) donc plus fiable et moins onéreux qu'un codeur absolu.</p>	<p>Il est insensible aux coupures du réseau : la position du mobile est directement contenue dans le code envoyé en parallèle au système de traitement. L'information de position est donc disponible dès la mise sous tension. Si le système de traitement « saute » une information de position délivrée par le codeur, la position réelle du mobile ne sera pas perdue car elle restera valide à la lecture suivante.</p>
Inconvénients	
<p>Il est sensible aux coupures du réseau : chaque coupure du courant peut faire perdre la position réelle du mobile à l'unité de traitement. Il faudra alors procéder à la réinitialisation du système automatisé. Il est sensible aux parasites en ligne, un parasite peut être compté par le système de traitement comme une impulsion délivrée par le codeur. Les fréquences des signaux A et B étant généralement élevées, il faudra vérifier que le système de traitement est assez rapide pour prendre en compte tous les incréments (impulsions) délivrés par le codeur. Le non comptage d'une impulsion induit une erreur de position qui ne peut être corrigée que par la lecture du « top zéro ».</p>	<p>Il est de conception électrique et mécanique plus complexe aussi son coût sera plus élevé qu'un codeur incrémental. Les informations de position sont délivrées « en parallèle » ; son utilisation mobilisera donc un nombre important d'entrées du système de traitement</p>

3.6 Conclusion

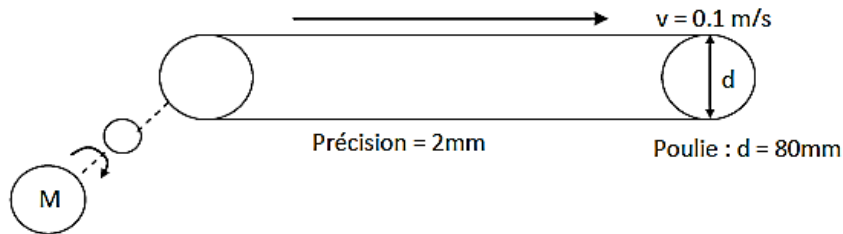
Dans ce chapitre, nous avons étudié les capteurs de déplacement, de proximité et de position à travers plusieurs technologies : capteurs résistifs, inductifs, capacitifs, photoélectriques et ultrasoniques. Nous avons également abordé les capteurs de position tels que les codeurs, en distinguant les versions incrémentales et absolues, ainsi que leurs avantages respectifs. Cette diversité illustre l'importance de bien choisir le capteur adapté selon la nature de la mesure, en tenant compte des performances recherchées et des contraintes du système.

3.7 Exercices corrigés

Exercice 01

Soit le système illustré ci-dessus d'un moteur entrainant un convoyeur.

1. Calculer la résolution du codeur et la résolution angulaire ?
2. Calculer la fréquence ?



Réponse

1. Le codeur fait 1 tour lorsque le tambour fait 1 tour ;

Le déplacement correspondant est $\pi \cdot d = 251.2 \text{ mm}$ qui est le périmètre du tambour.

La précision correspond toujours à 1 pt du codeur.

$$1 \text{ pt} \rightarrow 2 \text{ mm}$$

$$X \text{ pts} \rightarrow 251.2 \text{ mm}$$

Donc il faut

$X = 125.6 \text{ pts}$ pour 1 tour de codeur soit une résolution de $X = 126 \text{ pts/tr}$ 126.

2. Résolution angulaire (à la sortie, par compte)

$$\Delta\theta = \frac{360^\circ}{N} = \frac{360^\circ}{125.66} \approx 2.86^\circ$$

3- La fréquence de fonctionnement (en Hz = pts/s) dépend de la vitesse de déplacement $V = 100 \text{ mm/s}$.

$$126 \text{ pts} \rightarrow 1 \text{ tr}$$

$$Y \text{ pts} \rightarrow 100 \text{ mm}$$

On trouve $Y = 50 \text{ pts}$. Donc la fréquence est $50 \text{ pts/s} = 50 \text{ Hz}$ 50 pts/s .

Exercice 0 2

On souhaite mesurer un déplacement angulaire avec une résolution d'au moins 1° .

1. Quelles sont les différentes techniques utilisées ?
2. Donnez les avantages et les inconvénients de chacune d'elles.

Réponse

1. Différentes techniques utilisées :

- Potentiomètre angulaire (convertit l'angle en tension).
- Codeur incrémental (fournit des impulsions proportionnelles à l'angle).
- Codeur absolu (donne directement la valeur numérique de l'angle).
- Capteurs magnétiques (effet Hall, magnéto résistifs).

2. Avantages et inconvénients :

Technique	Avantages	Inconvénients
Potentiomètre angulaire	Simple, peu coûteux, facile à utiliser	Usure mécanique, frottements, précision limitée
Codeur optique	Très grande précision, résolution élevée, fiable	Plus cher, sensible à la poussière et vibrations
Capteur magnétique	Compact, robuste, pas d'usure mécanique	Précision limitée par rapport aux codeurs

Chapitre 4 : Capteur de vitesse et d'accélération

4.1 Introduction

La mesure de la vitesse et de l'accélération joue un rôle fondamental dans de nombreuses applications industrielles, automobiles et scientifiques. Que ce soit pour contrôler un moteur, stabiliser un véhicule ou analyser un mouvement, il est essentiel de capter avec précision ces grandeurs dynamiques.

La vitesse représente le taux de variation de la position d'un objet dans le temps. Elle peut être linéaire (en m/s) lorsqu'elle décrit un déplacement en ligne droite, ou angulaire (en rad/s) lorsqu'elle concerne la rotation d'un corps autour d'un axe. Quant à l'accélération, elle traduit la variation de la vitesse au cours du temps, indiquant ainsi si un objet ralentit, accélère ou change de direction.

Pour obtenir ces mesures avec précision, plusieurs types de capteurs de vitesse et d'accélération sont utilisés, parmi lesquels les tachymètres et accéléromètres. Ces capteurs permettent d'améliorer le contrôle et la performance des systèmes mécaniques et électroniques, garantissant ainsi sécurité et efficacité dans divers domaines.

4.2 Capteurs de vitesse

Les capteurs de vitesse portent également le nom plus industriel de tachymètres. Le type de déplacement est soit rectiligne, soit angulaire ; la sortie est analogique ou numérique.

4.2.1 Mesure de la vitesse

La mesure de vitesse est nécessaire dans les asservissements de vitesse de machines tournantes. Elle peut être obtenue via un capteur de déplacement, puisque la dérivée de la position "x" correspond à la vitesse :

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt}$$

Donc, si un capteur de position est disponible, on peut y avoir recours.

4.2.2 Tachymètres linéaires à fil

Ce type de capteur se présente sous la forme d'un boîtier muni, à son extrémité, d'un fil ou d'un câble que l'on fixe à l'objet dont on veut mesurer la vitesse. Lorsque l'objet se déplace, le câble s'enroule sur un tambour à l'intérieur du boîtier, maintenu sous tension par un ressort de rappel.

La rotation du tambour entraîne une génératrice tachymétrique, qui produit un signal électrique proportionnel à sa vitesse. Un signal de sortie est un signal analogique. Bien que la

mesure brute soit une vitesse angulaire, celle-ci est directement liée à la vitesse linéaire de l'objet par la relation :

$$v = \omega \times r$$

où :

- v est la vitesse linéaire du câble (m/s),
- ω est la vitesse angulaire du tambour (rad/s),
- r est le rayon du tambour (m).

Ainsi, ce capteur permet de mesurer la vitesse linéaire en exploitant une conversion mécanique entre un déplacement rectiligne et une rotation



Fig. 4.1: Tachymètres de vitesse linéaire.

Ce genre de tachymètre permet des déplacements de l'ordre de 12 mètres maximum. La limite est la longueur du fil qui relie l'objet au tachymètre linéaire. Pour que tout aille pour le mieux au niveau du mécanisme, on limite l'accélération à moins de 100 g. Il faut aussi respecter les limites de vitesse de ce capteur. La précision de ces capteurs est de l'ordre de ± 0.25 % E.M [15].

4.2.3 Tachymètre à impulsions

Le tachymètre électronique, basé sur un codeur incrémental, fonctionne en comptant les impulsions électriques par unité de temps, ce qui permet de déduire la vitesse de rotation. Ce type de capteur fournit une sortie numérique, généralement sous forme de signaux carrés, permettant un traitement facile par un microcontrôleur ou un automate.

Dans ce système, un capteur inductif est installé perpendiculairement à une roue dentée en métal magnétique, qui tourne à la même vitesse que l'arbre du compresseur du moteur dont on veut mesurer la vitesse de rotation. À chaque passage d'une dent, suivi d'un creux, une variation du flux magnétique est générée. Cette variation induit une impulsion électrique dans la bobine du capteur.

$$N = \frac{f}{n} \times 60$$

$$\omega = \frac{2\pi f}{n}$$

Où :

- N est la vitesse de rotation en tr/min (tours par minute),
- f est la fréquence des impulsions en Hz (impulsions par seconde),
- n est le nombre de dents de la roue dentée.
- ω est la vitesse angulaire en rad/s.

Ainsi, grâce à une sortie numérique, ce capteur permet de mesurer la vitesse de rotation et de la convertir en vitesse angulaire avec une grande précision, facilitant son utilisation dans des systèmes de contrôle et d'automatisation.

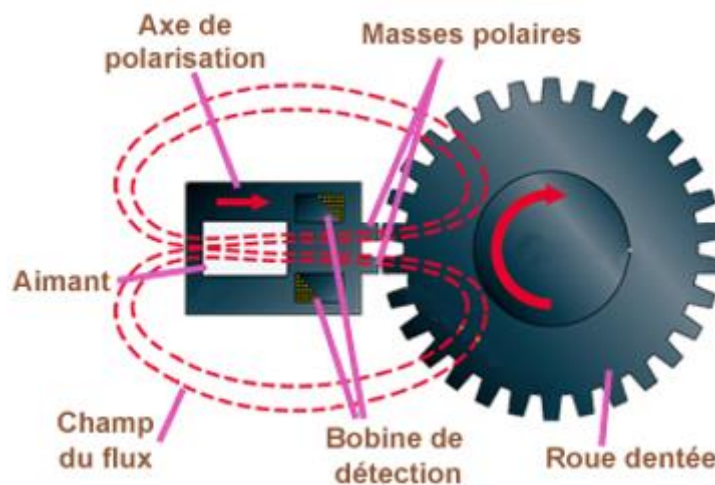


Fig. 4.2: Schéma d'un système de mesure de vitesse.

Le signal est ensuite converti en tension par un convertisseur dans un boîtier électronique, et la lecture se fait en pourcentage d'un régime de référence défini par le constructeur.

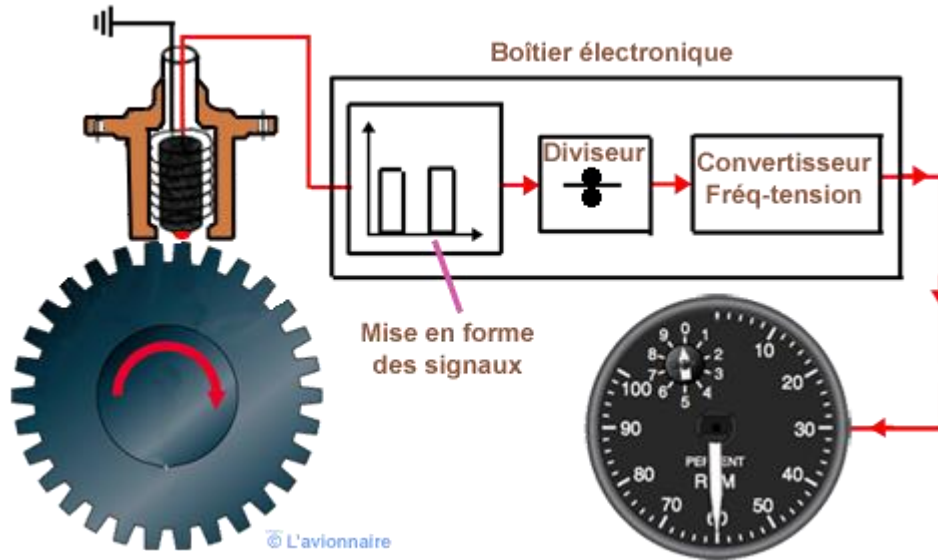


Fig. 4.3 : Schéma d'un système de mesure de vitesse avec affichage de vitesse.

4.2.4 Génératrices tachymétriques à courant continu

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

$$E = k.N$$

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

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



Fig. 4.4 : Tachymètre à courant continu.

Caractéristiques :

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

4.2.5 Génératrice tachymétrique à courant alternatif

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

- L'amplitude du signal prélevé sur la machine après redressement et filtrage.
- La fréquence des signaux prélevés sur la machine.

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

Caractéristiques :

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

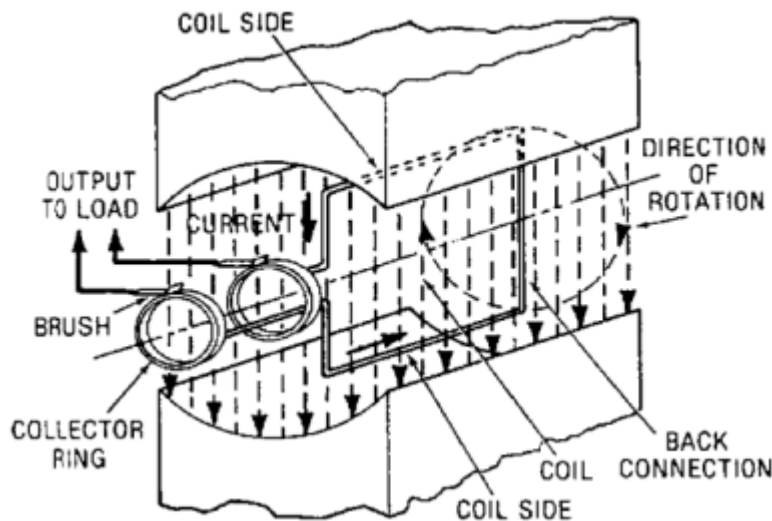


Fig. 4.5 : Génératrice tachymétrique à courant alternatif.

4.3 Capteurs d'accélération

4.3.1 La mesure d'accélération

L'accélération est une mesure utile en industrie pour vérifier l'amplitude et la fréquence de vibration sur des machines. Entre autres, un accéléromètre peut être utilisé pour faire de la maintenance préventive de roulement à bille. En mesurant les vibrations il détectera une détérioration des roulements, avant que ceux-ci aient un bris majeur.

L'accélération peut être déduite des mesures d'un capteur de vitesse. L'accélération est la dérivée de la vitesse :

$$\alpha = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt}$$

Toutefois, les capteurs de vitesse ayant souvent des signaux bruités, cela rend cette approche risquée. Et, pas question de faire une double dérivée de la position, la mesure résultante serait inexploitable.

La mesure d'accélération utilise trois technologies de capteurs différentes :

- Accéléromètres piézoélectriques ;
- Accéléromètres piézorésistifs;
- Accéléromètres asservis.

Ces trois technologies peuvent couvrir les trois principaux champs d'application pour ces capteurs :

- Mesure d'accélération : En régime continu, amplitudes d'accélération faibles, fréquences inférieures à 100 Hz;
- Mesure de vibration : En régime pseudo-continu, amplitudes d'accélération moyennes, fréquence jusqu'à 10 kHz;
- Mesure de choc : Phénomènes transitoires, amplitudes d'accélération élevées, fréquence jusqu'à 100 kHz.

Le corps d'épreuve est le même dans tous les capteurs d'accélération et on le nomme une masse sismique. Lorsque le capteur est soumis à une accélération a , l'inertie de la masse sismique m résiste à

son mouvement avec une force $F = ma$. Il faut donc mesurer l'amplitude de la force F pour déduire l'accélération. Cela sera fait par l'élément de transduction.

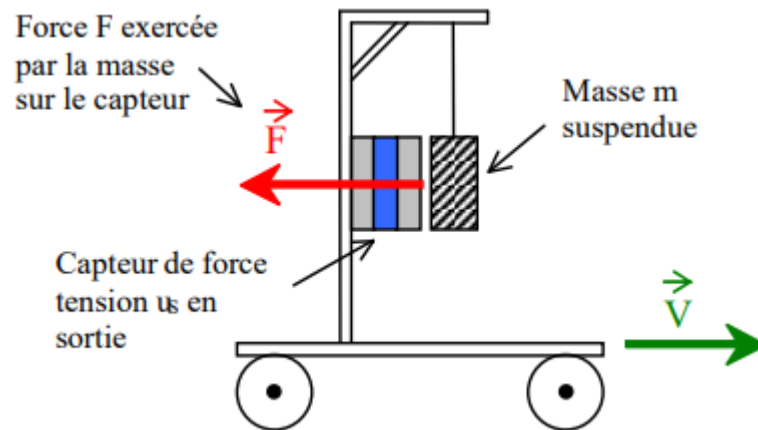


Fig. 4.6 : Mesure de l'accélération via la force exercée.

L'augmentation de vitesse V du véhicule donne une accélération α qui induit une force F exercée par la masse sur le capteur. On a donc :

$$F = m \cdot \alpha \text{ mais } u_s = 2k \cdot F$$

Donc $u_s = 2k \cdot m \cdot \alpha$

4.3.2 Accéléromètres piézoélectriques

L'accéléromètre piézoélectrique utilise comme élément de transduction un cristal piézoélectrique.

Celui-ci est entre la masse sismique et le boîtier du capteur.

Lorsqu'une accélération est présente le cristal est soumis à une force de compression (ou de tension).



Fig. 4.7 : Accéléromètres piézoélectriques.

Certains cristaux diélectriques, comme le quartz, ont des charges électriques qui apparaissent lorsqu'ils sont soumis à des contraintes mécaniques. L'approche de mesure utilisée sera abordée plus tard. C'est cette même approche qui est utilisée.

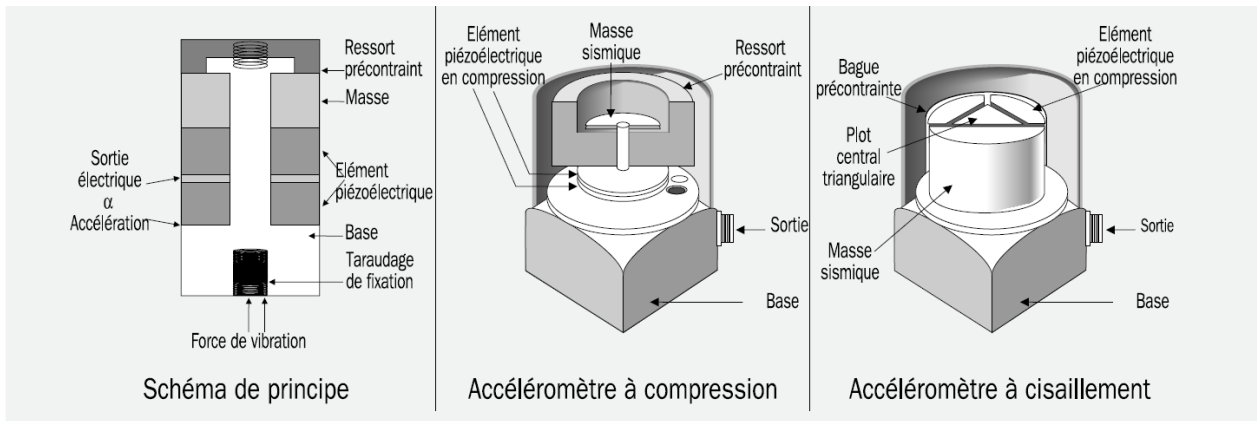


Fig. 4.8 : Schéma de principe de l'accéléromètre piézoélectrique [17].

La construction par compression est la plus courante et présente l'avantage d'avoir une sensibilité et une fréquence de résonance élevée.

La construction par cisaillement permet de réaliser des capteurs miniatures et très légers et moins sensible aux contraintes de base et bruits acoustiques

Les capteurs piézoélectriques permettent d'effectuer des mesures à haute température et possèdent une échelle de mesure pouvant s'étendre de 5g à 100g avec une large gamme de fréquences (0,3 Hz à 40 kHz).

Toutefois, étant donné la taille du capteur (comme le montre le crayon), la masse sismique est très petite et les forces générées sont de très petites amplitudes. Un amplificateur de charge de très bonne qualité est nécessaire.

La mesure statique est impossible avec ces capteurs. Ils n'ont pas besoin d'être alimentés et ils n'ont pas de pièces mobiles. L'absence de pièces mobiles permet l'utilisation de ces capteurs pour la mesure de chocs et la bande passante est de 54 kHz.

Bilan :

- La gamme d'utilisation en température est de -273°C à +800°C.
- La plage d'accélération est dans l'ordre de 0 à 100 g, avec la mesure de chocs dont l'amplitude est inférieure à 100 000 g.

4.3.3 Accéléromètres piézorésistifs

Un accéléromètre piézorésistif fonctionne avec une jauge de contrainte qui sert d'élément de transduction.

Le corps d'épreuve est constitué de la masse sismique et d'un élément déformable (Figure ci-dessous).

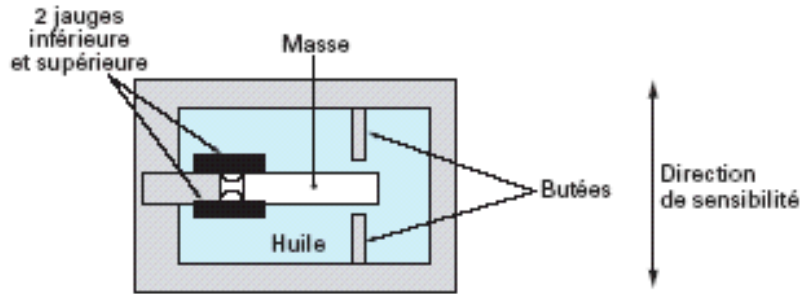


Fig. 4.9 : Schéma de principe d'un accéléromètre piézorésistif.

L'effet principalement utilisé dans la jauge est l'effet piézorésistif. Cet effet est décrit par la relation mathématique suivante :

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = C \frac{\Delta V}{V} = C(1 - 2\nu) \frac{\Delta l}{l}$$

La variation de résistivité de la jauge par rapport à sa valeur nominale est égale à une certaine constante multipliant l'allongement unitaire $\frac{\Delta l}{l}$. Dans l'équation, on retrouve La constante de Bridgman C (qui est environ 1 pour les métaux et 100 pour les semi-conducteurs) et le coefficient de Poisson (ν) (qui est d'environ 0,3 pour les métaux). Tout comme les accéléromètres piézoélectriques, les accéléromètres piézorésistifs n'ont pas de pièces mobiles. Ils sont toutefois beaucoup plus sensibles, ils ont une sensibilité dans la plage 0,02 mV/g à 50 mV/g. Et, ils permettent des mesures statiques. Bilan : La gamme d'utilisation en température est limitée de -50°C à +120°C. La plage d'accélération est dans l'ordre de ± 1 g à $\pm 50\ 000$ g, avec la une bande passante allant jusqu'à 180 kHz.

4.3.4 Accéléromètres asservis

La mesure d'accélération peut aussi faite avec un système de mesure utilisant le principe de mesure par compensation via l'accéléromètre asservi (figure ci-dessous).

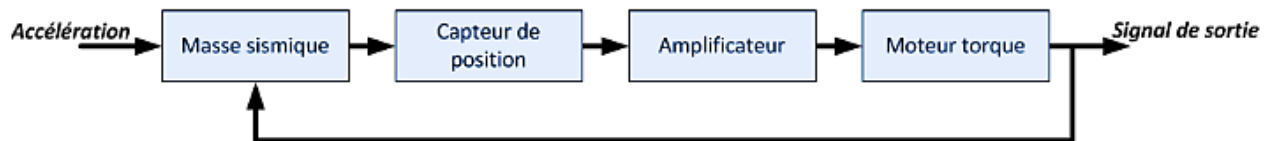


Fig. 4.10 : Mesure d'accélération par accéléromètre asservi.



Fig. 4.11 : Capteur d'accélération SHRBONE.

C'est en asservissant la position de la masse sismique que l'on mesure l'accélération (Figure ci-dessus). Lorsqu'une accélération se produit sur ce système, la masse sismique par son inertie génère une force que le moteur couple doit compenser pour éviter que la masse bouge. La commande envoyée au moteur couple par un amplificateur est le signal de sortie de cet accélérateur. Plus l'accélération est forte, plus le couple appliqué par le moteur doit être grand pour compenser. Donc, plus le signal de sortie de l'amplificateur est grand. Il est proportionnel à l'amplitude de l'accélération. Les mesures statiques sont possibles et ces types de capteurs sont extrêmement sensibles (250 mV/g). Ces capteurs sont très encombrants, car volumineux. Bilan : La gamme d'utilisation en température est limitée de -50°C à $+100^{\circ}\text{C}$. La plage d'accélération est dans l'ordre de $\pm 1 \text{ g}$ à $\pm 50 \text{ g}$, avec une bande passante allant jusqu'à 300Hz.

4.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté les différentes techniques de mesure de la vitesse et de l'accélération, en mettant en évidence les principes des tachymètres (linéaires, à impulsions, génératrices à courant continu et alternatif) ainsi que leurs spécificités d'utilisation. Il a également détaillé les principaux types d'accéléromètres (piézoélectriques, piézorésistifs et asservis), en soulignant leurs avantages et limites. L'ensemble montre que le choix d'un capteur dépend non seulement de la nature de la grandeur à mesurer (vitesse ou accélération), mais aussi des contraintes de précision, de rapidité et de robustesse exigées par l'application.

4.5 Exercices corrigés

Exercice 01

Un disque de 60 encoches est utilisé dans un tachymètre optique. Le capteur délivre 300 impulsions en 1 seconde.

1. Quelle est la vitesse de rotation de l'arbre en tr/min ?
2. Quelle est la résolution angulaire du capteur en degrés ?

Réponse

1. Nombre de tours par seconde : $N = \frac{300}{60} = 5 \text{ tr/s}$

En tr/min : $N = 5 \times 60 = 300 \text{ tr/min}$

2. Résolution angulaire :

$$\Delta\theta = \frac{360^\circ}{60} = 6^\circ$$

Exercice 02

Une génératrice tachymétrique fournit une tension de 10 V lorsque la vitesse est de 1000 tr/min.

1. Déterminer la constante de proportionnalité K.
2. Quelle tension délivre le capteur à 1500 tr/min ?

Réponse

1. $k = \frac{10}{1000} 0.01 \text{ V/ (tr/min)}$

2. à 1500 tr/min : $U = K.N = 0.01 \times 1500 = 15 \text{ V}$

Exercice 03

Un accéléromètre piézoélectrique a une sensibilité de 50 mV/g. On applique une accélération de 20 m/s^2 .

(Donnée : $1g=9,81 \text{ m/s}^2$ $1g = 9,81 \text{ \ , m/s}^2$ $1g=9,81\text{m/s}^2$)

1. Convertir l'accélération en g.
2. Déterminer la tension de sortie.

Réponse

1. en g : $\alpha = \frac{20}{9,81} \approx 2.04 \text{ g}$

2. tension de sortie : $U = 50 \times 2.04 \approx 102 \text{ mV}$

Chapitre 5 : Capteurs de force et de pression

5.1 Introduction

La mesure de force est obtenue en mesurant l'un des effets de cette grandeur physique sur un corps d'épreuve. L'effet principal d'une force sur un corps d'épreuve, c'est sa déformation. La mesure de la déformation causée par une force permet de connaître l'amplitude de cette dernière.

Les capteurs de force reposent sur la déformation de divers corps d'épreuve. Différentes technologies existent pour mesurer cette déformation :

- La transduction résistive; (Potentiomètre (présenté précédemment), Jauge extensiométrique (ou jauge de contraintes));
- La transduction piézoélectrique;
- La transduction capacitive;
- La transduction inductive;
- La transduction électromagnétique (magnétostriktion).

5.2 capteurs de déformation

La déformation désigne, l'allongement relatif d'un corps soumis à une contrainte

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Si la contrainte utilisée est inférieure à la limite élastique du matériau, cette déformation est réversible (déformation élastique). Au-delà de cette limite, la déformation est irréversible (déformation plastique).

Elles résultent des charges (masses) appliquées sur le solide et varient en fonction de leur intensité. Elles sont mises en évidence par la variation des dimensions du solide, et peuvent être élastiques ou plastiques.

L'élasticité caractérise l'aptitude qu'à un matériau à reprendre sa forme et ses dimensions initiales après avoir été déformé (un ressort chargé normalement a un comportement élastique). Un matériau qui ne reprend pas sa forme et ses dimensions initiales après avoir été déformé est dit plastique (la pâte à modeler a un comportement plastique) [18,19].

La contrainte (σ) et la déformation (ε) sont proportionnelles

Loi de Hooke : $\sigma = E \cdot \varepsilon$

- σ est la contrainte = Force / surface (Pascal)
- ε est la déformation sans unité $\varepsilon = \frac{(L-L_0)}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$
- E est le module élastique, appelé module de Young. En raison de ses valeurs très élevées, il est généralement exprimé en gigapascals (GPa) (voir Tableau 5.1). E varie entre 0,1 et $1,5 \times 10^{11}$ Pa.

Propriétés élastiques :

La loi est linéaire : loi de Hooke $\sigma = E \cdot \varepsilon$

Si E est élevée, le matériau est rigide

Si E est faible, alors le matériau est souple

Matériaux E(GPa)	Matériaux E(GPa)
Diamant	1000
Céramique	550
Métaux	70-420
Béton	20
Elastomère	0.003

Tableau 5.1: le module élastique de matériaux

5.3 Capteurs de force

Un capteur de force est un transducteur qui transforme une force physique (un poids, une tension, une compression ou une pression) en un signal électrique proportionnel qui peut être mesuré, converti et analysé.

Lorsque la force appliquée au capteur augmente, le signal électrique change proportionnellement. Bien qu'il existe une variété de capteurs, les capteur force à jauges de contrainte sont les plus utilisés.

La technologie de capteur à jauge de contrainte facilite la conception de capteurs adaptés à tous types d'applications

Le capteur de force est devenu un élément essentiel dans de nombreuses industries comme l'industrie automobile, la fabrication de haute précision, la robotique, l'aérospatiale et la défense, automatisation industrielle, l'industrie médicale pharmaceutique où une mesure de force fiable et de haute précision est primordiale.

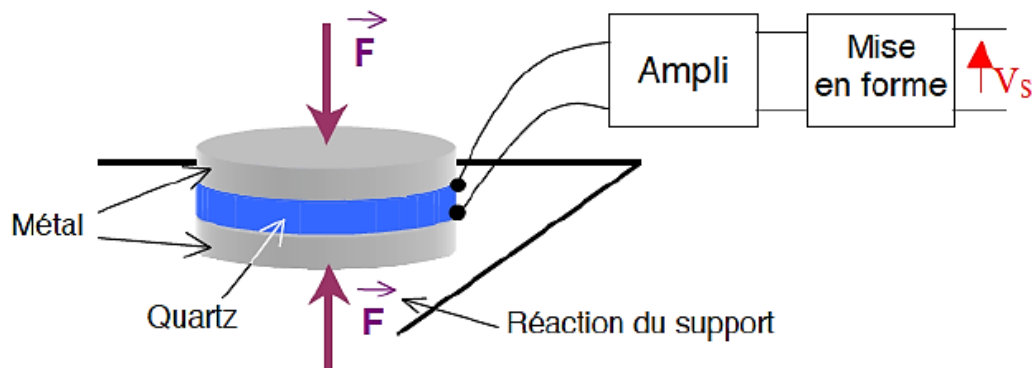


Fig. 5.1 : Schéma d'un capteur de force.

La tension VS de sortie sera proportionnelle à la force F :

$V_s = k(F_1 + F_2) = 2k.F$; k est une constante, en précisant que F_1 et F_2 sont les forces appliquées sur les deux jauges en opposition dans le pont de Wheatstone, et que par symétrie du capteur $F_1 = F_2 = F$.

5.3.1 Capteur de force à jauge de contrainte

En amont nous devons comprendre la physique et la science des matériaux sous-jacentes au principe de fonctionnement du capteur de force, qui est la jauge de contrainte. La jauge de contrainte à feuille métallique est un capteur dont la résistance électrique varie en fonction la déformation appliquée [20].

En d'autres termes, la force (la pression, la tension, la compression, le couple, le poids, etc...) est convertit en une variation de résistance électrique, qui peut ensuite être mesuré.

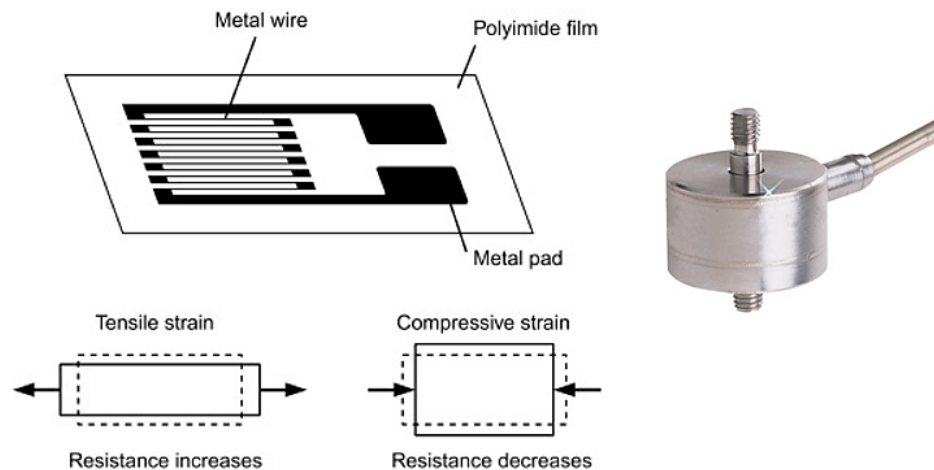


Fig. 5.2 : Capteur de force à jauge de contrainte

Structurellement, un capteur de force est constitué d'un corps métallique sur lequel des jauges de contrainte sont collés. Le corps du capteur est généralement en aluminium ou en acier inoxydable, ce qui donne au capteur deux caractéristiques importantes :

1. fournit la robustesse pour résister à des charges élevées et
2. a l'élasticité pour se déformer au minimum et revenir à sa forme d'origine lorsque la force est supprimé. Lorsqu'une force (tension ou compression) est appliquée, le corps métallique agit comme un «ressort» et est légèrement déformé, et à moins qu'il ne soit surchargé, il reprend sa forme d'origine.

Lorsque le corps se déforme, la jauge de contrainte change également de forme et par conséquent de résistance électrique, ce qui crée une variation de tension différentielle à travers le circuit de pont de Wheatstone.

Ainsi, le changement de tension est proportionnel à la force physique appliquée, qui peut être calculée via la sortie de tension du circuit du capteur de force.

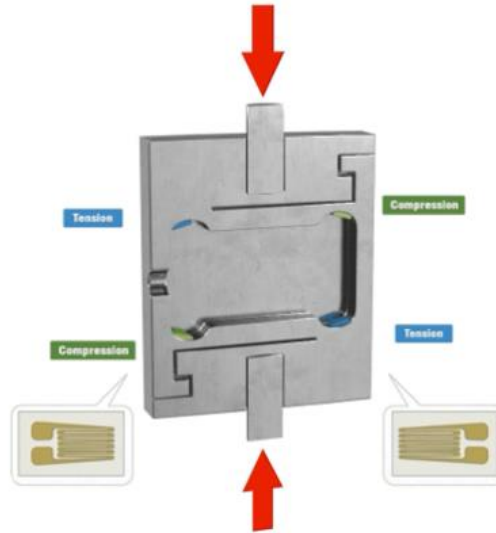


Fig. 5.3 : la cellule de force appliquée au corps du capteur.

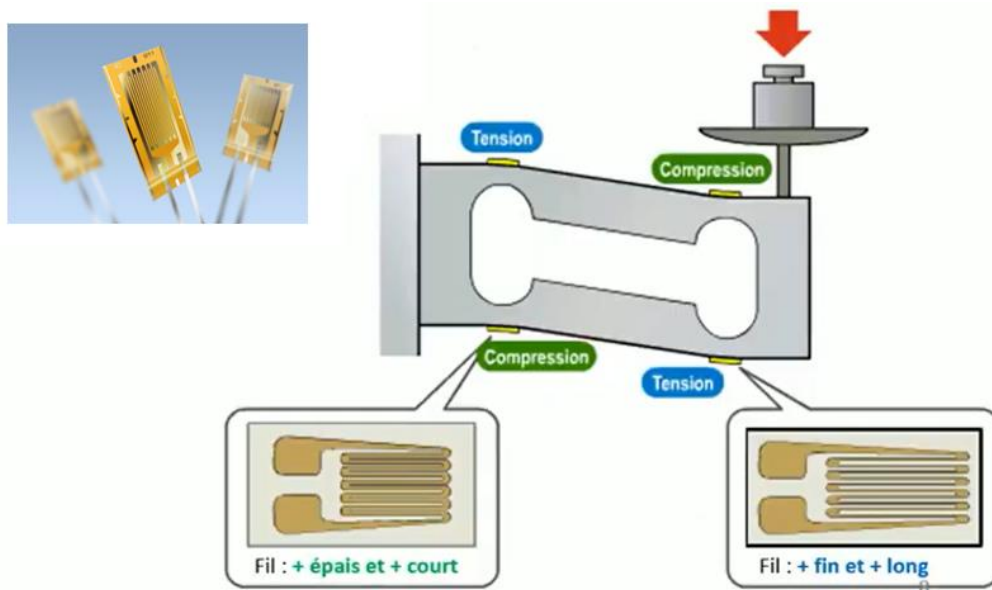


Fig. 5.4 : Balance équipée d'une jauge de contrainte.

La sensibilité et la précision de la cellule de force sont définies comme la plus petite quantité de force pouvant être appliquée au corps du capteur nécessaire pour provoquer une variation linéaire et répétable de la tension de sortie. Plus la précision du capteur est élevée, mieux c'est, car elle peut capturer de manière cohérente des variations de force très sensibles.

Dans des applications telles que l'automatisation d'usine de haute précision, la robotique chirurgicale, l'aérospatiale, la linéarité des capteurs de force est primordiale. Certains de nos capteurs de force type galette présentent une non-linéarité de $\pm 0,1\%$ (de la sortie nominale) et une non répétabilité de $\pm 0,05\%$ de la pleine échelle.

5.4 Capteurs de pression

5.4.1 Définition de la pression

La pression est une grandeur dérivée du système international. Elle est définie comme le quotient d'une force par une surface. La pression s'exerce perpendiculairement à la surface considérée.

$$P_{Pa} = \frac{F_N}{S_{m^2}}$$

- **La pression absolue :** C'est la pression réelle, dont on tient compte dans les calculs sur les gaz.
La pression atmosphérique ou pression barométrique : La pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer, à 15 °C, est d'environ 1013 mbar. Elle peut varier, de ± 25 mbar, avec la pluie ou le beau temps. Elle est fonction de l'altitude (hydrostatique).
- **La pression relative :** C'est la différence de pression par rapport à la pression atmosphérique. Elle est le plus souvent utilisée, car la plupart des capteurs, sont soumis à la pression atmosphérique. Pour mesurer une pression absolue, il faut faire un vide poussé dans une chambre dite de référence.
- **Pression différentielle :** C'est une différence entre deux pressions, dont l'une sert de référence. Une pression différentielle peut prendre une valeur négative.
- **Le vide :** Il correspond théoriquement à une pression absolue nulle. Il ne peut être atteint, ni dépassé. Quand on s'en approche, on parle alors de vide poussé.
- **Pression de service ou pression dans la conduite :** C'est la force par unité de surface exercée sur une surface par un fluide s'écoulant parallèlement à la paroi d'une conduite.

5.4.2 Principes de fonctionnement

Le capteur de pression constitue la base de la mesure de pression. Il est composé d'un corps d'épreuve, un élément mécanique (solide ou liquide) soumis à des variations sous l'effet de la pression.

Les capteurs piézoélectriques, par exemple, sont construits à partir de cristaux tel que le quartz qui se polarisent électriquement lorsqu'il est soumis à des contraintes mécaniques. Le principe d'un capteur capacitif repose, quant à lui, sur le fait qu'une différence de pression entraîne une variation d'épaisseur entre les couches conductrices d'un condensateur et, donc, une variation de la capacité de la cellule.

Il existe trois grands types de capteurs de pression : les capteurs de pression absolue, relative ou différentielle [1. 21].

Définition

Lorsqu'un corps (gaz, liquide ou solide) exerce une force F sur une paroi S (surface); on peut définir la pression P exercée par ce corps avec la relation ci-dessous :

$$P = \frac{F}{S} \quad (\text{Pascal})$$

Avec les unités :

$$1 \text{ Pascal} = \frac{1 \text{ Newton}}{1 \text{ m}^2} \quad \text{ou} \quad 1 \text{ Pa} = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ m}^2}$$

On rappelle que

$$1 \text{ kg} = 9.81 \text{ N} \quad \text{et} \quad 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 100\,000 \text{ N/m}^2 \approx 10\,000 \text{ kg/m}^2 \approx 1 \text{ kg/cm}^2$$

Le capteur de force est inséré dans la paroi d'une enceinte où règne une pression P. Une face du capteur est soumise à la force F (pression P) et l'autre face est soumise à la force F0 (pression extérieure P0).

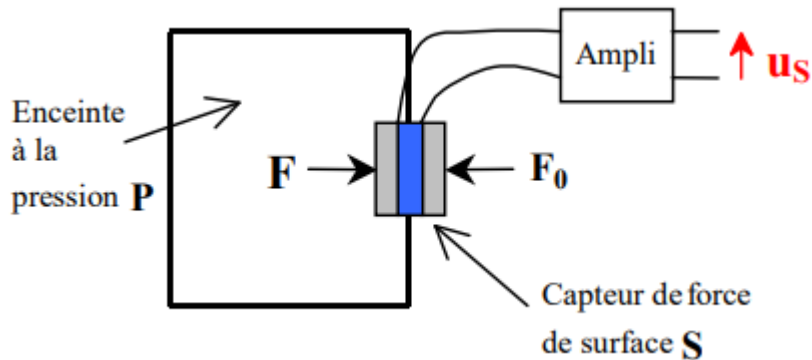


Fig. 5.5 : Capteur de force intégré dans une enceinte sous pression.

On a $F = P \cdot S$; $F_0 = P_0 \cdot S$ et $u_s = k \cdot (F + F_0)$, $k = \text{constante}$.

Donc $u_s = k \cdot S(P + P_0) = k'(P + P_0) \Rightarrow u_s = k'(P + P_0)$.

Il s'agit ici d'un capteur de pression qui mesure la somme de la pression extérieure P_0 et de la pression de l'enceinte P.

5.4.3 Types de capteurs de pression

A. Le capteur de pression absolue

La mesure de pression absolue se fait par rapport à la pression du vide. Les capteurs de pression absolue donnent une valeur à partir d'une référence de vide scellé dans le capteur. Ils sont essentiellement utilisés en météorologie afin de déterminer la pression de l'air. Dans l'industrie agroalimentaire, ils servent à assurer un niveau de vide suffisant dans un emballage, indépendamment de la pression atmosphérique ambiante au moment de la fermeture de l'emballage.

La sonde de pression absolue comporte un seul raccord de pression qui permet à l'air que l'on souhaite évaluer de pénétrer le système [21].



Fig. 5.6 : Capteur de pression absolue.

B. Le capteur de pression relative

Pour la mesure de pression relative, c'est la pression atmosphérique ambiante qui constitue la référence. Les capteurs de pression relative peuvent afficher des pressions positives (ou surpressions) lorsque la pression mesurée est supérieure à la pression atmosphérique ou des pressions négatives (ou dépressions) dans le cas contraire. Pour contrôler la pression des pneus, par exemple, on utilise un capteur de pression relative.

La sonde de pression relative ne comporte, elle aussi, qu'un seul raccord de pression. La pression ambiante, quant à elle, pénètre par l'arrière de la membrane du capteur, par une fente ou par un tube [1,21].



Fig. 5.7 : Capteur de pression relative.

C. Le capteur de pression différentielle

Comme son nom l'indique, le capteur de pression différentielle mesure une différence positive ou négative entre deux pressions, grâce à deux raccords de pression. Il est notamment utilisé en médecine afin de mesurer les échanges respiratoires et en génie climatique afin de contrôler les flux d'air [21].



Fig. 5.8 : Capteur de pression différentielle.

5.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté de manière structurée les capteurs de force et de pression, en partant des capteurs de déformation jusqu'aux capteurs de pression (absolue, relative et différentielle). L'accent a été mis sur les principes physiques (jauges de contrainte, effets piézorésistifs, etc.), les modes de conversion du signal et les caractéristiques métrologiques essentielles (sensibilité, non-linéarité, dérive, bande passante et répétabilité). Les exemples pratiques montrent comment choisir un capteur en fonction des contraintes d'application, plage de mesure, environnement (température, corrosion, vibrations), précision requise et facilité d'intégration électronique.

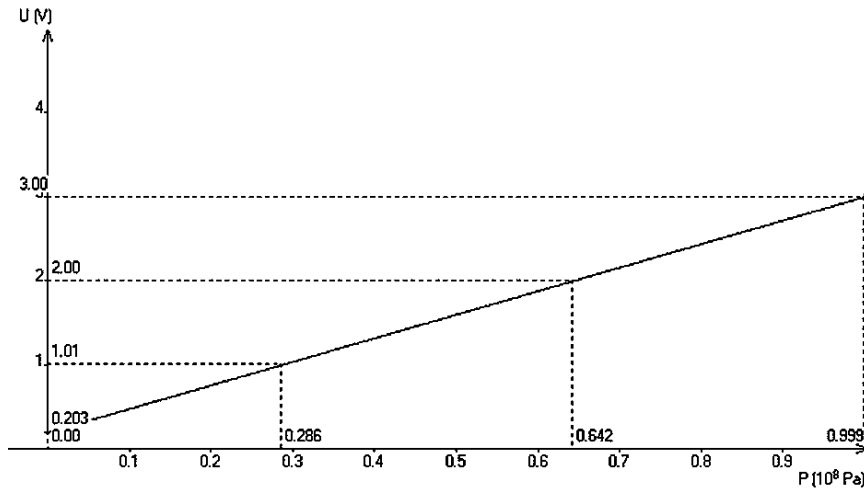
5.6 Exercices corrigés

Exercice 01

On dispose d'un capteur de pression qui se trouve dans une chambre d'injection d'un moteur diesel. On donne sa caractéristique sur la courbe suivante :

1. Quelle est la grandeur physique d'entrée de ce capteur ?
2. Quelle est sa grandeur physique de sortie ?
3. S'agit-il d'un capteur actif ou passif ?
4. Représenter la chaîne de mesure associée à ce capteur.
5. Calculer la sensibilité de ce capteur.
6. La sensibilité de ce capteur est-elle constante ?

7. La caractéristique de ce capteur est-elle linéaire ?



Réponse

1. La grandeur physique d'entrée de ce capteur est la pression (P, exprimée en Pa), puisque ce capteur est destiné à mesurer une pression.
2. D'après la caractéristique de ce capteur, la grandeur physique de sortie est la tension électrique (U, exprimée en V).
3. Il s'agit d'un capteur actif puisque la grandeur de sortie est une tension électrique.
4. Comme tous les capteurs il doit être associé à module électronique de filtrage et amplification puis à un traitement numérique de l'information afin de l'afficher :
5. Pour calculer la sensibilité on se sert de deux points de la droite.

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta P} = \frac{3 - 2}{0.999 - 0.642} = 2.8 \cdot 10^{-8} \text{ V} \cdot \text{Pa}^{-1}$$

6. La caractéristique de ce capteur est une droite. Son coefficient directeur est constant, donc la sensibilité de ce capteur est constante.
7. La caractéristique de ce capteur n'est pas linéaire puisqu'il s'agit d'une droite affine, elle ne passe pas par zéro.

Chapitre 6 : Capteur de débit, niveau de liquide et d'humidité

6.1 Capteur de débit

Des méthodes de mesure du débit précises et uniformes sont requises dans divers domaines, qu'il s'agisse d'effluents industriels, municipaux, agricoles ou autres. En effet, la mesure du débit répond à des objectifs multiples [22].

Il existe deux concepts différents pour le débit, à savoir le débit en volume (en m^3/sec) et le débit en masse (en kg/sec). Lorsque les caractéristiques du fluide sont constantes, le même débitmètre peut être étalonné indifféremment selon l'une ou l'autre de ces définitions. Ce n'est pas le cas si les caractéristiques du fluide sont susceptibles de varier.

6.1.1 Définition de débit

En hydraulique, le débit (Q) est défini comme étant un volume (V) de liquide qui s'écoule à travers une section donnée d'un canal ou d'une conduite par une unité de temps (t) :

$$Q = \frac{V}{t}$$

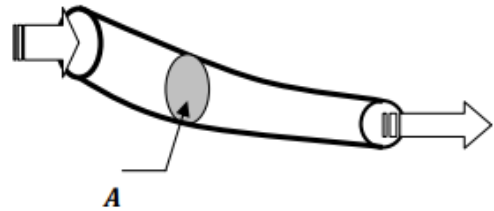
La détermination du débit peut être obtenue à partir de l'équation générale suivante :

$$Q = A \times v$$

Où Q débit (ex. : m^3/s);

v : vitesse de l'écoulement (ex. : m/s);

A : aire de la section mouillée perpendiculaire à l'écoulement (ex. : m^2).



Note : la vitesse de l'écoulement est la distance parcourue par un fluide en écoulement par unité de temps. Elle est exprimée généralement en m/s .

Le débit peut être mesuré dans différents types de conduites, et les méthodes pour effectuer cette mesure varient selon les types de conduites et d'écoulement ainsi que l'importance du débit de l'écoulement.

On distingue deux types de débits : Le **débit massique** et le **débit volumique** qui sont liés par la relation :

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

$$Q_m = \rho \cdot Q_v$$

Avec :

Q_m : débit masse en $[kg/s]$

ρ : masse volumique en $[kg/m^3]$

Q_v : débit volume en $[m^3/s]$

A. Débit Massique $Q_m : Q_m = \rho \cdot v \cdot S$

B. Débit volumique $Q_v : Q_v = v \cdot S$

C. Régimes d'écoulement des fluides

La Viscosité : C'est la résistance d'un fluide à son écoulement uniforme et sans turbulence. En fonction de la viscosité du fluide, la répartition de la vitesse du fluide n'est pas la même sur toute la surface (Fig. 6.1) .

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

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

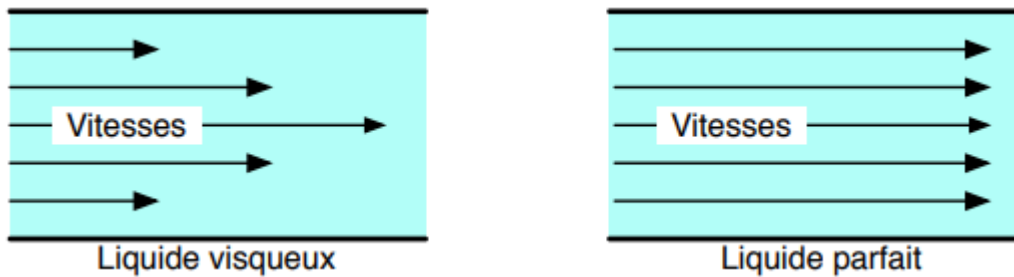


Fig. 6.1 : Influence de la viscosité sur la vitesse du fluide.

Il existe deux régimes d'écoulement pour un liquide :

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

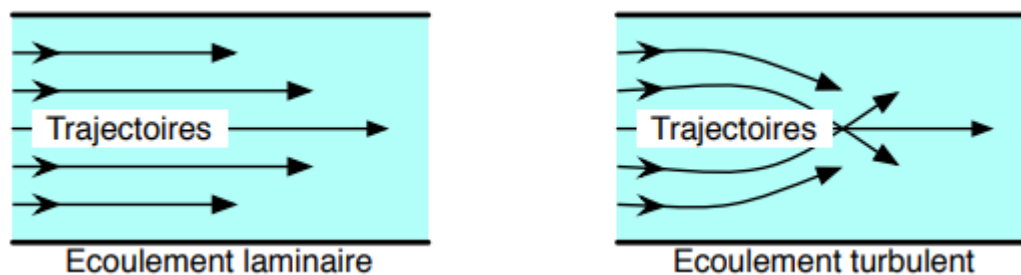


Fig. 6.2 : Ecoulement laminaire ou turbulent.

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

$$Re = \frac{\rho[kg/m^3] \cdot V[m/s] \cdot D[m]}{\mu[kg/m \cdot s]} = \frac{V[m/s] \cdot D[m]}{\nu[m^2/s]}$$

Avec :

ρ : Masse volumique du fluide.

V : La vitesse du fluide.

D : Diamètre de la canalisation

μ : Viscosité dynamique du fluide.

ν : Viscosité cinématique $\nu = \frac{\mu}{\rho}$.

La zone de transition laminaire-turbulent s'étend de $\mathcal{R}_e \approx 2100$ à $\mathcal{R}_e \approx 4\,000$ selon les conditions d'écoulement ; l'écoulement n'est pleinement turbulent qu'au-delà de $\mathcal{R}_e \approx 4\,000$.

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

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

6.1.2 Capteurs de débit volumique

Pour un écoulement laminaire (fig. 2), la connaissance de la vitesse du fluide et de la section de la canalisation suffit pour déterminer le débit du fluide (égalité 3). Lors de la mise en place de ces capteurs, on s'attachera à les placer dans des parties droites de canalisation et à distance respectable (en général plusieurs fois le diamètre de la canalisation) de dispositif générant des pertes de charges importantes (coude, restriction, vannes, etc...).

A. Débitmètre à tube de Pitot

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

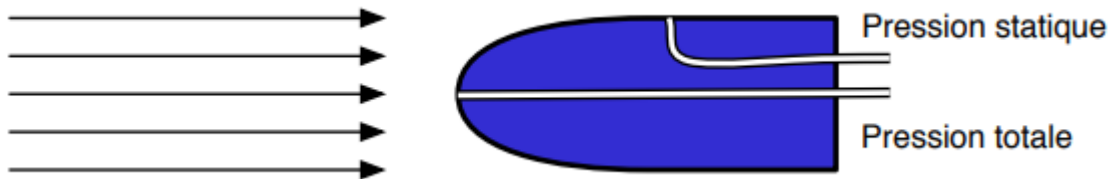


Fig. 6.3 : Tube de Pitot.

Dans un tube de Pitot (Fig. 6.3), la mesure des pressions statique et totale permet de connaître la vitesse du fluide.

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

Débitmètres à organe déprimogène

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

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

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

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

Avec k une constante fonction de l'organe.

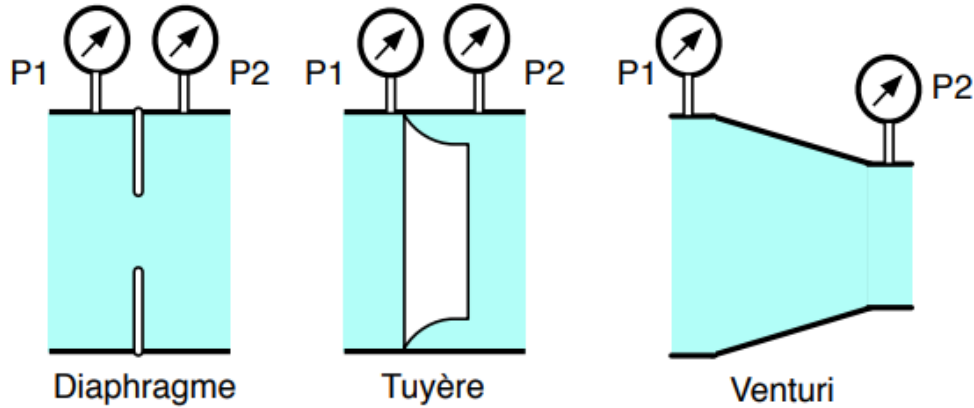


Fig. 6.4 : Les différents organes déprimogènes.

B. Rotamètre

Un rotamètre est constitué d'un flotteur localisé dans une colonne en verre graduée. En l'absence de débit, le flotteur coule au fond de la colonne de verre. La force de gravité agissant sur le flotteur excède la force d'Archimède. La relation entre le débit Q et la surface A, qui est la surface entre la paroi intérieure de la colonne et le flotteur, est exprimée par :

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

Avec :

S_f : La surface du flotteur face au débit.

V_f : Volume du flotteur.

ρ_f : La masse volumique du flotteur



Fig. 6.5 : Rotamètre pour l'air.

Caractéristiques :

- La gamme de mesure va :
 - De 0,5 litre/h à 200 000 litres/h pour les gaz.
 - De 0,2 litre/h à 20 000 litres/h pour les liquides.
- La précision est de 3 à 10% de l'étendue de la mesure.
- La température du fluide peut approcher 400°C
- Sous 25 bars. Le rotamètre introduit des pertes de charge.

6.1.3 Débitmètre à coupelle, à hélice ou à turbine

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

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



Fig. 6.6 : Débitmètre à turbine.

6.1.4 Débitmètre à palette

Le fonctionnement de ce capteur est basé sur l'utilisation d'une palette qui est soumise à la force aérodynamique ou hydrodynamique de l'écoulement et à son poids. La position d'équilibre est mesurée par un montage potentiométrique.



Fig. 6.7 : Débitmètre à palette.

6.1.5 Débitmètre ionique

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

Les courants électriques I_1 et I_2 sont identiques si la vitesse du fluide est nulle. Dans le cas contraire (fluide en mouvement), le système devient asymétrique. La différence des courants $I_2 - I_1$ est proportionnelle à la vitesse V , alors que la somme $I_1 + I_2$ est sensiblement constante (Fig. 6.8).

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

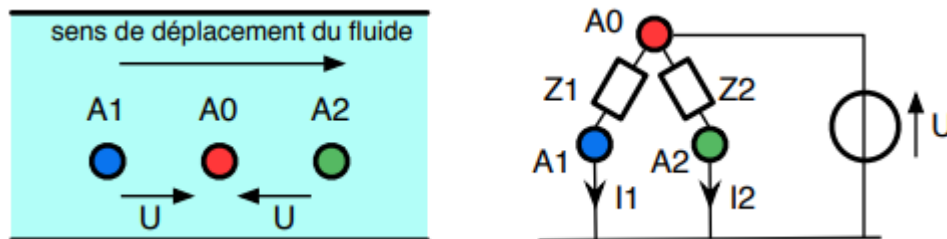


Fig. 6.8 : Schéma de principe et électrique d'un d' débitmètre ionique.

6.1.6 Débitmètres ultrasoniques

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

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

Avec :

C : La vitesse du son dans le fluide

U : La vitesse du fluide.

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

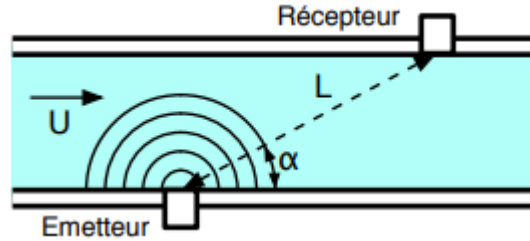


Fig. 6.9 : Débitmètre ultrasonique.

Caractéristiques

- Echelle linéaire et réponse instantanée ;
- Insensible à l'agressivité du fluide.
- Mesure des débits entre $0.1 \text{ m}^3/h$ et $10^5 \text{ m}^3/h$,
- Débits de 0.03 à 30 m/s .
- Précision de l'ordre de 1% .
- Mesure dans des conduites de de quelque mm de diamètre à plusieurs mètres.
- Mesure dans les deux sens.

6.1.7 Capteurs de débit massique

A. Capteur électromagnétique

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

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

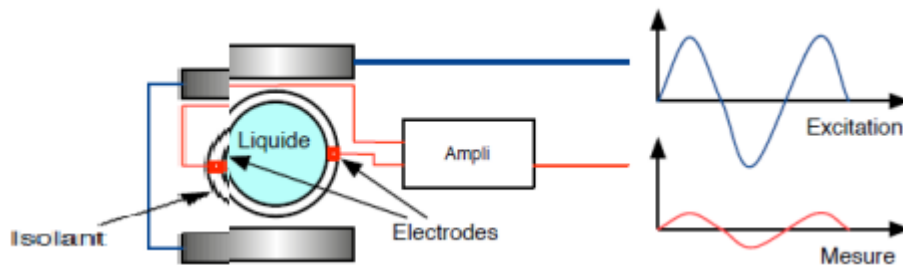


Fig. 6.10 : Capteur électromagnétique.

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

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

B. Capteur thermique

Deux capteurs de température sont placés aux points A et B, de part et d'autre d'un élément chauffant (Fig. 6.11). La différence de température, $T_b - T_a$ est proportionnelle au débit massique.

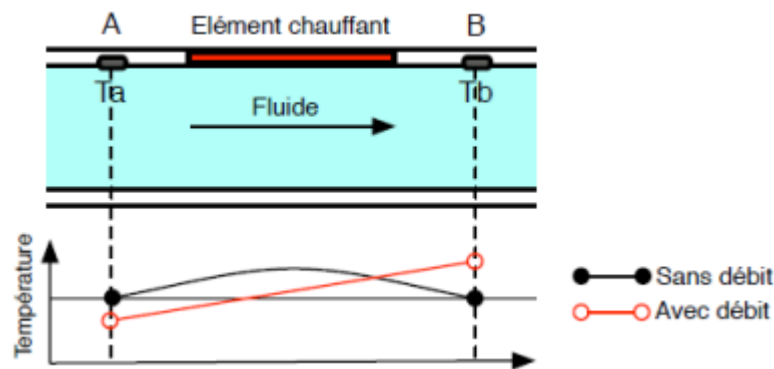


Fig. 6.11 : Capteur thermique

Caractéristiques

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

C. Débitmètre à effet Coriolis

Le capteur une portion de canalisation horizontale en forme de U (Fig. 6.12). Un champ électromagnétique alternatif induit une rotation alternative selon l'axe de la conduite. Le fluide s'écoulant dans le tube est contraint de suivre cette rotation. Il se produit alors un phénomène alternatif de résistance ou d'aide à la rotation, entraînant deux vibrations en amont et en aval du coude. Ces vibrations sont en déphasage, dont l'amplitude est proportionnelle au débit massique du fluide.

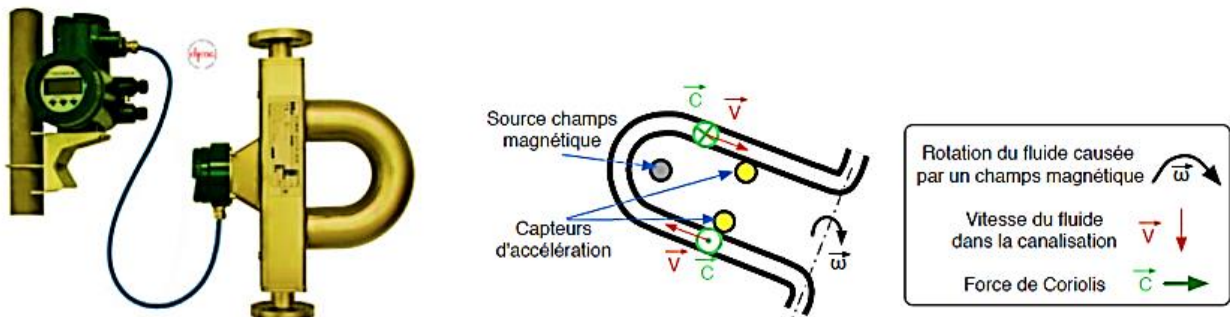


Fig. 6.12 : Capteur à effet Coriolis.

Caractéristiques

- Précision de mesure pour liquide : Débit massique $\pm 0,15\%$, débit volumique : $\pm 0,3\%$.

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

Domaines d'application

Ce type de capteur mesure le débit massique et volumique de fluides très divers :

- Chocolat, lait concentré, sirops ;
- Huiles, graisses, acides, bases ;
- Peintures, vernis, produits pharmaceutiques ;
- Gaz et mélanges gazeux.

6.2 Capteur de niveau de liquide

6.2.1 Introduction

Une mesure fréquemment faite en milieu industriel est la mesure de niveau de matériaux solides et liquides. Les capteurs de niveau peuvent être classifiés selon la méthode de mesure. Cette mesure peut être soit visuelle, à l'aide de tubes en verre soit hydrostatique, basée sur les principes d'Archimède ou sur la pression hydrostatique. D'autres capteurs de niveau utilisent des principes électriques basés sur des variations d'impédance.

6.2.2 Capteurs hydrostatiques

A. Rappel de physique

Pour un liquide homogène donné, la pression relative en fond de réservoir est proportionnelle au niveau de celui-ci. La mesure de cette pression nous informe directement sur le niveau de liquide, mais dépend de la masse volumique du liquide. Dans la figure 1 on a la relation suivante :

$$P(P_a) = \rho(kg/m^3) \times g(m/s^{-2}) \times L(m)$$



Fig. 6.13 : Mesure de niveau.

B. Principe

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

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

C. Flotteur

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

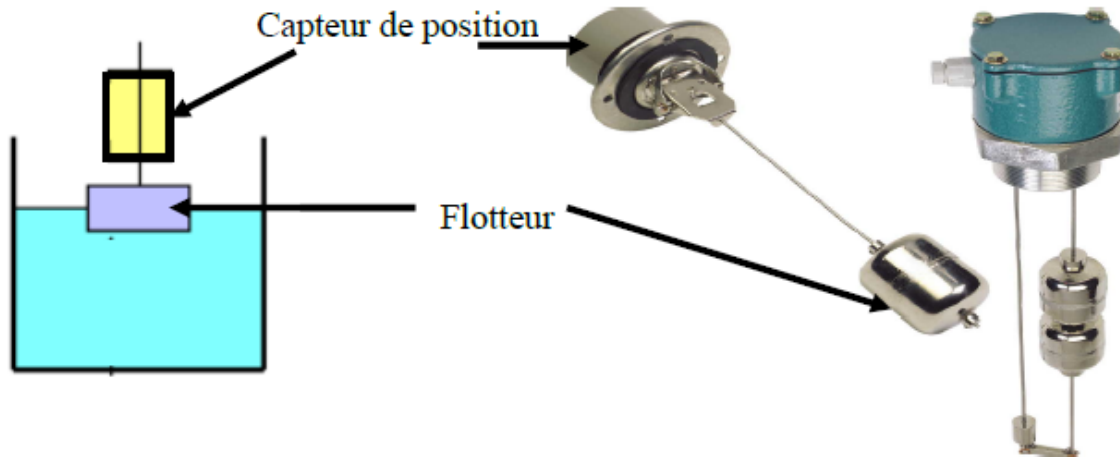


Fig. 6.14 : Mesure de niveau par flotteur.

D. Plongeur

Le plongeur est un cylindre immergé dont la hauteur est au moins égale à la hauteur maximale du liquide dans le réservoir. Il est suspendu à un capteur dynamométrique qui se trouve soumis à une force F, fonction de la hauteur L du liquide :

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

Avec :

P : le poids du plongeur.

S : La section

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

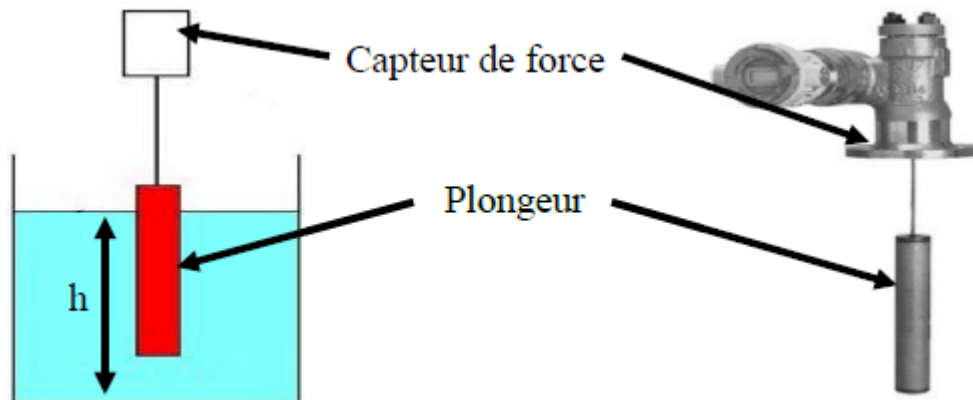


Fig. 6.15 : Mesure de niveau par plongeur.

6.2.3 Mesure de niveau par capteur de pression

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

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

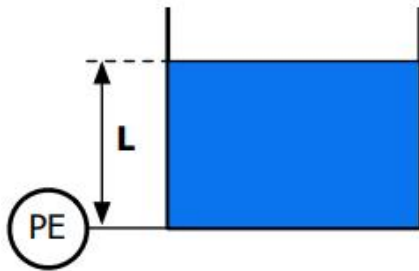


Fig. 6.16 : Mesure de niveau par capteur de pression. **Fig. 6.17 :** Capteur de pression.

6.2.4 Mesure de niveau par bullage

Pour mesurer la pression, on peut utiliser un système à bulle (Figure VI.7). Ce système permet de mesurer la pression au bout de la canne, en régulant le débit qui doit être très faible.

Le système comporte :

- Une canne d'injection ;
- Un manomètre mesurant la pression d'air de bullage ;
- Un contrôleur de débit visuel (dit bulleur) ;
- Un régulateur de débit ;

Le régulateur agit de manière à avoir un débit très faible. Ainsi, en négligeant les pertes de charges, la pression mesurée est la pression en bout de canne. P fournit donc une mesure du niveau L.

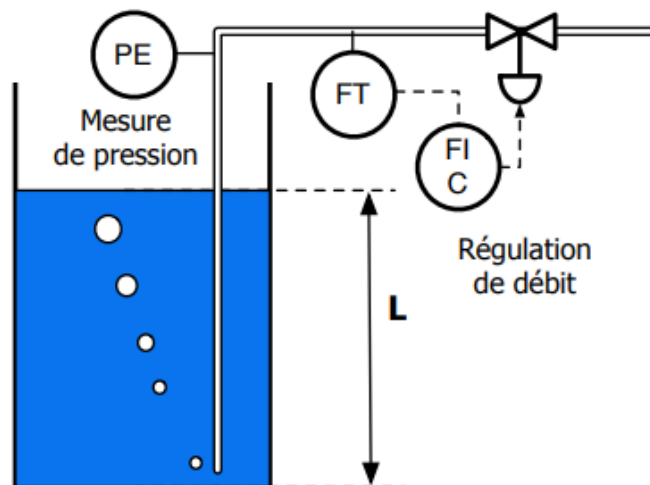


Fig. 6.18 : Mesure de niveau par bullage.

Caractéristiques

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

6.3 Capteur de pression différentielle

Il existe alors deux montages différents. Si l'atmosphère est avec condensation, le montage utilisera une canalisation humide, avec condensation $\Delta P < 0$ (Fig. 9.19). Si l'atmosphère est sans condensation, on utilisera un montage avec une canalisation sèche, ou sans condensation $\Delta P > 0$ (Fig. 6.20).

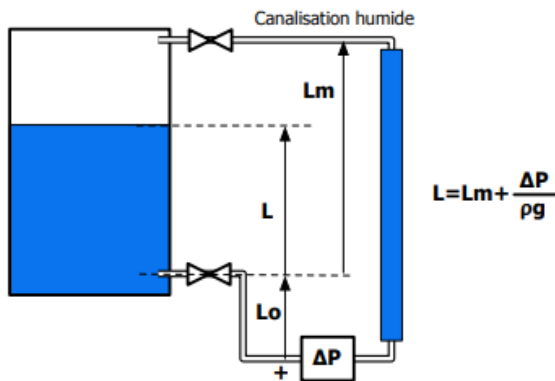


Fig. 6.19 : Réservoir avec condensation $\Delta P < 0$.

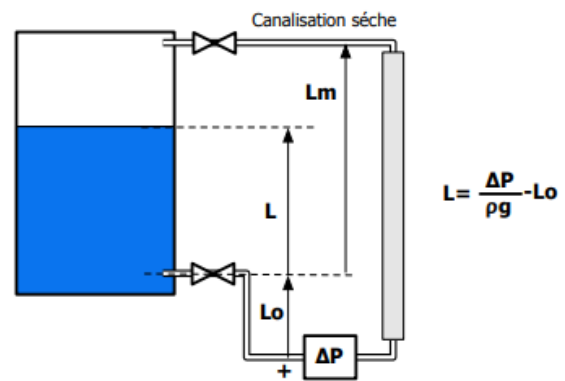


Fig. 6.20 : Réservoir sans condensation $\Delta P > 0$.

6.3.1 Par mesure de masse volumique

La mesure de la différence de pression ($P_1 - P_2$) permet de déterminer la masse volumique du liquide à l'intérieur du réservoir (Fig. 6.21).

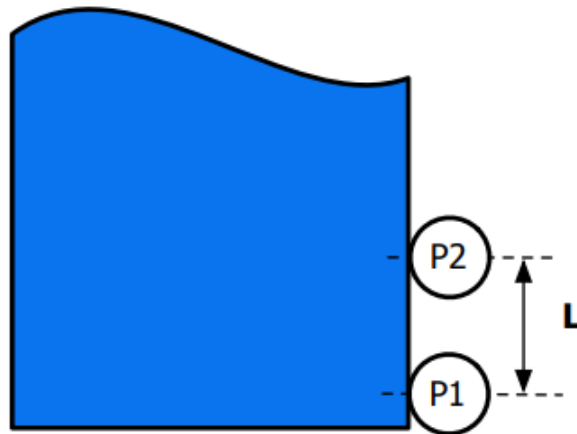


Fig. 6.21 : Mesure de masse volumique.

6.4 Capteurs électriques

6.4.1 Capteurs conductimétriques

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

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

Ce type de capteur, est utilisable uniquement avec des liquides conducteurs, non corrosifs et n'ayant pas en suspension une phase isolante. La pression est comprise entre le vide et 160 bar et la température comprise entre -200°C et 250°C .

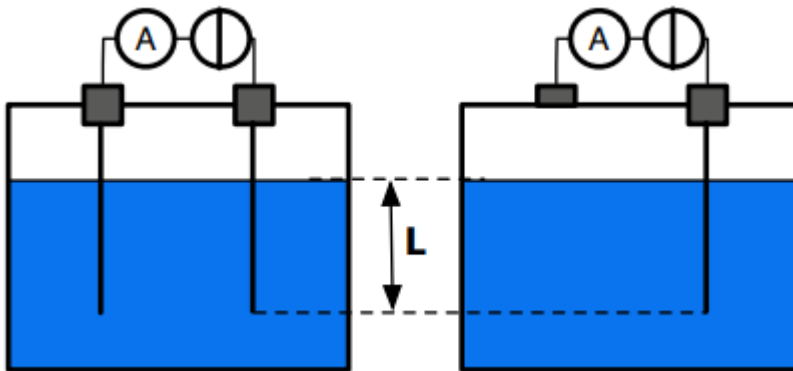


Fig. 6.22 : Principe mesure de niveau par capteur de conductimétrique.



Fig. 6.23 : Capteur de niveau électrique.

6.4.2 Domaine d'utilisation

Il est utilisable uniquement avec des liquides conducteurs (conductance minimale de l'ordre de 50 S), non corrosifs et n'ayant pas en suspension une phase isolante (huile par exemple). La pression est comprise entre le vide et 160 bar et une température comprise entre -200°C et 250°C .

6.4.3 Capteurs capacitifs

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

Caractéristiques :

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

6.4.4 Capteurs acoustiques

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

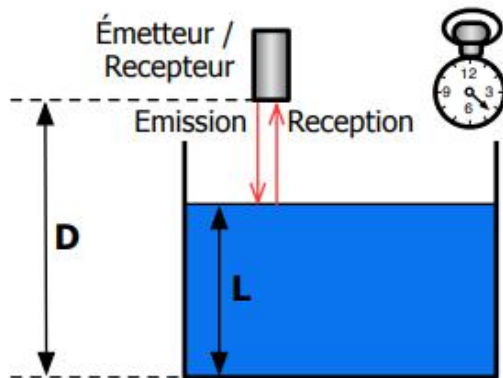


Fig. 6.24 : Principe de mesure par ondes.



Fig. 6.25 : Capteur de niveau acoustique.

Caractéristiques

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

6.4.5 Radar

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

6.4.6 Capteurs de niveau par Gammamétrie (Par absorption de rayonnement gamma)

La source et le détecteur sont placés à l'extérieur, de part et d'autre du réservoir. Ces capteurs sont particulièrement adaptés au cas de liquides très corrosifs ou sous haute pression ou à haute température. La source est un émetteur gamma. Le détecteur est soit une chambre d'ionisation soit un ou plusieurs tubes Geiger-Muller. La mesure est fiable et sans contact.

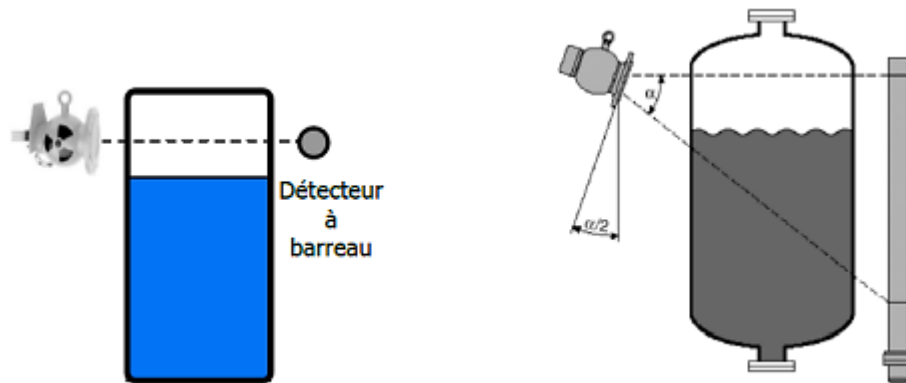


Fig. 6.26 : Principes de mesure de niveau par Gammamétrie.

6.5 Comparaison des différentes méthodes de mesure de niveau

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

Tableau 6.1: Tableau comparatif des différentes technologies de mesure de niveau.

6.6 Les type des capteurs d'humidités

6.6.1 Capteur d'humidité résistive

Le capteur d'humidité résistive c'est un bon moyen de réviser l'acquisition d'une résistance et comment on peut implémenter une table de correspondance dans un microcontrôleur Fig. 6.27.

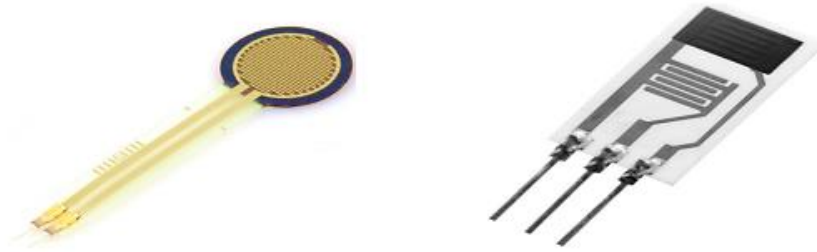


Fig. 6.27 : Capteur d'humidité résistive.

6.6.2 Capteur d'humidité à condensateur (d'humidité capacitif)

Les capteurs d'humidité sont des condensateurs à deux bords. La valeur de la capacité augmente quand des molécules d'eau sont absorbées dans son polymère diélectrique actif diélectrique Fig. 6.28. Les plaques de condensateur consistent en une plaque de base et une plaque de platine perméable à l'eau.



Fig. 6.28 : Capteur d'humidité à condensateur (d'humidité capacitif) [23].

6.6.3 Capteur d'humidité hygrométrie

Appelé aussi humidistance, ce type de composant permet une mesure d'humidité relative Fig 6.29. La plage mesure possible est généralement de 20 % à 80 %, mais certains capteur (bien plus chers) sont toutefois capables de travailler sur une plage de mesure de 10 % à 90 % la précision est de l'ordre de quelques pourcents.



Fig. 6.29 : Capteur d'humidité hygrométrie.

6.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté les capteurs de débit, de niveau et d'humidité, chacun avec ses principes et domaines d'application. Le choix du capteur dépend toujours de la précision recherchée, des conditions d'utilisation et de la fiabilité souhaitée.

6.8 Exercices corrigés

Exercice 01

Calculer la vitesse de l'eau (en m/s) dans une conduite de 80 mm de diamètre si le débit est de $60 \text{ m}^3/\text{h}$

Réponse

$$v = \frac{Q}{A} \text{ avec } A = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$Q = 60 \text{ m}^3/\text{h} = 60/3600 = 0.0166667 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$d^2 = 0.08^2 = 0.0064 \text{ m}^2$$

$$A = \frac{\pi \cdot 0.0064}{4} = 0.005026 \text{ m}^2$$

$$v = \frac{0.0166667}{A} \approx 3.32 \text{ m/s}$$

Exercice 02

Un transmetteur 4 mA – 20 mA indique la pression différentielle d'un débitmètre déprimogène dont les deux portées sont 0 et 100 kPa. La portée maximale correspond à $9 \text{ m}^3/\text{min}$;

1. quel est le débit si le transmetteur indique 12mA ?
2. quel est courant indiqué par le transmetteur si le débit est de $3 \text{ m}^3/\text{min}$?

Réponse

1. $I = 12 \text{ mA}$

$$\Delta P = 100 \cdot \frac{12 - 4}{16} = 50 \text{ kPa}$$

$$Q = 9 \sqrt{\frac{50}{100}} \approx 6.36 \text{ m}^3/\text{min}$$

2. $Q = 3 \text{ m}^3/\text{min}$

$$\Delta P = 100 \cdot \left(\frac{1}{9}\right) \approx 11.111 \text{ kPa}$$

$$I = 4 + 16 \cdot \frac{11.111}{100} \approx 5.78 \text{ mA}$$

Chapitre 7 : Capteurs Optiques

7.1 Introduction

Un capteur optique est un dispositif capable de détecter l'intensité ou la longueur d'onde des photons.

Les capteurs optiques sont les capteurs qui convertissent le signal des ondes lumineuses (de l'ultraviolet à l'infrarouge) en signal électrique.

On les utilise pour détecter un grand nombre de phénomènes :

- l'intensité lumineuse
- la chaleur (capteur pyrométrique) :
- la présence
- la couleur (et donc certains gaz ou produits chimiques)

7.2 Définitions et principes

7.2.1 Définitions

A. Le photon

Un photon est un grain d'énergie de valeur $E = h \cdot \nu$

Où $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ (aussi noté $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) : Constante de Planck et la fréquence de radiation de ce photon. Valeur CODATA 2018 : $h = 6,62607015 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

B. La longueur d'onde

Tout phénomène vibratoire est caractérisé par une longueur d'onde, définie par : $\lambda = \frac{c}{\nu}$

Où $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ est la vitesse de la lumière et est la fréquence de vibration. Chaque couleur est caractérisée par une longueur d'onde.



Fig. 7.1 : Lumière et longueur d'onde.

C. L'effet photoélectrique

Albert EINSTEIN a montré en 1905 que l'impact d'un photon de fréquence sur un métal suffisait à en extraire un électron si l'énergie du photon $E = h \cdot \nu$ dépassait l'énergie d'extraction W nécessaire pour dégager l'électron du métal. C'est le phénomène photoélectrique mis en œuvre dans la plupart des capteurs.

Réciproquement, si un électron libre e percute un électron e' et si l'énergie apportée est suffisante, ce dernier se déplace sur une orbite d'atome de plus grand diamètre. En retrouvant sa position d'origine, il restitue l'énergie reçue sous forme de photons. C'est le principe mis en œuvre dans les émetteurs photoélectriques (diodes électroluminescentes).

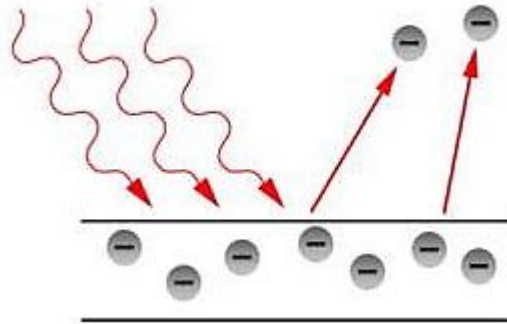


Fig. 7.2 : Effet photoélectrique.

7.3 Capteurs passifs

7.3.1 Photorésistances

Une photorésistance (appelée: cellule photoconductrice) est un composant électronique dont la résistivité varie en fonction de la quantité de lumière incidente. On peut également la nommer résistance photo-dépendante (Light Dependent Resistor (LDR)) Fig. 7.3 [24].

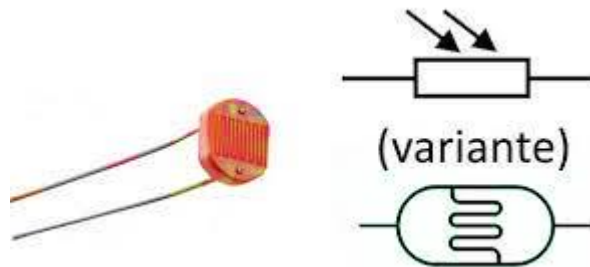


Fig. 7.3 : photorésistance et Symbole.

La photorésistance n'a pas de sens de branchement. Sa valeur en ohms dépend de l'éclairement qu'elle reçoit.

La partie sensible du capteur est une piste de sulfure de cadmium en forme de serpent : L'énergie lumineuse déclenche une augmentation d'électrons libres dans ce matériau, de sorte que sa résistance électrique diminue a priori.

A. Principe et description

Certains semi-conducteurs comme CdSe (seleniure de cadmium), PbS (le sulfure de plomb), InSb (l'antimoniure d'indium), GaAs (l'arséniure de gallium) ... ont une résistance qui varie avec l'éclairement. Les photons incidents augmentent le nombre des porteurs libres et diminuent la résistance. L'efficacité est fonction de la longueur d'onde de la lumière. Pour CdS, la courbe de sensibilité est voisine de celle de l'œil humain [1,2].

B. Propriétés

Avantages : Capteur sensible, de faible coût, facile à mettre en œuvre.

Inconvénients : Non linéaire. La vitesse de variation de R avec l'éclairement est faible et non symétrique. (Temps de montée de l'ordre de 35 ms et temps de descente de l'ordre de 10 ms).

C. Applications

Déclenchement automatique d'éclairage, détecteur de présence, relais optique ...

Une des principales utilisations de la photorésistance est la mesure de l'intensité lumineuse.

7.3.2 Capteurs à fibre optique

A. Définition et Principe

Un capteur à fibre optique est un dispositif qui utilise la lumière circulant dans une fibre de verre ou de plastique pour mesurer une grandeur physique (température, pression, déformation). La grandeur externe modifie les propriétés de la lumière (intensité, phase, longueur d'onde), qui est ensuite convertie en signal électrique.



Fig. 7.4: Capteur à fibre optique.

B. Principe de base

Le fonctionnement repose sur les principes optiques de base :

- Propagation : La lumière circule dans le cœur de la fibre par réflexion totale interne.
- Modulation : Lorsqu'une contrainte externe (chaleur, pression, vibration) est appliquée, elle altère les caractéristiques physiques de la fibre ou de la lumière transmise.
- Détection : Le récepteur capte cette lumière modifiée et l'analyse.

C. Les deux grandes catégories

- Capteurs extrinsèques : La fibre sert uniquement à transporter la lumière vers un composant externe qui effectue la mesure.
 - Capteurs intrinsèques : La fibre elle-même est l'élément sensible ; la grandeur physique à mesurer modifie directement les propriétés de la fibre (par exemple, via le réseau de Bragg).
- #### 3. Principaux avantages
- Immunité : Insensibles aux perturbations électromagnétiques et aux environnements explosifs (pas de risque d'étincelle).
 - Robustesse : Résistent aux températures extrêmes et aux environnements corrosifs.
 - Précision et finesse : Capables d'effectuer des mesures distribuées sur de très longues distances avec un encombrement minimal.

7.3.2 Bolomètre (capteur IR thermique)

Un bolomètre est un capteur thermique qui mesure le rayonnement infrarouge (IR) en convertissant l'énergie du rayonnement incident en chaleur. Cette absorption entraîne une augmentation de température du matériau, qui est mesurée sous forme de variation de résistance électrique.



Fig. 7.5: Bolomètre de type « spiderweb » pour mesurer le fond diffus cosmologique par NASA/JPL-Caltech [27].

A. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'un bolomètre repose sur trois étapes physiques clés :

- Absorption : Le capteur absorbe le rayonnement infrarouge incident, ce qui élève sa température.
- Isolation thermique : L'élément sensible est suspendu sur des membranes isolantes sous vide pour éviter que la chaleur ne se dissipe dans le substrat environnant.
- Conversion : L'échauffement modifie une grandeur physique du matériau, généralement sa résistance électrique. Cette variation est mesurée par un circuit électronique pour déterminer la quantité d'énergie reçue ou la température de l'objet observé.

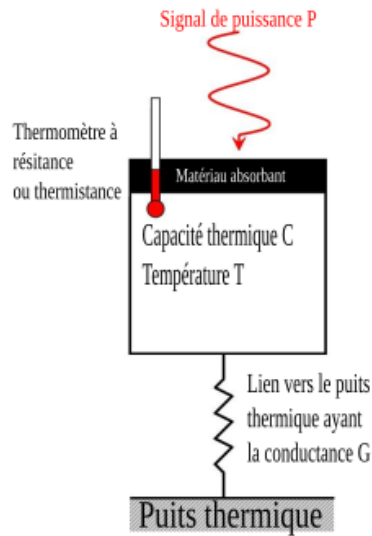


Fig. 7.6: Concept du bolomètre.

B. Structure de base (Microbolomètre)

Dans les caméras thermiques modernes, on utilise des matrices de microbolomètres. Chaque pixel de cette matrice est composé de :

- Un absorbeur : Reçoit les ondes infrarouges.
- Une thermistance : Matériau dont la résistance électrique varie fortement avec la température (comme le silicium amorphe ou l'oxyde de vanadium).
- Des piliers conducteurs : Ils maintiennent la structure suspendue tout en transmettant le signal électrique au processeur d'image

7.4 Capteurs actifs

7.4.1 Les photodiodes

A. Principe

Une photodiode est un composant semi-conducteur ayant la capacité de détecter un rayonnement du domaine optique et de le transformer en signal électrique, donc un photodétecteur capable de convertir la lumière en courant ou en tension Fig. 7.7 [25].



Fig. 7.7 : (a) symbole de la photodiode, (b) photodiode.

Les photodiodes sont caractérisées par :

- une excellente linéarité
- une bande passante étendue.

B. Applications

Les applications des photodiodes sont nombreuses, on les trouve principalement dans les télécommunications, les systèmes de sécurité, l'automatisme, le contrôle,...

7.4.2 Phototransistor

A. Principe

Un phototransistor est un transistor bipolaire dont la base est sensible au rayonnement lumineux ; la base est alors dite flottante puisqu'elle est dépourvue de connexion Fig. 7.8. Lorsque la base n'est pas éclairée, le transistor est parcouru par le courant de fuite I_{CE0} . L'éclairement de la base conduit à un photocourant I_{ph} que l'on peut nommer courant de commande du transistor.

Celui-ci apparaît dans la jonction collecteur-base sous la forme [1, 9]:

$$I_C = \beta I_{ph} + I_{CE0}$$

Le courant d'éclairement du phototransistor est le photocourant de la photodiode collecteur-base multiplié par l'amplification β du transistor. Sa réaction photosensible est donc nettement plus élevée que celle d'une photodiode (de 100 à 400 fois plus). Par contre le courant d'obscurité est plus important.



Fig. 7.8 : (a) symbole du phototransistor, (b) Phototransistors.

B. Application

En générale les phototransistors sont associés avec les photodiodes dans les circuits de commandes (émetteur, récepteur), robotique, acquisition de données,... [25].

7.4.3 Les capteurs CCD

Un capteur CCD est un circuit intégré optoélectronique dont la fonction est de capter une image. L'objectif a pour rôle de focaliser les rayons lumineux afin de former une image sur le capteur CCD placé sur son axe optique. Le capteur est constitué d'une matrice de photosites (qui est un ensemble de petites cellules sensibles à la lumière, disposées en lignes et colonnes, où chaque photosite correspond à un pixel de l'image., chaque point de mesure étant appelé pixel, et permet de convertir le rayonnement lumineux en un signal électrique. Pour

reconstituer l'image, on parcourt les pixels du capteur les uns après les autres puis on les transfère vers un fil de sortie ; la structure logique permettant le balayage en lignes et en colonnes est intégrée dans le circuit.

Dans le cas d'une image couleur, chaque pixel fournit l'intensité lumineuse reçue et, grâce à un filtrage couleur, on obtient les composantes rouge, verte et bleue (RVB). Le capteur CCD comprend notamment :

- Des microlentilles qui guident la lumière vers les récepteurs ;
- Un filtre de Bayer qui décompose la lumière en composantes R, V et B ;
- Des photocomposants (photodiodes) qui transforment le rayonnement reçu en signal électrique.

Ce type de capteurs est mis en œuvre dans les scanners, caméras et appareils photo numérique, où la qualité optique de l'objectif, la disposition des microlentilles et l'efficacité du filtre couleur influent directement sur la fidélité et la résolution de l'image.

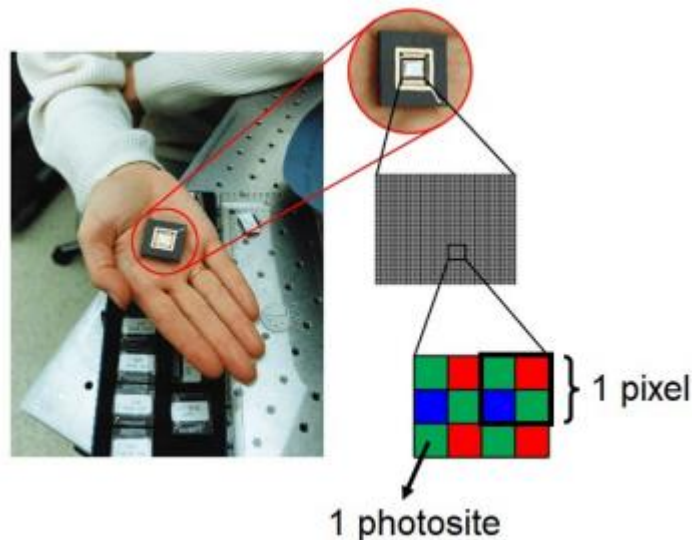


Fig. 7. 9 : Pixel et photosite.

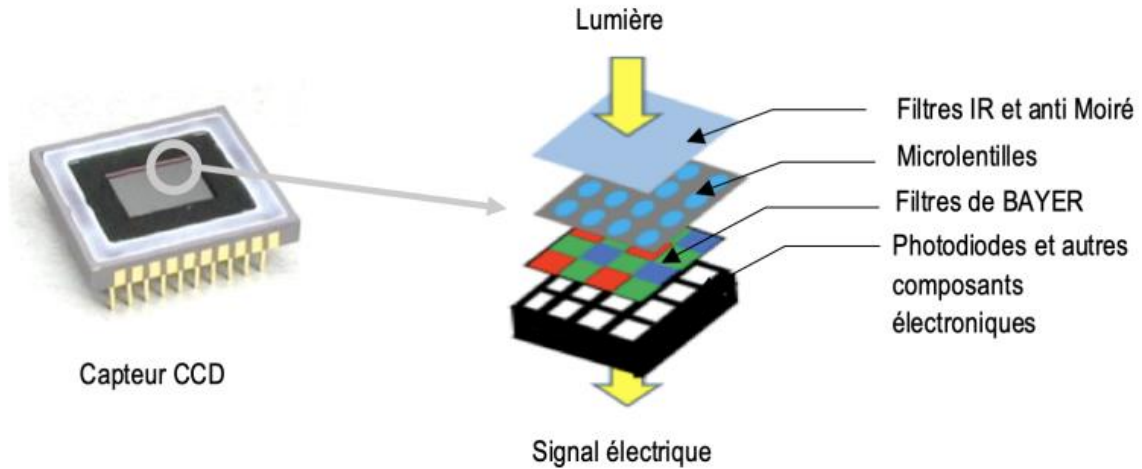


Fig. 7. 10 : Capteurs CCD.

7.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons découvert les capteurs optiques et leurs principes de fonctionnement. Nous avons vu la différence entre capteurs passifs, comme les photorésistances, et capteurs actifs, comme les photodiodes et les phototransistors. Enfin, nous avons évoqué les capteurs CCD, largement utilisés pour former des images.

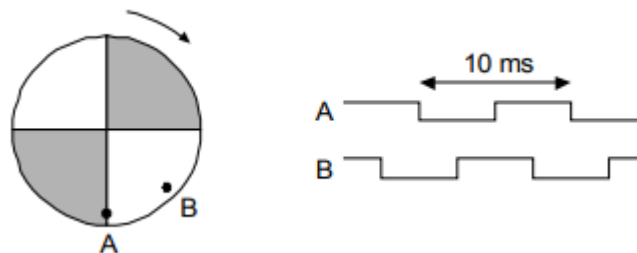
7.6 Exercices corrigés

Exercice 01

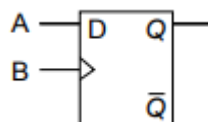
Sur l'axe d'un moteur, on place un disque :

Les capteurs optiques A et B donnent en sortie un niveau logique 1 en présence de blanc, et 0 en présence de noir :

1. En déduire la vitesse de rotation du moteur (en tr/min).



2. Les signaux issus des capteurs sont appliqués en entrée d'une bascule D :
Que vaut Q ?



3. On inverse le sens de rotation du moteur. Dessiner en concordance de temps A et B.
En déduire Q. Commentaire ?

Réponse

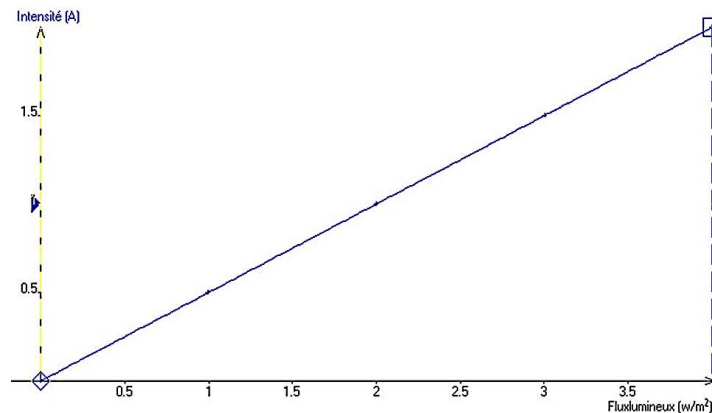
1. 3000 tr/min
2. $Q = 0$
3. $Q = 1$

Commentaire : Q donne le sens de rotation du moteur

Exercice 02

On dispose d'un capteur phototransistor associé à un détecteur de lumière qui allume automatiquement une lampe lorsque la luminosité est trop faible. On donne sa caractéristique sur la courbe suivante :

1. Quelle est la grandeur physique d'entrée de ce capteur ?
2. Quelle est sa grandeur physique de sortie ?
3. S'agit-il d'un capteur actif ou passif ?
4. Représenter la chaîne de mesure associée à ce capteur.
5. Calculer la sensibilité de ce capteur.
6. La sensibilité de ce capteur est-elle constante ?
7. La caractéristique de ce capteur est-elle linéaire ?



Réponse

1. La grandeur physique d'entrée de ce capteur est le flux lumineux (exprimé en $W.m^{-2}$), puisque ce capteur est destiné à mesurer un flux lumineux, afin de déterminer si la lumière est suffisante ou non.
2. D'après la caractéristique de ce capteur, la grandeur physique de sortie est l'intensité électrique (I, exprimée en A).
3. Il s'agit d'un capteur actif puisque la grandeur de sortie est une intensité électrique.
4. Comme tous les capteurs il doit être associé à un conditionneur de signal puis à un traitement numérique de l'information afin de l'afficher :
5. Pour calculer la sensibilité on se sert de deux points de la droite.

$$S = \frac{\Delta I}{\Delta E} = \frac{1.5 - 0.0}{3.1 - 0.0} = 5 \cdot 10^{-1} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \text{W}^{-1}$$

6. La caractéristique de ce capteur est une droite. Son coefficient directeur est constant, donc la sensibilité de ce capteur est constante.
7. La caractéristique de ce capteur est linéaire puisqu'il s'agit d'une droite qui passe par zéro.

Synthèse générale des capteurs passifs et actifs étudiés dans ce polycopié

Dans ce polycopié, différents capteurs ont été étudiés selon les grandeurs physiques mesurées et leurs principes de fonctionnement. Le tableau suivant présente une synthèse structurée des principaux capteurs passifs et actifs abordés dans les différents chapitres.

Tableau récapitulatif des capteurs : Classification et principes

Capteur	Type	Grandeur mesurée	Principe / phénomène	Chapitre
Thermorésistance (Pt100, Pt1000)	Passif	Température	Variation de résistance métallique	2
Thermistance CTN / CTP	Passif	Température	Variation de résistance semi-conducteur	2
Thermocouple	Actif	Température	Effet Seebeck	2
Capteur potentiométrique	Passif	Déplacement / position	Variation de résistance	3
LVDT	Passif	Déplacement	Variation d'inductance	3
Capteur inductif de proximité	Passif	Proximité	Variation d'inductance	3
Capteur capacitif	Passif	Position / niveau / proximité	Variation de capacité	3 & 6
Capteur photoélectrique	Actif	Proximité	Émission et réception de lumière	3
Capteur ultrasonique	Actif	Distance	Temps de vol d'onde ultrason	3
Codeur incrémental	Actif	Position / vitesse	Impulsions électriques	3
Codeur absolu	Actif	Position	Codage numérique	3
Tachymètre à impulsions	Actif	Vitesse	Génération d'impulsions	4
Génératrice tachymétrique CC	Actif	Vitesse	Tension proportionnelle à la vitesse	4
Génératrice tachymétrique AC	Actif	Vitesse	Tension alternative proportionnelle	4
Accéléromètre piézoélectrique	Actif	Accélération	Effet piézoélectrique	4

Capteur	Type	Grandeur mesurée	Principe / phénomène	Chapitre
Accéléromètre piézorésistif	Passif	Accélération	Variation de résistance	4
Jauge de contrainte	Passif	Force / déformation	Variation de résistance	5
Capteur de pression (tous types)	Passif	Pression	Déformation mécanique + transduction	5
Débitmètre à tube de Pitot	Actif	Débit	Différence de pression	6
Rotamètre	Actif	Débit	Flottabilité	6
Débitmètre électromagnétique	Actif	Débit	Induction électromagnétique	6
Débitmètre ultrasonique	Actif	Débit	Temps de propagation	6
Débitmètre Coriolis	Actif	Débit massique	Effet Coriolis	6
Capteur de niveau à flotteur	Passif	Niveau liquide	Déplacement mécanique	6
Capteur de niveau capacitif	Passif	Niveau liquide	Variation de capacité	6
Capteur de niveau par pression	Passif	Niveau liquide	Pression hydrostatique	6
Capteur d'humidité résistif	Passif	Humidité	Variation de résistance	6
Capteur d'humidité capacitif	Passif	Humidité	Variation de capacité	6
Photorésistance (LDR)	Passif	Lumière	Variation de résistance	7
Photodiode	Actif	Lumière	Effet photoélectrique	7
Phototransistor	Actif	Lumière	Amplification photoélectrique	7
Capteur CCD	Actif	Image	Conversion de charges électriques	7

Conclusion générale

Au terme de ce polycopié, nous constatons que l'instrumentation électronique occupe une place essentielle dans les systèmes modernes de mesure, de contrôle et d'automatisation. Les capteurs représentent l'élément principal de la chaîne de mesure, puisqu'ils permettent de transformer les grandeurs physiques en signaux exploitables par les systèmes électroniques.

Ce document a permis de présenter les notions fondamentales liées aux capteurs, leurs caractéristiques métrologiques et fonctionnelles, ainsi que les principaux conditionneurs utilisés dans les systèmes de mesure. Les différents types de capteurs étudiés, notamment les capteurs de température, de déplacement, de vitesse, de pression, de débit, d'humidité et les capteurs optiques, montrent la diversité des domaines d'application de l'instrumentation électronique dans l'industrie, les laboratoires, l'automobile, l'aéronautique et les équipements du quotidien.

Les exercices corrigés proposés à la fin de chaque chapitre ont pour objectif de renforcer la compréhension des principes étudiés et de faciliter l'assimilation des méthodes de mesure et d'analyse. Ainsi, ce polycopié constitue une base pédagogique destinée aux étudiants souhaitant acquérir des connaissances solides dans le domaine des capteurs et de l'instrumentation électronique.

Enfin, l'évolution rapide des technologies électroniques et numériques ouvre de nouvelles perspectives pour le développement de capteurs intelligents, plus précis, plus rapides et mieux adaptés aux exigences des systèmes industriels modernes.

Bibliographie

- [1] Ch. Fevrot, Les capteurs, Editions Techniques et Scientifiques Françaises, 1976.
- [2] Guides Geso-EPFL, Capteurs de mesure et de detection, Presses Polytechniques Romandes, 1985.
- [3] F. Baudoin, M. Lavabre, Capteurs : Principes et utilisations, Edition Casteilla,2008.
- [4] Ian R. Sintclair, Sensors and transducers, NEWNES 2001.
- [5] M. Bayart, B. Conrard, A. Chovin, M. Robert, Capteurs et actionneurs intelligents, 2005.
- [6] D. Placko, De la physique du capteur au signal électrique, Hermes Science Europe LTD, 2000.
- [7] G. Asch et collaborateurs. Acquisition de données, du capteur à l'ordinateur. Edition Dunod
- [8] R. Pallas-Areny, J. G. Webster, Sensors and Signal Conditioning, 2e édition, John Wiley& Sons, 2001. ISBN : 978-0-471-33232-9.
- [9] G. Asch, Acquisition de données, du capteur à l'ordinateur, Edition Dunod, Version7.
- [10] P. Dassonville (préf. G. Asch), 62 exercices et problèmes résolus sur les capteurs, Dunod, coll. Sciences Sup, 2005. ISBN : 978-2-10-048934-2.
- [11] P. Marecha, Transducteur ultrasonores : modelisation et application, Université du Havre, Laboratoire ondes et milieux complexe, groupe ondes acoustiques, Cnrs 3102, le havre, Cours de Master 2, 2009.
- [12] G. Asch, L. Blum, J. Fouletier, P. Desgoutte, B. Créton et al. Les capteurs en instrumentation industrielle, 9e édition, Dunod, octobre 2025.
- [13] H. H. Molinaro, E.Vourc et J-P. Barbot, ens cours, Capteur et chaine d'acquisition, Edité le 18/06/2015.
- [14] G. Asch and Coll, Les capteurs en instrumentation industriel, 7^e Edition, Dunod, Paris, 2006, 2010
- [15] S. BENS Aid, Cours Capteurs et Actionneurs Université de BOUIRA ; http://dspaceancien.univ-bouira.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/456/1/FSSA_DGE_CAPTEUR%26Actionneurs_S-BENSAID.pdf
- [16] I. Hafsaoui, Capteurs et instrumentation, 1ere Année Master Electromécanique, <https://i-hafsaoui.e-monsite.com/medias/files/chapite7.pdf>
- [17] SENSEL Measurement, « Capteur d'accélération et accéléromètre industriel », [en ligne], <https://www.sensel-measurement.fr/fr/14-accelerometre>, consulté le 21/05/2026.
- [18] Atmel livre texas instruments, programmes de demo, test et diagnostics, interfaces numériques et analogiques, capteurs température, débit, courant électrique, etc
- [19] J. G. Webster, H. Eren. Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook », Taylor & Francis Ltd. December 2017. doi : [10.1201/b15474](https://doi.org/10.1201/b15474)

- [20] SENSEL Measurement, « Capteur de force, Mesure de force traction compression haute précision », [en ligne], <https://sensel-measurement.fr/fr/3-capteur-de-force>, consulté le 21/05/2026.
- [21] A. Bendjerad, cours « capteurs », L3 licence, Département d'électrotechnique, Université Mustapha Ben Boulaid, Batna 2. https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/bendjerad_adel/files/cour_capteur_l3_chapitres_1_2_univ_batna_2_bendjerad.pdf
- [22] Manon Bernard, Direction des eaux usées et Direction générale des politiques de l'eau, Cahier 7, Méthodes de mesure du débit, 3e édition Gouvernement du Québec, 2019. : www.ceaeq.gouv.qc.ca
- [23] Francesca Sanna, Mesures de l'humidité du sol et méthodes d'étalonnage : Capteurs d'humidité du sol pour les pratiques agricoles, Éditions universitaires européennes (18 février 2020)
- [24] P. Dassonville (préf. G. Asch), 50 exercices et problèmes résolus sur les capteurs, Dunod, 2002. ISBN : 978-2-10-006296-8.
- [25] Georges Asch, Théorie : Les capteurs en instrumentation industrielle, éd. Dunod - 4e édition 1991.
- [26] Y-IC Electronics, « How Fiber Optic Sensors Operate », [en ligne], <https://www.y-ic.fr/blog/How-Fiber-Optic-Sensors-Operate.html>, consulté le 23/05/2026.
- [27] Wikipédia, « Bolomètre », [en ligne], <https://fr.wikipedia.org/wiki/Bolom%C3%A8tre>, consulté le 24/05/2026.
- [28] TISSOT, Jean-Luc, « Détecteurs thermiques résistifs », Imagerie IR thermique à base de détecteurs non refroidis, [en ligne], Techniques de l'Ingénieur, Réf. E4061, 10 août 2010, <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/electronique-photonique-th13/composants-optoelectroniques-42451210/imagerie-ir-thermique-a-base-de-detecteurs-non-refroidis-e4061/detecteurs-thermiques-resistifs-e4061niv10002.html>, consulté le 24/05/2026.

Annexes

Annexes A : Canevas

Filière : Génie des Matériaux

Spécialité : Analyse physique-Chimie des Matériaux

Intitulé de la matière : Instrumentation électronique

Semestre : S4

Objectifs de l'enseignement

Ce programme est un complément de la matière technique de mesure du 1^{er} semestre.

Connaissances préalables recommandées

Technique de mesure de base, bases de l'électronique analogique et l'électronique numérique.

Contenu de la matière

Mesures physiques

- 1- Les capteurs (corps d'épreuve)
- 2- Transducteurs
- 3- Conditionneurs
- 4- La conversion numérique analogique et analogique numérique
- 5- Capteur de déplacement et de proximité
- 6- Capteur de vitesse
- 7- Capteur d'accélération
- 8- Capteur de force et de pression
- 9- Capteur de température
- 10- Capteur de débit et de niveau de liquide

Travaux Pratiques

- 1- Capteur de température numérique – Système d'acquisition
- 2- Capteur de courant à fibre optique
- 3- Capteur de vitesse et d'accélération – Acquisition et conversion
- 4- Capteur de force et de pression – Acquisition et conversion
- 5- Transducteur

Mode d'évaluation : Control continu et examen final

Annexe B : Erreurs de Mesure

Définitions

1. Erreur absolue (e) : Écart entre la valeur mesurée X_m et la vraie valeur $e = X_m - X$

2. Erreur relative (ε) : Quotient entre erreur absolue et vraie valeur $\varepsilon = \frac{e}{X} \approx \frac{e}{X_m}$

a. Erreurs systématiques : Pour une valeur donnée du mesurande, une erreur systématique est soit constante, soit à variation lente par rapport à la durée de mesure. Parmi les causes fréquentes d'erreurs systématiques on retrouve :

a.1. L'erreur sur la valeur d'une grandeur de référence comme dans le cas d'un décalage du zéro d'un appareil de mesure à déviation qui peut être réduit par la vérification soignée des appareillages associés.

a.2. L'erreur dues au mode ou aux conditions d'emploi comme les erreurs de rapidité, ici on parle du temps de réponse du capteur vis-à-vis son environnement.

b. Erreurs accidentelles : l'apparition des ces erreurs comme leur amplitude et leur signe sont considérées comme aléatoires. Certaines des causes peuvent être connues mais les valeurs des erreurs qu'elles entraînent au moment de l'expérience sont inconnues.

Diverses causes possibles d'erreurs accidentelles notamment :

b.1. Erreur de lecture d'un appareil à déviation ou bien l'erreur d'hystérésis qui se manifeste lorsque l'un des éléments de la chaîne de mesure a un comportement présentant de l'hystérésis (hystérésis mécanique d'un ressort, hystérésis magnétique d'un matériau ferromagnétique) sa réponse dépend, dans une certaine mesure, de ses conditions d'utilisation antérieures.

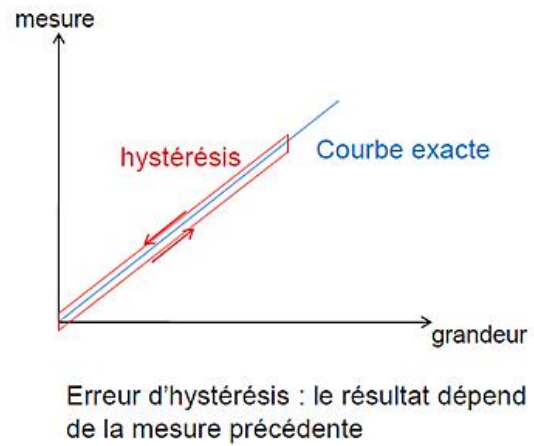
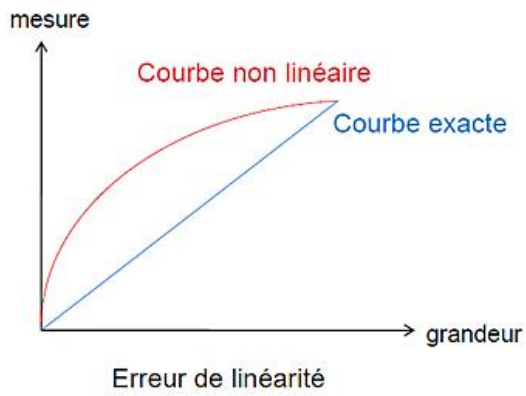
b.2. L'erreur due à la prise en compte par la chaîne de mesure de signaux parasites de caractères aléatoire comme les inductions parasites dues aux rayonnements électromagnétiques, à fréquence industrielle en particulier.

b.3. L'erreur dues à des grandeurs d'influence : un appareillage ayant été étalonné à 20°C, toute variation de température de part et d'autre de 20°C pourra entraîner des variations de performances et donc du signal mesuré.

La précision peut être spécifiée numériquement par l'erreur de précision qui, compte tenu de toutes les causes d'erreurs, délimite l'intervalle autour de la valeur mesurée à l'intérieur duquel on est assuré de trouver la valeur vraie;

La mesure d'une grandeur physique avec une précision donnée exige :

- Le choix d'une méthode de mesure.
- La sélection du capteur approprié.
- La conception et la réalisation de la chaîne de mesure associée.



Annexe C : Unités de températures

La température est une grandeur physique essentielle en instrumentation et en métrologie. Elle intervient dans de nombreux phénomènes et processus physiques, ce qui rend sa mesure indispensable dans divers domaines : industrie, recherche, environnement, etc. Pour la mesurer avec fiabilité, on utilise des capteurs spécifiques qui transforment une variation de température en une information exploitable. L'unité de température doit donc être définie de façon universelle, selon les principes de la thermodynamique, afin d'assurer la précision et l'uniformité des mesures, quel que soit l'instrument utilisé. Cependant, il existe plusieurs échelles de température (Celsius, Kelvin, Fahrenheit, etc.), chacune adaptée à des contextes d'application particuliers.

- **Échelle de Kelvin :**

L'unité est le **Kelvin (K)**. Cette échelle se base sur la valeur de la température du point triple de l'eau étant fixé à 273,16. Le point triple de l'eau est la température d'équilibre entre la phase solide, liquide et vapeur.

- **Échelle de Rankin :**

L'unité est le degré **Rankin (°R)** qui est égal à 9/5 de kelvin; la température du point triple de l'eau est donc de 491,69°R.

- **Échelle de Celsius :**

L'unité est le degré Celsius (°C). Cette échelle se base sur l'échelle absolue de Kelvin :

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15$$

- **Échelle de Fahrenheit :**

L'unité est le degré Fahrenheit (°F). Cette échelle s'obtient par décalage de l'échelle absolue de Rankin :

$$T(^{\circ}\text{F}) = T(^{\circ}\text{R}) - 459,67$$

Conversion entre échelle de Celsius et de Fahrenheit :

$$T(^{\circ}\text{C}) = (T(^{\circ}\text{F}) - 32).5/9$$

Point de mesure	kelvin	°Celsius	°Rankine	°Fahrenheit	°Réaumur
Zéro absolu théorique	0	-273,15	0	-459,67	- 218,52
Point d'ébullition de l'oxygène	90,18	-182,97	-162,32	-297,35	-146,38
Point de congélation du mercure (Hg)	234,28	-38,87	421,70	-37,97	-31,096
Point de la glace fondante saturée d'air	273,15	0	491,67	32	0
Point d'ébullition de l'eau	373,15	100	671,67	212	80
Point de congélation de l'étain (Sn)	505,06	231,91	909,11	449,44	183,53
Point de congélation du plomb (Pb)	600,45	327,3	1080,81	621,14	261,84

Tableau : Comparaison des échelles thermométriques.

Annexe D : Les unités de pression

L'unité de pression du Système International (SI) est le Pascal (Pa), qui équivaut à un Newton par mètre carré. La pression atmosphérique normale est de 101 325 Pa. Toutefois, en techniques du vide, on utilise principalement le Torr (ou millimètre de mercure) et, dans certains cas, le millibar (mb). Les conversions entre ces différentes unités sont présentées dans le Tableau 2.

	Pa	atm	Torr	mbar
Pa		$0,87 * 10^{-6}$	0,075	0,01
Atm	101325	-	760	1013
Torr	133,3	0,00132	-	1,333
Mbar	100	0,000987	0,750	-

Tableau 2: Conversion entre les unités de mesure de pression.

La pression est une grandeur dérivée du système international. Elle est définie comme le quotient d'une force par une surface. La pression s'exerce perpendiculairement à la surface considérée.

$$P_a = \frac{N}{m^2} = \frac{kg}{m \cdot S^2}$$

Les différentes unités de pression

	Pa	hPa/mbar	kPa	MPa	bar	psi	mmH₂O
Pa	1	100	1000	1000000	100000	6.895	9.807
hPa/mbar	0.01	1	10	10000	1000	68.948	0.09807
kPa	0.001	0.1	1	1000	100	6.895	0.009807
MPa	0.000001	0.0001	0.001	1	0.1	0.006895	9.807E-06
bar	0.00001	0.001	0.01	10	1	0.0689	0.00009807
psi	0.0001451	0.0145	0.14505	145.05	14.505	1	0.001422
mmH₂O	0.102	10,2	102	102.000	10.200	704.3	1

Tableau 3 : Conversion des unités de pression.