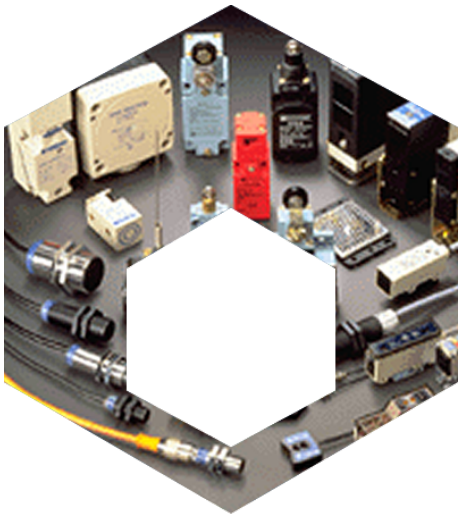
CPGE PTSI-PT Lycée Jean Zay - Thiers

Les capteurs

Cours

v1.2

Lycée Jean Zay – 21 rue Jean Zay – 63300 Thiers – Académie de Clermont-Ferrand



Compétences visées :

A3-01	Associer les fonctions aux constituants.
A3-02	Justifier le choix des constituants dédiés aux fonctions d'un système.
A3-06	Caractériser un constituant de la chaine d'information.
D1-02	Repérer les constituants réalisant les principales fonctions des chaines fonctionnelles.
D2-06	Justifier le choix d'un capteur ou d'un appareil de mesure vis-à-vis de la grandeur physique à mesurer.
F2-02	Choisir les composants de la chaine d'information.
F3-01	Dimensionner un composant des chaines fonctionnelles à partir d'une documentation technique.

Table des matières

1 Introduction **3**

1.1 Mise en situation . . . 3

1.2 Définition . . . 3

1.3 Structure et fonctions principales d'un capteur . . . 3

2 Classification des capteurs **4**

2.1 Par la nature du signal d'entrée . . . 4

2.2 Par la nature du signal de sortie . . . 4

2.3 Par la distinction actif/passif . . . 6

3 Caractérisation des capteurs **7**

3.1 Caractéristiques générales . . . 7

3.2 Erreurs . . . 7

3.3 Étalonnage . . . 7

3.4 Limites d'utilisation . . . 7

3.5 Rapidité - Temps de réponse . . . 8

3.6 Finesse . . . 8

4 Panorama des principaux capteurs **8**

4.1 Détecteurs de position . . . 8

4.2 Codeurs de position . . . 10

4.3 Potentiomètres . . . 11

4.4 Capteurs de vitesse . . . 12

4.5 Accéléromètres . . . 13

4.6 Capteurs d'effort . . . 14

4.7 Capteur de température . . . 15

1 Introduction

1.1 Mise en situation

Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services, loisirs ...), on a besoin de contrôler de nombreux paramètres physiques (température, force, position, vitesse, luminosité...). Le capteur est l'élément indispensable à la mesure de ces grandeurs physiques.

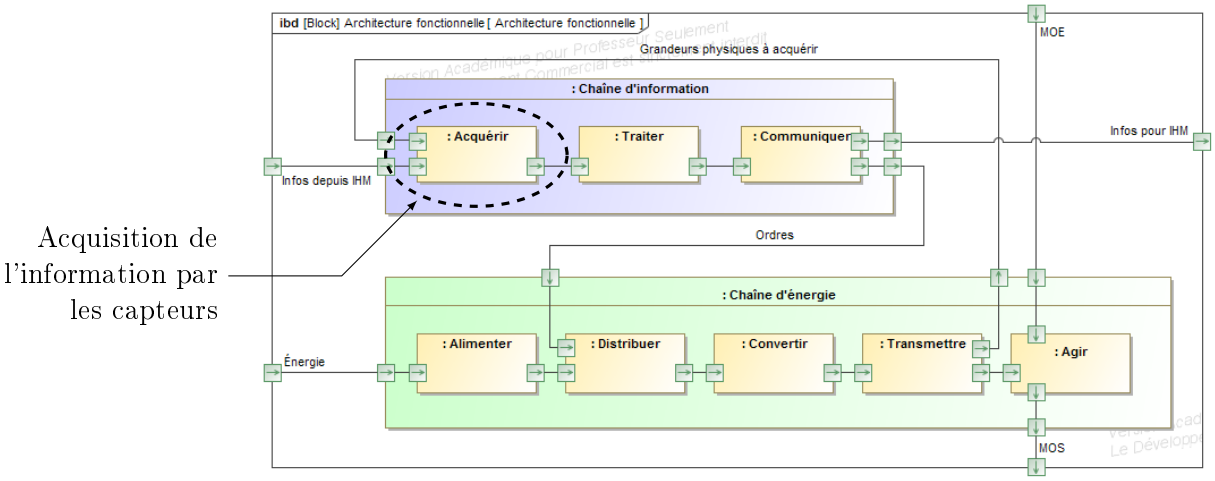
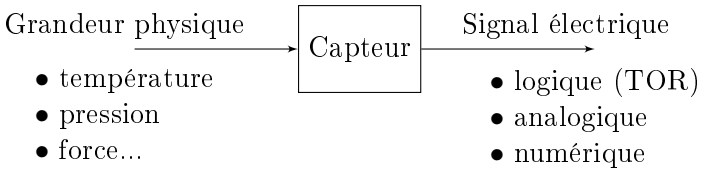


FIGURE 1 – Les capteurs dans la chaine d'information

1.2 Définition

Définition *Capteur*

Un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (très souvent électrique). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande.



1.3 Structure et fonctions principales d'un capteur

De façon simple, un capteur peut être défini comme un transducteur convertissant une grandeur physique (**mesurande**) en un signal électrique (**mesure**). Cette transformation peut être directe dans quelques cas simples, mais en réalité, la technologie des capteurs fait souvent appel à plusieurs conversions de phénomène physique avant d'arriver au signal de sortie.

Ainsi, la structure d'un capteur répond de manière générale au schéma ci-dessous :

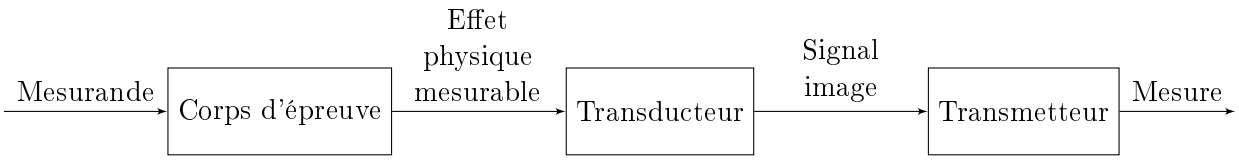


FIGURE 2 – Structure d'un capteur

Définition *Corps d'épreuve*

C'est un élément mécanique qui réagit sélectivement à la grandeur à mesurer. Il transforme la grandeur à mesurer en une autre grandeur physique dite mesurable.

Définition *Transducteur*

Il traduit les réactions du corps d'épreuve en une grandeur électrique constituant le signal de sortie.

Définition *Transmetteur*

Il réalise la mise en forme, l'amplification, le filtrage, la mise à niveau du signal de sortie pour sa transmission à distance. Il peut être incorporé ou non au capteur proprement dit.

2 Classification des capteurs

2.1 Par la nature du signal d'entrée

Les principales grandeurs physiques à mesurer sont (liste non exhaustive) :

- la présence d'un objet, sa position, son déplacement linéaire/angulaire, sa vitesse linéaire/angulaire, son accélération ;
- la force, le couple, la pression ;
- la température, l'humidité, la luminosité, la vitesse du vent ;
- le débit, le niveau, le bruit...

2.2 Par la nature du signal de sortie

La sortie d'un capteur peut varier de 3 façons différentes, et délivre donc une information de type analogique, logique (tout ou rien = TOR) ou numérique.

2.2.1 Capteur analogique

La grandeur électrique délivrée en sortie par ce type de capteur est en relation directe (le plus souvent proportionnelle) à la grandeur physique à capter. Le signal varie de façon continue au cours du temps et possède une infinité de valeurs possibles dans un intervalle donné.

FIGURE 3 – Capteur analogique

2.2.2 Capteur Tout ou Rien (TOR)

Ces capteurs génèrent une information électrique de type binaire (vrai ou faux, 0 ou 1) qui caractérise le phénomène à détecter. On parle alors plutôt de détecteurs.

FIGURE 4 – Capteur Tout ou Rien

2.2.3 Capteur numérique

Ce type de capteur délivre en sortie une information électrique à caractère numérique, c'est-à-dire ne pouvant prendre qu'un nombre limité de valeurs distinctes. Le signal varie de façon discontinue au cours du temps. L'information délivrée par ces capteurs est un code numérique sur plusieurs bits.

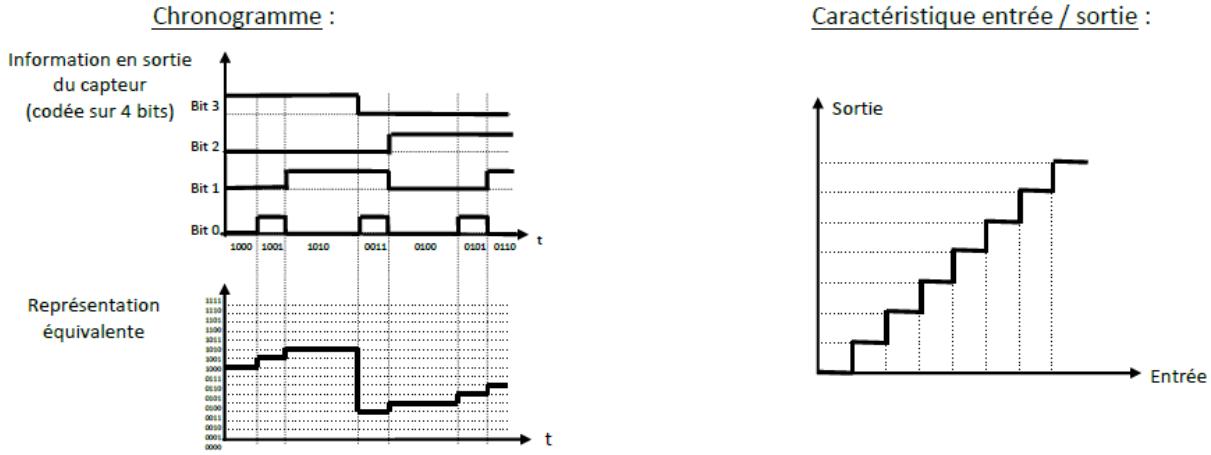


FIGURE 5 – Capteur numérique

Exemple : Codeur absolu de position angulaire à 4096 positions/tour

`000010001111 = 143` correspond à $143 \times \dfrac{360}{4096} = 12{,}6°$

Remarque

Plus le nombre de bits est important, plus le signal numérique tend vers un signal analogique.

On parle aussi de signal numérique lorsque le code a subi une conversion parallèle → série pour être transmis. Le signal est alors sous forme logique, mais transporte l'information d'une valeur numérique (ex : USB, RS232, bus CAN, etc.).

2.3 Par la distinction actif/passif

Une autre façon de distinguer les capteurs repose sur l'effet mis en œuvre pour générer le signal de mesure.

2.3.1 Les capteurs passifs

Ils font intervenir une impédance dont la valeur varie avec la grandeur physique ; il faut donc intégrer un capteur passif dans un circuit avec une alimentation.

- **Capteurs résistifs :** R varie avec la grandeur physique :
  - ◇ mesure de température par résistance à fil de platine (sonde Pt100), thermistance (CTN, CTP) ;
  - ◇ mesure d'effort par jauge de contrainte ;
  - ◇ mesure d'intensité lumineuse par photorésistance (cf. Somfy).
- **Capteurs inductifs :** L varie avec la grandeur physique :
  - ◇ mesure de déplacement par inductance variable (Transformateur Différentiel Linéaire LVDT) ;
  - ◇ mesure d'effort par capteur magnéto-élastique.
- **Capteurs capacitifs :** C varie avec la grandeur physique :
  - ◇ mesure de déplacement et de position : l'objet dont on veut mesurer le déplacement se déplace avec une armature du condensateur
  - ◇ mesure de niveau : la présence de liquide modifie la valeur de la capacité.

2.3.2 Les capteurs actifs et les effets physiques associés

La grandeur d'entrée ou ses variations génère directement une énergie (tension, courant, charge électrique). Cette énergie étant généralement faible, les capteurs nécessitent tout de même l'utilisation d'amplificateurs.

- **Capteurs à effet photoélectrique ou photovoltaïque :** basés sur la libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux, ou plus généralement d'une onde électromagnétique. Exemple : mesure de lumière (capteur CCD, photodiode).
- **Capteurs à effet thermoélectriques :** basés sur la création d'une tension à la jonction de deux matériaux soumis à une différence de température. Exemple : mesure de température (thermocouple).
- **Capteurs à effet piézoélectrique :** l'application d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézoélectriques (le quartz par exemple) entraîne l'apparition d'une tension entre leurs faces opposées. Exemple : mesure d'effort, d'accélération (accéléromètre).
- **Capteur à effet d'induction électromagnétique :** La variation du flux d'induction magnétique dans un circuit électrique induit une tension électrique aux bornes de ce circuit. Exemple : détection de passage d'un objet métallique (détecteur inductif, capteur d'ABS pour automobile).

- **Capteur à Effet Hall :** Un champ magnétique B et un courant électrique I créent dans un matériau semi-conducteur une tension proportionnelle à B et à I. Exemple : mesure de courant (pince ampèremétrique).

3 Caractérisation des capteurs

3.1 Caractéristiques générales

- **Étendue de mesure :** il s'agit de la plage de valeurs possibles du mesurande m : $EM = m_{\max} - m_{\min}$.
- **Sensibilité :** elle traduit la capacité du capteur à détecter la plus petite variation possible du mesurande, et est la pente de la caractéristique entrée/sortie 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.
- **Résolution :** plus petite variation du mesurande mesurable par le capteur.

3.2 Erreurs

Le capteur et toute la chaîne de traitement de la mesure introduisent des erreurs : 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 :** un capteur est fidèle si ses valeurs ne changent pas au cours du temps (mesures reproductibles
- **Justesse :** un capteur est juste si ses valeurs ne changent pas quand on les compare à des valeurs étalon, ou à des valeurs données par d'autres capteurs normalisés.
- **Précision :** elle réunit la justesse et la fidélité. variation de la grandeur d'entrée.
- **Linéarité :** la linéarité implique que la relation entre grandeur physique à mesurer et grandeur électrique est linéaire (équation d'une droite).

3.3 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.

3.4 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.

3.5 Rapidité - Temps de réponse

La rapidité est la spécification d'un capteur qui permet d'apprécier de quelle façon la grandeur de sortie suit dans le temps les variations du mesurande.

3.6 Finesse

La présence du capteur peut perturber le phénomène physique mesuré. La finesse est une spécification qui permet d'estimer l'influence de la présence du capteur et de ses liaisons sur la valeur du mesurande. La finesse est d'autant plus grande que l'influence du capteur est faible.

4 Panorama des principaux capteurs

Les capteurs utilisent une grande variété de solutions technologiques, dont vouloir dresser un catalogue exhaustif serait vain. Chaque phénomène physique pouvant donner naissance à une famille de capteurs.

On retiendra les technologies associées aux mesures plus courantes : position, vitesse, accélération, effort, température.

4.1 Détecteurs de position

La détection de la position est souvent réalisée par un capteur TOR ; les technologies sans contacts sont plus robustes dans les environnements industriels et les détecteurs à ultrasons tendent à remplacer les détecteurs inductifs.

4.1.1 Capteur mécanique fin de course

Sortie par commutation d'un contact. L'information est récupérée sur un « contact sec » qui est câblé soit directement dans un schéma de commande, soit relié à une entrée d'automate.

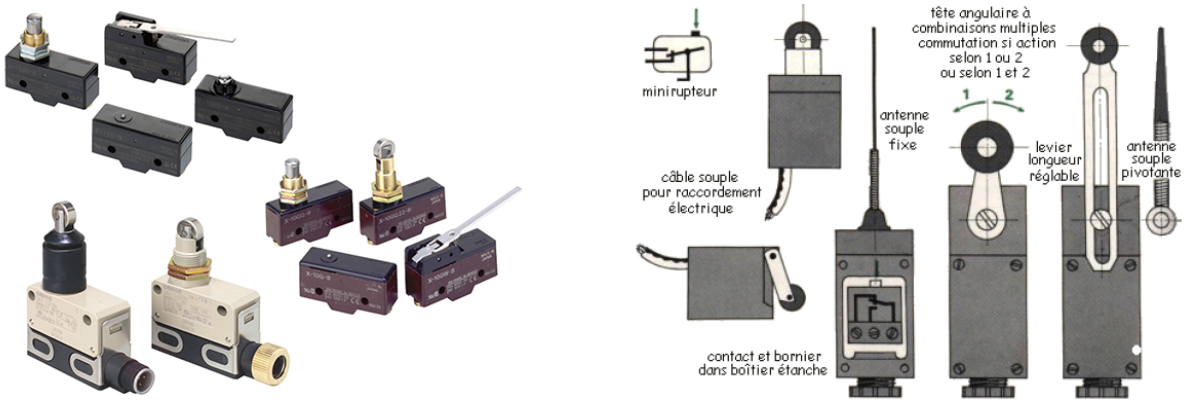


FIGURE 6 – Exemples de capteurs mécaniques de fin de course

4.1.2 Capteur de proximité inductif, capacitif

Sortie par commutation d'un transistor (bloqué ou saturé). L'information correspond à un niveau de tension récupérée en sortie de transistor, qui est interprétée comme étant un 0 ou un 1 par l'entrée d'automate. Sortie 2 fils ou 3 fils.

FIGURE 7 – Exemples de capteurs inductifs (à gauche) et capacitifs (à droite)

Remarque *Inductif ou capacitif ?*

De par leur principe de fonctionnement, les capteurs inductifs ne peuvent détecter sans contact que des objet métalliques. Cette restriction ne s'applique pas aux capteurs capacitifs, qui sont en revanche légèrement plus chers.

4.1.3 Fourche optique

Sortie par commutation d'un transistor (bloqué ou saturé). Comme avec les barrages photoélectriques, l'émetteur et le récepteur sont face-à-face.

FIGURE 8 – Exemples de fourches optiques

4.1.4 Capteur de proximité à ultrasons

La technologie ultrason permet de s'affranchir pour l'objet à détecter, du type de matériau, de sa couleur, de sa forme ainsi que des conditions d'ambiances. Le détecteur ultrason est « Plug and Play », pas de réglage, pas d'apprentissage, pas d'ajustement dans le temps.

FIGURE 9 – Exemples de capteurs de proximité à ultrasons

4.2 Codeurs de position

La valeur de la position est mesurée par un codeur absolu ou incrémental.

4.2.1 Codeur incrémental

Un disque imprimé solidaire de l'axe est associé à une détection optique qui délivre en général 5 ou 6 signaux. Le comptage des impulsions donne au déplacement une valeur relative. La combinaison des voies A et B permet de discriminer le sens de rotation.

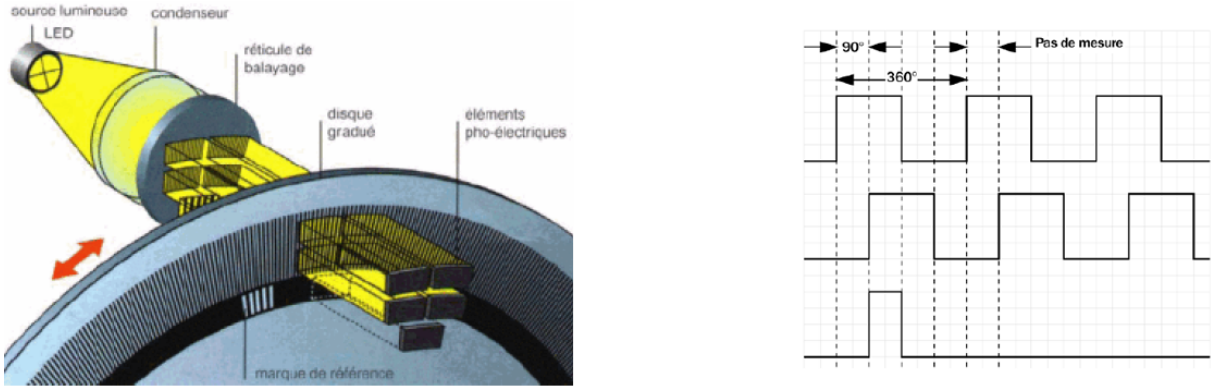


FIGURE 10 – Principe de fonctionnement d'un codeur incrémental de position angulaire

Le même fonctionnement est possible pour un capteur linéaire (on n'a alors plus un disque, mais une règle).

4.2.2 Codeur absolu

- Solution 1 : on utilise le code Gray (ou binaire réfléchi, voir ci-contre), ce qui nécessite une conversion en binaire naturel pour être exploitable par un microcontrôleur.
- Solution 2 : une piste supplémentaire (ci-dessous à droite la piste extérieure, pour un codeur rotatif) autorise la lecture du code de position seulement dans son axe, le code binaire naturel peut alors être utilisé pour imprimer le disque.

	Naturel				Gray			
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	0	1
2	0	0	1	0	0	0	1	1
3	0	0	1	1	0	0	1	0
4	0	1	0	0	0	1	1	0
5	0	1	0	1	0	1	1	1
6	0	1	1	0	0	1	0	1
7	0	1	1	1	0	1	0	0
8	1	0	0	0	1	1	0	0
9	1	0	0	1	1	1	0	1
10	1	0	1	0	1	1	1	1
11	1	0	1	1	1	1	1	0
12	1	1	0	0	1	0	1	0
13	1	1	0	1	1	0	1	1
14	1	1	1	0	1	0	0	1
15	1	1	1	1	1	0	0	0

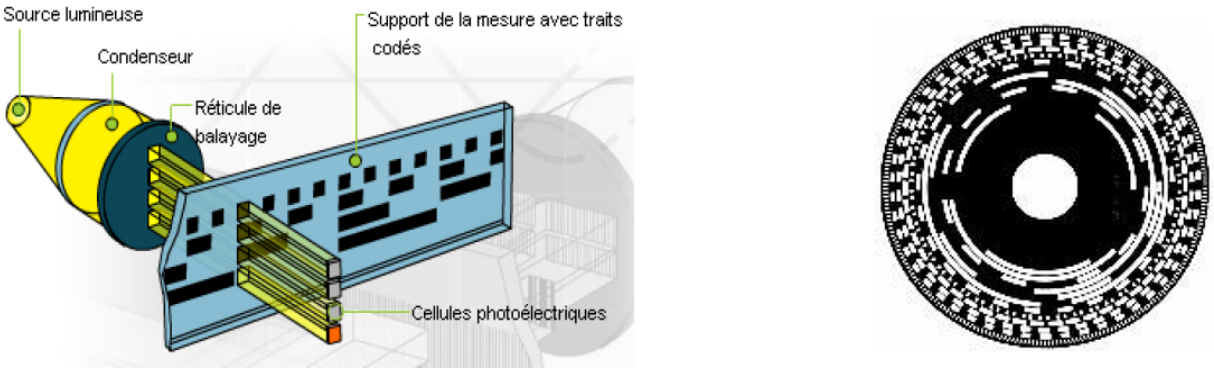


FIGURE 11 – Principe de fonctionnement d'un codeur absolu (linéaire ou rotatif)

4.3 Potentiomètres

Un potentiomètre est un type de résistance variable à trois bornes, dont une est reliée à un curseur se déplaçant sur une piste résistante terminée par les deux autres bornes.

Ce système permet de recueillir, sur la borne reliée au curseur, une tension qui dépend de la position du curseur et de la tension à laquelle est soumise la résistance.

Ce capteur traduit donc l'angle ou la distance à mesurer en tension entre la borne C et la borne A. À noter que le débattement angulaire ou la course sont limités par construction.

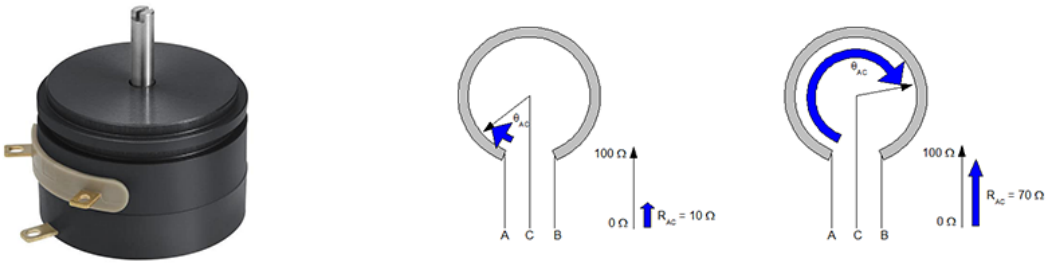


FIGURE 12 – Potentiomètre rotatif et principe de fonctionnement

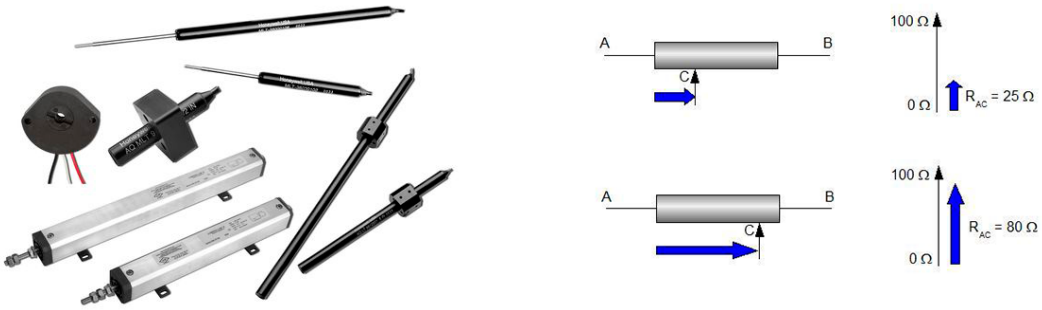


FIGURE 13 – Potentiomètres linéaires et principe de fonctionnement

4.4 Capteurs de vitesse

4.4.1 Génératrice tachymétrique

Machine à courant continu utilisée en génératrice (à vide). La mesure utilise la relation de couplage $E = k\Omega$. Nécessite en général un filtrage du signal.

FIGURE 14 – Exemples de génératrices tachymétriques

4.4.2 Codeur incrémental

Un codeur incrémental peut donner, par mesure de la fréquence des signaux de sortie A et B, une image de la vitesse angulaire.

FIGURE 15 – Exemples de codeurs incrémentaux

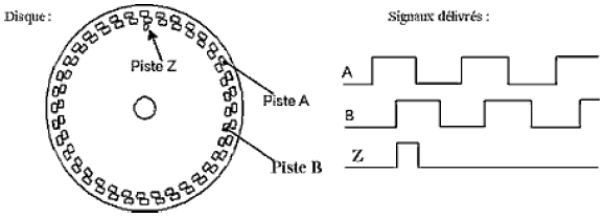


FIGURE 16 – Signaux types renvoyés par un codeur incrémental

4.4.3 Capteur de vitesse et déplacement embarqué

Technologie IR LEDs (Infrarouge à diode électroluminescente). Le capteur LFIIP mesure la vitesse entre 0,3 et 400 km/h et la distance parcourue. Sa précision est de 0,1 km/h et 0,1 % en mesure de distance.

Très robuste et léger, 250 g, le LFIIP fournit les données par les sorties analogiques, numériques (USB et RS232) et CAN.

Installation discrète sous châssis ou sous nez de Formule 1. Les parties optiques sont faces à la route, le cylindre vers l'avant.

FIGURE 17 – Capteur IR LED embarqué

4.5 Accéléromètres

Le principe de tous les accéléromètres est basé sur le Principe Fondamental de la Dynamique appliqué à la masse sismique du capteur : $\overrightarrow{F} = m\overrightarrow{\Gamma}$

Ce principe de base peut être décliné par un système masse/ressort ou un système pendulaire. Un accéléromètre est toujours composé d'une masse sismique qui lorsqu'elle est soumise à une accélération va se déplacer. Un élément sensible utilisant des technologies très différentes suivant les cas permet de mesurer ce déplacement et d'en déduire l'accélération galiléenne à laquelle est soumis le capteur.

Il existe un grand nombre d'accéléromètres non asservis différents :

- à détection piézoélectrique ;
- à détection piézorésistive ;
- à jauge de contrainte ;
- à détection capacitive (à diélectrique gaz) ;
- à détection inductive ;
- à détection optique ;
- à poutre vibrante ;
- à ondes de surface.

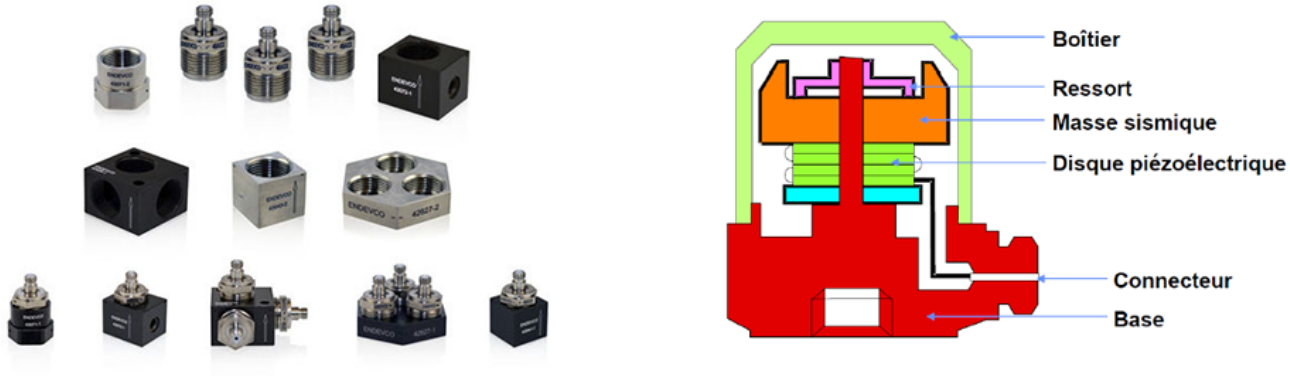


FIGURE 18 – Exemples d'accéléromètres et principe d'un accéléromètre piézoélectrique

4.6 Capteurs d'effort

Historiquement, les capteurs à jauges de contraintes sont les plus simples à fabriquer, donc les plus répandus, mais la maîtrise de la cristallisation a permis la fabrication de capteur piézoélectriques qui sont des solutions plus fiables et plus faciles à mettre en œuvre pour l'utilisateur.

4.6.1 Capteurs à jauges de contrainte

De son vrai nom : capteur à jauges d'extensiométrie. Collée sur un corps d'épreuve, la jauge subit une déformation qui fait varier la valeur de sa résistance.

La déformation du corps d'épreuve provoque un allongement relatif de la matière à la surface de celui-ci. C'est cette variation de longueur (en général, on a comme ordre de grandeur $\varepsilon \approx 10^{-6}$. Par conséquent, le fait de mesurer une déformation nécessite la mesure précise de très petites variations de la résistance.

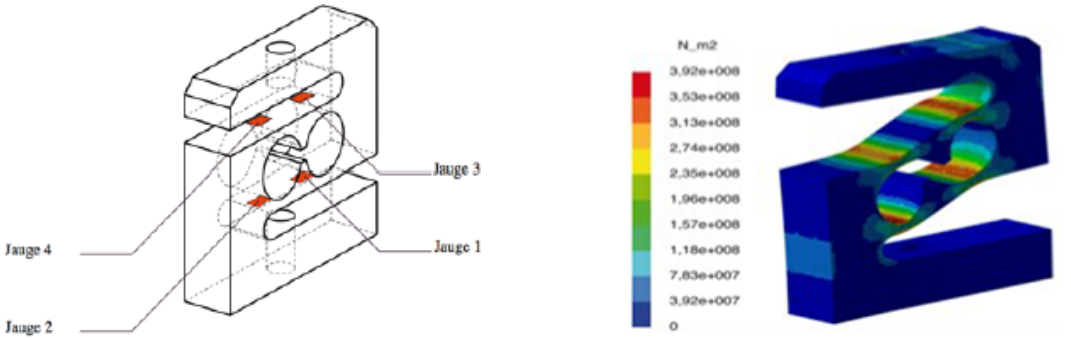


FIGURE 19 – Capteur d'effort avec ses jauges de contrainte. A droite, vue déformée du corps d'épreuve

Les jauges de contrainte sont presque toujours utilisées dans une configuration en pont avec une source d'excitation de tension. Le pont de Wheatstone se compose de quatre branches résistives avec une tension d'excitation, U_{a1}, appliquée sur le pont. Les jauges en diagonale sont sur la même face.

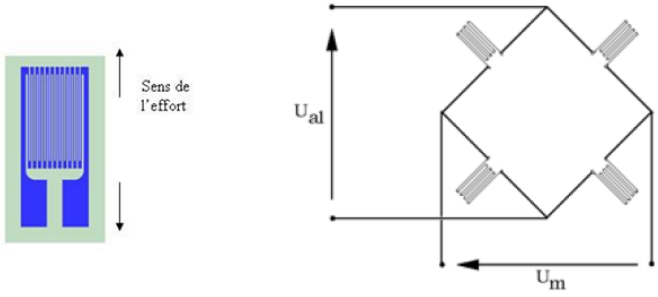


FIGURE 20 – Jauge de contrainte et pont de Wheatstone

4.6.2 Capteur piézoélectrique

La piézoélectricité est la propriété que possèdent certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique et réciproquement de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique.

De façon simple, on peut retenir que la charge électrique Q (Coulomb) qui apparait sur les électrodes du capteur est proportionnelle à l'effort F, soit $Q = kF$ avec k de l'ordre de $10 \cdot 10^{-10}\,\text{C.N}^{-1}$.

FIGURE 21 – Capteurs d'effort piézoéléctriques et principe de fonctionnement

4.7 Capteur de température

4.7.1 Thermistance

Une thermistance est un dispositif semi-conducteur composé d'oxydes métalliques compressés à hautes températures pour leur donner la forme d'une petite bille, d'un disque, d'une plaque ou toute autre forme. Enfin, elles sont recouvertes d'époxy ou de verre.

La valeur de leur résistance est une fonction de la température, croissante (CTP coefficient de température positif) ou décroissante (CTN).

4.7.2 Le thermomètre à résistance de platine

Plus connu sous le nom PT100 ($100\,\Omega$ à $0\,°\text{C}$) est une thermistance. Le platine permet une bonne reproductibilité du comportement du capteur et permet son échange sans réétalonnage.

4.7.3 Thermocouple

Les thermocouples sont les capteurs les plus souvent utilisés pour la mesure de températures, car ils sont relativement peu onéreux, tout en étant précis, et peuvent fonctionner sur une large gamme de températures. Un thermocouple est créé lorsque deux métaux différents entrent en contact, ce qui produit, au point de contact, une faible tension en circuit ouvert qui correspond à la température. Vous pouvez utiliser cette tension thermoélectrique, communément appelée tension Seebeck, pour calculer la température. Pour de petites variations de température, la tension est approximativement linéaire.

4.7.4 Thermomètre infrarouge

Un thermomètre infrarouge est un instrument de mesure de la température de surface d'un objet à partir de l'émission de lumière de type corps noir qu'il produit. Un thermomètre est parfois appelé à tort thermomètre laser s'il est aidé d'un laser pour viser, ou encore thermomètre sans-contact pour illustrer sa capacité à mesurer la température à distance. On utilise également le terme de pyromètre de manière à exprimer la différence avec un thermomètre à contact classique puisqu'il mesure le rayonnement thermique émis et non la température elle-même. En connaissant la quantité d'énergie émise par un objet, et son émissivité, sa température peut être déterminée.

La mesure IR est une mesure de surface : le point laser de cet appareil compact indique le point central de la zone circulaire de mesure.

Schématiquement, le procédé consiste à mesurer l'énergie lumineuse (située dans l'infrarouge) sur un détecteur permettant de la convertir en un signal électrique. Cette méthode permet de mesurer la température à distance, contrairement aux autres types de thermomètres comme les thermocouples

Références

[1] D. Guérin : Cours de génie Électrique, 2016. TSI1 - Lycée Eiffel - Dijon.
[2] Cours de génie Électrique, 2016. TSI1 - Lycée Jules Ferry - Versailles.
[3] Cours de génie Électrique, 2016. TSI1 - Lycée P.-P. Riquet - St-Orens de Gameville.
[4] Wikipédia : www.wikipedia.org.