

Chapitre 1. Les capteurs et chaîne d'acquisition

1. Introduction

Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services ...), on a besoin de contrôler de nombreux paramètres physiques (température, force, position, vitesse, ...). C'est le rôle du capteur que d'assurer cette duplication de l'information en la transférant, au point même où se fait la mesure, de la grandeur physique (non électrique) qui lui est propre, sur une grandeur électrique. Ce chapitre introduit la notion de la mesure, structure globale d'une chaîne de mesure complète : acquisition et restitution. Description des constituants d'une chaîne de mesure et circuits électroniques : éléments constitutifs d'une chaîne, le capteur (types, caractéristiques), électriques, différents types de capteurs (passif, actif), phénomènes physiques utilisés dans les capteurs (Loi d'induction électromagnétique, effet hall, effet thermoélectrique, effet magnéto-résistif, effet photoélectrique, effet piézo-électrique, effet doppler, ...),

2. Le système de mesure

2.1. Définition générale

Un système de mesure comprend un ensemble d'éléments (Figure 1). La grandeur physique à mesurer (appelée mesurande) est une valeur analogique qui n'est généralement pas exploitable directement. Cette grandeur physique peut-être une force, une température, ou toute autre grandeur doit être mesurée. Elle doit être convertie en une autre valeur analogique par l'élément de mesure (appelé capteur). Ce signal analogique à la sortie (appelé aussi réponse) du capteur peut être de nature électrique, est directement exploitable pour les indicateurs analogiques. Ce signal doit être converti en un signal numérique si on désire utiliser un affichage numérique. La conversion se fait par l'intermédiaire d'un convertisseur analogique-numérique.

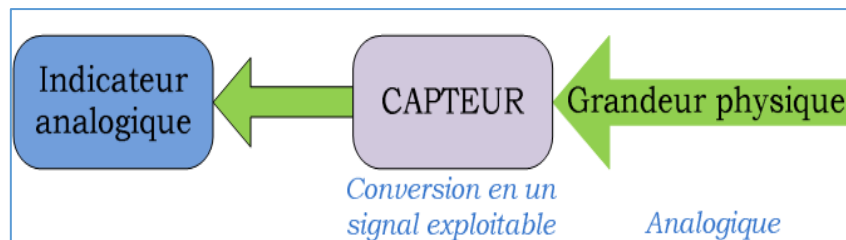


Figure 1: Schéma d'un système de mesure analogique.

2.2. Structure d'une chaîne d'acquisition numérique

Une chaîne d'acquisition recueille les informations nécessaires à la connaissance et au contrôle d'un procédé; elle délivre ces informations sous une forme appropriée à leur exploitation. La chaîne d'acquisition de données convertit le signal analogique de sortie du capteur en signal numérique et après traitement du signal numérique délivre un signal analogique.

Une chaîne de mesure est essentiellement constituée d'un capteur, d'un conditionneur, d'un dispositif de filtrage et amplification si nécessaire, d'un convertisseur analogique numérique, d'un système numérique de calcul puis du dispositif d'affichage (Figure 2).

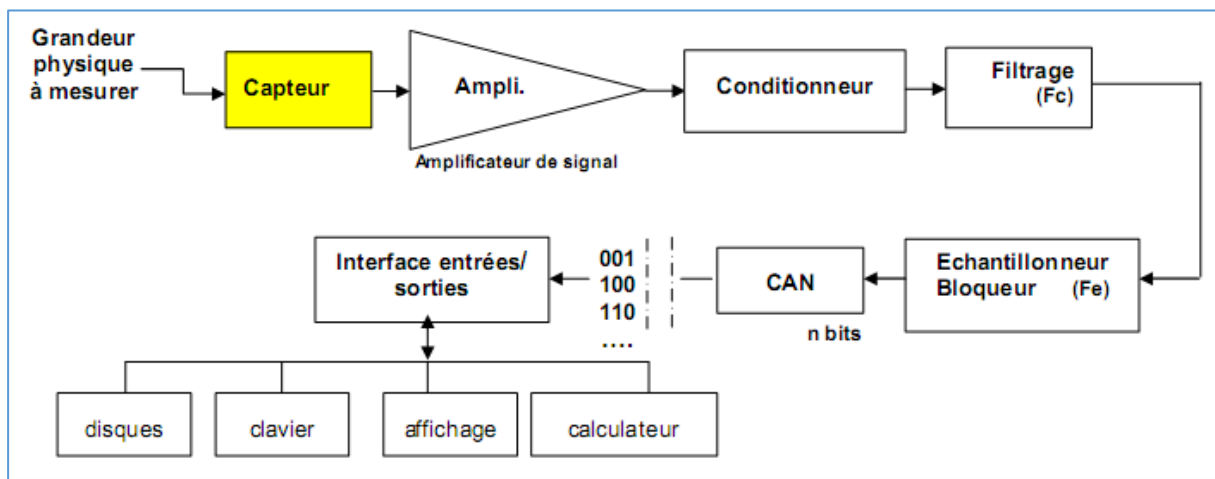


Figure 2 : Structure d'une chaîne d'acquisition numérique

La chaîne d'acquisition est souvent associée à une chaîne de restitution ; ce type de chaîne fonctionne dans le sens inverse de la précédente. Dans le cas d'un système de régulation d'une grandeur, la chaîne de restitution prend naissance dans une zone de stockage et est chargée, à partir d'un code numérique, de commander un organe de puissance appelé actionneur.

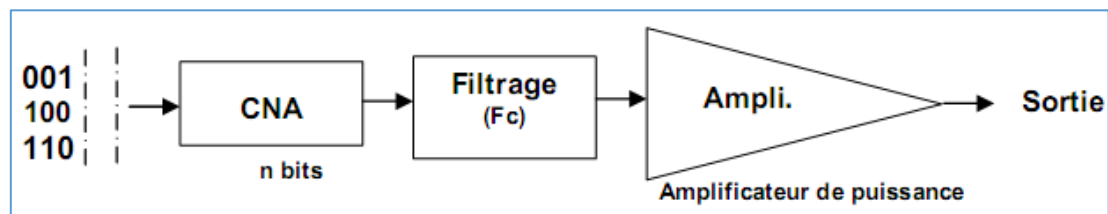


Figure 3 : Structure de la chaîne de restitution

Capteur : Il est l'interface entre le monde physique et le monde électrique.

Amplificateur de signal: Permet d'adapter le niveau du signal issu du capteur à la chaîne globale d'acquisition.

Conditionneur : Il converti en tension la grandeur de sortie du capteur, adapte l'impédance pour le capteur et limite l'amplification en mode commun.

Filtre d'entrée : Permet de limiter le contenu spectral du signal aux fréquences qui nous intéressent et élimine les parasites. C'est un filtre passe bas que l'on caractérise par sa fréquence de coupure et son ordre.

L'échantillonneur: Permet de prélever à chaque période d'échantillonnage (T_e) la valeur du signal. Il est associé à un bloqueur qui va bloquer l'échantillon pendant le temps nécessaire à la conversion (échantillonneur bloqueur).

Le convertisseur analogique numérique (CAN): Il transforme la tension de l'échantillon (analogique) en un code binaire (numérique).

Le convertisseur numérique analogique (CNA): Il effectue l'opération inverse du CAN, il assure le passage du numérique vers l'analogique.

Le filtre de sortie: Permet de lisser le signal de sortie pour ne restituer que le signal utile. Il a les mêmes caractéristiques que le filtre d'entrée.

Amplificateur de puissance: Il adapte la sortie du filtre à la charge.

La zone de stockage: Elle peut être un support de traitement (ordinateur, ...), un élément de sauvegarde (RAM, Disque dur) ou encore une transmission vers un récepteur situé plus loin.

3. Définitions et généralités sur les capteurs

3.1. Capteur

Un capteur est un transducteur capable de transformer une grandeur physique en une autre grandeur physique généralement électrique (tension) utilisable par l'homme ou par le biais d'un instrument approprié.

Les capteurs sont les éléments de base des systèmes d'acquisition de données. Leur mise en œuvre se situe dans le domaine de l'instrumentation. Le capteur est le 1^{er} élément d'une chaîne de mesure ou d'instrumentation.

Un capteur n'est jamais parfait, il convient de connaître avec la plus grande précision possible son état d'imperfection. De plus, il faut prendre en compte la perturbation apportée au système par la mesure (Figure 4).

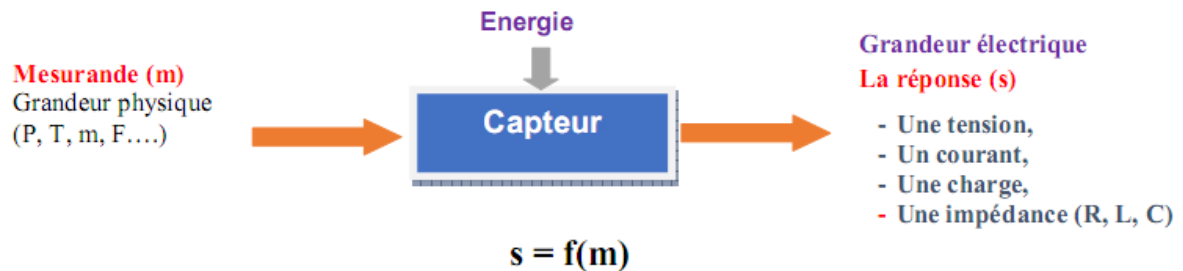


Figure 4 : Structure d'un capteur

Toute valeur de s doit permettre de remonter à chaque instant à une seule valeur de m et inversement. La relation $s = f(m)$ résulte dans sa forme théorique :

- Des lois physiques qui régissent le fonctionnement du capteur,
- Dans son expression numérique de sa construction « géométrie, dimension »,
- Des matériaux qui le constituent,
- Les caractéristiques de son environnement et 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 (Figure 5).

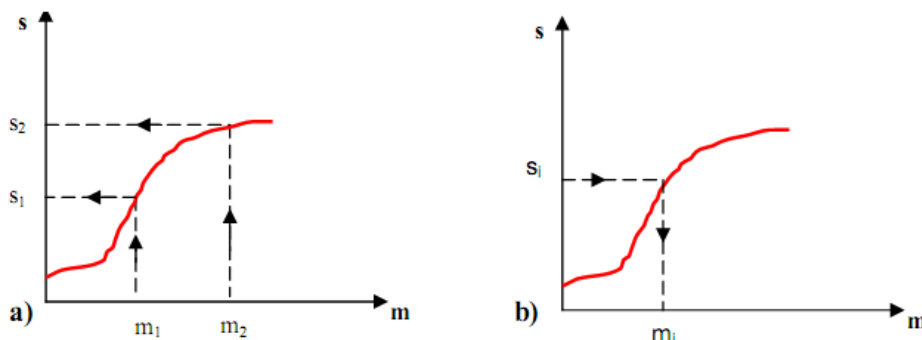


Figure 5 : Courbe d'étalonnage d'un capteur : a) son établissement à partir de valeurs connues du mesurande m ; b) son exploitation, à partir de valeurs mesurées de la réponse s du capteur.

On s'efforce de réaliser le capteur, ou du moins de l'utiliser, pour qu'il établisse une relation linéaire entre les variations Δs de la grandeur de sortie et celles Δm de la grandeur d'entrée.

$$\Delta s = S \cdot \Delta m$$

S est la sensibilité du capteur.

Le problème de la conception et l'utilisation d'un capteur est la constance de sa sensibilité S qui doit dépendre aussi peu que possible :

- De la valeur de m (linéarité) et de sa fréquence de variation (bande passante),
- Du temps (vieillessement),
- De l'action d'autres grandeurs physiques de son environnement (grandeurs 'influence).

3.2. Mesurande (m)

C'est la grandeur physique en général non électrique que l'on veut mesurer (déplacement, température, pression, ...). On peut distinguer plusieurs types de mesurandes (Figure 6):

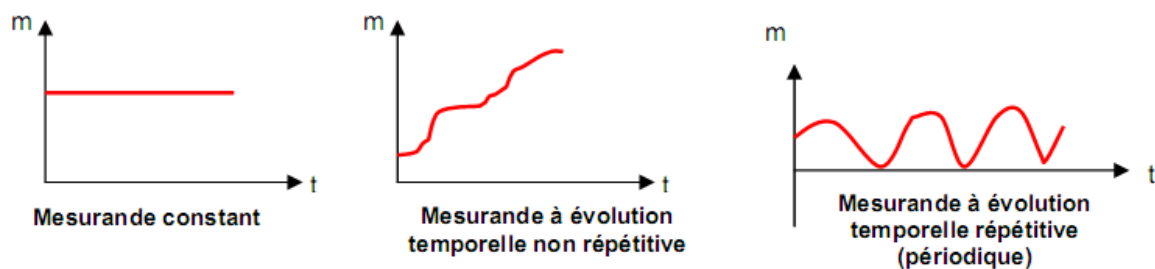


Figure 6 : Les types de mesurande.

3.3. Types de grandeur physique (Mesurande)

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

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

3.4. La Chaîne de mesure. Corps d'épreuve

La chaîne de mesure est constituée de l'ensemble des dispositifs, y compris le capteur, rendant possible dans les meilleures conditions la détermination précise de la valeur ou l'évolution du mesurande.

A l'entrée de la chaîne, le capteur soumis à l'action du mesurande permet d'injecter dans la chaîne le signal électrique (l'information liée au mesurande).

A la sortie de la chaîne, le signal électrique qu'elle a traité est converti sous une forme qui rend possible la lecture directe de la valeur cherchée du mesurande :

- Déviation d'un appareil à cadre mobile ;
- Enregistrement analogique graphique ou oscillographique ;
- Affichage ou impression d'un nombre

C'est l'étalonnage de la chaîne de mesure dans son ensemble qui permet d'attribuer à chaque indication en sortie la valeur correspondante du mesurande agissant à l'entrée.

La chaîne de mesure peut comporter uniquement un capteur, et à son conditionneur éventuel, associé à un appareil de lecture (thermocouple et voltmètre, jauge de contrainte placée dans un pont de Wheatstone, avec pour instrument de lecture un galvanomètre ou un voltmètre).

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. Le corps d'épreuve a pour fonction de transformer la grandeur à mesurer (mesurande) en une grandeur physique secondaire (mesurande secondaire) plus facile à mesurer (Figure 7).

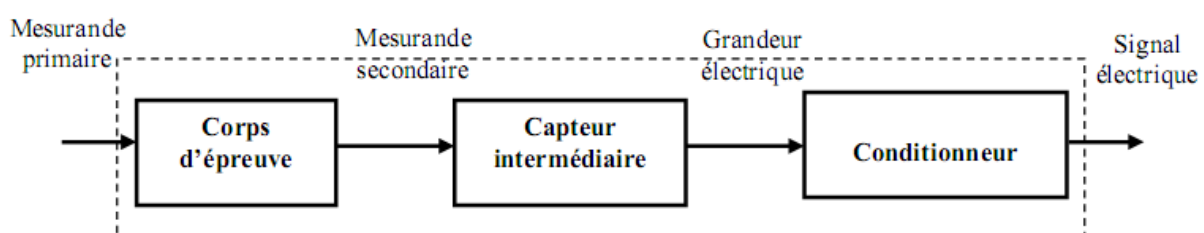


Figure 7 : Chaîne de mesure contenant un corps d'épreuve.

Exemple: Mesure d'une force mécanique : On utilise comme corps d'épreuve un élément élastique, respectant la loi linéaire (raideur constante). Le mesurande force est transformé en mesurande déplacement. Le capteur de force utilise ainsi les technologies du capteur de déplacement (Figure 8).

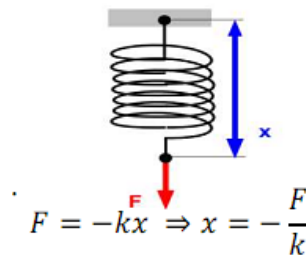


Figure 8 : Corps d'épreuve pour mesurer d'une force mécanique.

3.5. Grandeurs d'influence

Le capteur, de par ses conditions d'emploi, peut se trouver soumis non seulement au mesurande mais à d'autres grandeurs physiques dont les variations sont susceptibles d'entraîner un changement de la grandeur électrique de sortie qu'il n'est pas possible de distinguer de l'action du mesurande. Ces grandeurs physiques « parasites » auxquelles la réponse du capteur peut être sensible sont les grandeurs d'influence.

Les principales grandeurs d'influence sont :

- **La température** : qui modifie les caractéristiques électriques, mécaniques et dimensionnelles des composants du capteur ;
- **La pression, l'accélération et les vibrations** : susceptibles de créer dans certains éléments constitutifs du capteur des déformations et des contraintes qui altèrent la réponse ;
- **L'humidité** : à laquelle certaines propriétés électriques comme la constante diélectrique ou la résistivité peuvent être sensibles et qui risque de dégrader l'isolation électrique entre composants du capteur ou entre le capteur et son environnement ;
- **Les champs magnétiques variables ou statiques** : les premiers créent des f.é.m. d'induction qui se superposent au signal utile, les seconds peuvent modifier une propriété électrique, comme la résistivité lorsque le capteur utilise un matériau magnéto résistant ;
- **La tension d'alimentation-amplitude et fréquence** : comme le transformateur différentiel, la grandeur électrique de sortie en dépend de par le principe même du capteur.

Si l'on désigne par g_1, g_2, \dots Les grandeurs d'influence, la relation entre grandeur électrique de sorties et mesurande m , qui dans le cas idéal serait : $s=f(m)$ devient $s=f(m, g_1, g_2, \dots)$.

Afin de pouvoir déduire de la mesure de s la valeur de m , il est donc nécessaire :

- Soit de réduire l'importance des grandeurs d'influence au niveau du capteur en le protégeant par un isolement adéquat : supports antivibratoires, blindages magnétiques ;
- Soit de stabiliser les grandeurs d'influence à des valeurs parfaitement connues et d'étalonner le capteur dans ces conditions de fonctionnement : enceinte thermostatée ou à hygrosocopie contrôlée, sources d'alimentation régulées ;
- Soit enfin d'utiliser des montages qui permettent de compenser l'influence des grandeurs parasites : pont de Wheatstone avec un capteur identique placé dans une branche adjacente au capteur de mesure.

4. Différents types de capteurs

4.1. Capteurs passifs

Il s'agit d'impédances dont l'un des paramètres déterminants est sensible au mesurande. La variation d'impédance peut donc être due à l'action du mesurande :

- ❖ Soit sur les caractéristiques géométriques ou dimensionnelles ;

- ❖ Soit sur les propriétés électriques des matériaux : résistivité p , perméabilité magnétique μ , constante diélectrique c .
- ❖ Soit plus rarement sur les deux simultanément.

Les paramètres géométriques ou dimensionnels de l'impédance peuvent varier si le capteur comporte soit un élément mobile, soit un élément déformable. **Dans le premier cas**, à chaque position de l'élément mobile correspond une valeur de l'impédance et la mesure de celle-ci permet de connaître la position; c'est le principe d'un grand nombre de capteurs de position ou de déplacement: potentiomètre, inductance à noyau mobile, condensateur à armature mobile. **Dans le second cas**, la déformation résulte de forces ou de grandeurs s'y ramenant (pression, accélération, ...) appliquées soit directement ou indirectement au capteur : armature d'un condensateur soumis à une pression différentielle, jauge, d'extensométrie liée rigidement à une structure soumise à contrainte. La modification d'impédance qu'entraîne la déformation du capteur est liée aux efforts auxquels celui-ci ou la structure intermédiaire se trouve soumis et elle en assure une traduction électrique.

Les propriétés électriques des matériaux, selon la nature de ces derniers, peuvent être sensibles à des grandeurs physiques variées : température, éclairage, pression, humidité Si l'une seule de ces grandeurs est susceptible d'évolution, toutes les autres étant maintenues constantes il s'établit une correspondance univoque entre la valeur de cette grandeur et celle de l'impédance du capteur. La courbe d'étalonnage traduit cette correspondance et permet, à partir de la mesure de l'impédance de déduire la valeur de la grandeur physique agissante qui est le mesurande.

Le tableau 1 donne un aperçu des divers mesurandes susceptibles de modifier les propriétés électriques de matériaux employés pour la réalisation de capteurs passifs ; on remarque, en particulier, la place importante des capteurs résistifs.

L'impédance d'un capteur passif et ses variations ne sont mesurables qu'en intégrant le capteur dans un circuit électrique, par ailleurs alimenté et qui est son conditionneur. Les types de conditionneurs le plus généralement utilisés sont :

- Le montage potentiométrique : association en série d'une source, du capteur et d'une impédance qui peut être ou non de même type ;
- Le pont d'impédances dont l'équilibre permet la détermination de l'impédance du capteur ou dont le déséquilibre est une mesure de la variation de cette impédance ;
- Le circuit oscillant qui contient l'impédance du capteur et qui est partie d'un oscillateur dont il fixe la fréquence ;
- L'amplificateur opérationnel dont l'impédance du capteur est l'un des éléments déterminants de son gain.

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 dépendent un certain nombre de performances de l'ensemble de mesure : sensibilité, linéarité, insensibilité à certaines grandeurs d'influence.

4.2. Capteurs actifs

Fonctionnant en générateur, un capteur actif est généralement fondé dans son principe sur un effet physique qui assure la conversion en énergie électrique de la forme d'énergie propre au mesurande : énergie thermique, mécanique ou de rayonnement. Les plus importants parmi ces effets sont regroupés tableau 2.

Mesurande	Caractéristique électrique sensible	Types de matériaux utilisés
Température Très basse température	Résistivité Constante diélectrique	Métaux : platine, nickel, cuivre, Semi-conducteurs. Verres.
Flux de rayonnement optique	Résistivité	Semi-conducteurs.
Déformation	Résistivité Perméabilité magnétique	Al liages de nickel, silicium dopé. Alliages ferromagnétiques
Position (aimant)	Résistivité	Matériaux magnéto-résistants bismuth, antimoine d'indium.
Humidité	Résistivité Constante diélectrique	Chlorure de lithium. Alumine ; polymères.
Niveau	Constante diélectrique	Liquides isolants.

Tableau 1 : Capteurs passifs : principes physiques et matériaux.

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

Tableau 2- Capteurs actifs: principes physiques de base.

4.3. 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. Le corps d'épreuve est le dispositif qui, soumis au mesurande étudié en assure une première traduction en une autre grandeur physique non-électrique, le mesurande secondaire, qu'un capteur adéquat traduit alors en grandeur électrique (Figure 9). L'ensemble formé par le corps d'épreuve et un capteur actif ou passif constitue un capteur composite.

Les corps d'épreuve sont très utilisés pour la mesure de grandeurs mécaniques celles-ci imposent au corps d'épreuve des déformations ou des déplacements aux-quels un capteur approprié est sensible, par exemple, une traction F exercée sur une barre (longueur L , section A , module d'Young Y) entraîne une déformation $\Delta L/L$ qui est mesurable par la variation $\Delta R/R$ de la résistance d'une jauge collée sur la barre ; connaissant :

- D'une part, l'équation du corps d'épreuve qui lie la traction mesurande primaire à la déformation mesurande secondaire :

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{Y} \cdot \frac{F}{A}$$

- Et d'autre part l'équation du capteur liant sa grandeur d'entrée, ici la déformation, à sa réponse électrique $\Delta R/R$ soit :

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

K étant le facteur de jauge,

- On en déduit la relation entre traction et variation de résistance :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{K}{Y} \cdot \frac{F}{A}$$

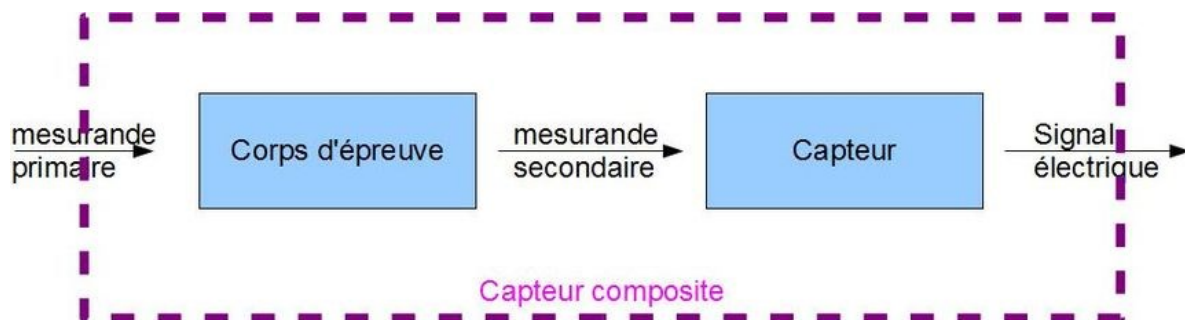


Figure 9 : Structure d'un capteur composite.

La relation qu'établit le corps d'épreuve entre les mesurandes primaire et secondaire est très souvent linéaire : c'est le cas en particulier pour les déplacements et déformations résultant de contraintes mécaniques, à condition que ne soit pas dépassée la limite d'élasticité du corps d'épreuve. Les performances de l'association corps d'épreuve-capteur doivent être déterminées par un étalonnage global de l'ensemble qu'ils constituent afin qu'il soit tenu compte des modifications éventuelles que leur montage et leur liaison apportent à leurs caractéristiques individuelles « à vide ».

4.4. Capteurs intégrés

Un capteur intégré est un composant réalisé par les techniques de la microélectronique et qui regroupe sur un substrat de silicium commun le capteur proprement dit, le corps d'épreuve éventuel, des circuits électroniques de conditionnement du signal (Figure 10).

L'intégration apporte de multiples avantages : miniaturisation, diminution des coûts par la fabrication en grande série, accroissement de la fiabilité par suppression de nombreuses connexions soudées, interchangeabilité améliorée, meilleure protection vis-vis des parasites, le signal étant conditionné à sa source.

L'utilisation sur silicium impose cependant une limitation de la plage d'emploi de -50°C à 150°C environ.

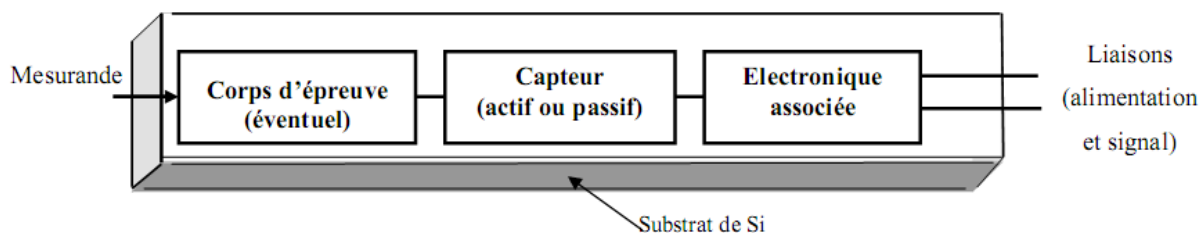


Figure 10 : Structure générale d'un capteur intégré

Le capteur proprement dit met généralement à profit la sensibilité du silicium à diverses grandeurs physiques ; cette sensibilité, par ailleurs déjà souvent exploitée pour la réalisation de capteurs isolés, peut être mise en œuvre sous forme de capteurs résistifs, capacitifs ou moyen de diodes et de transistors.

L'emploi de corps d'épreuve en silicium est justifié par les propriétés mécaniques excellentes du cristal : domaine élastique étendu, module d'Young comparable à celui de l'acier et limite de fatigue très élevée. La fabrication des corps d'épreuve est rendue possible grâce aux techniques de micro-usinage chimique.

Les circuits électroniques associés au capteur sont réalisés selon les techniques classiques de fabrication des circuits intégrés : ils comportent selon les cas : des circuits de compensation thermique, de linéarisation, d'amplification, de transmission par conversion tension-fréquence, ou tension-courant....

Exemples : Capteurs à base de silicium : Résistance thermométriques, Jauges extenso métriques, Photo diodes et phototransistors, ...). Capteurs magnétiques d'angle AMR intégrés ADA4571 est constitué de capteurs à magnétorésistance anisotrope (AMR) avec amplificateurs de conditionnement du signal et pilotes CAN intégrés (Figure 11).

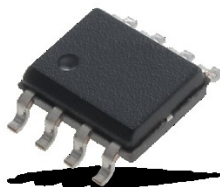


Figure 11 : Capteurs magnétiques d'angle AMR intégrés ADA4571.

4.5. Capteurs Intelligents

On désigne par capteur intelligent l'ensemble de mesure d'une grandeur physique constitué de deux parties (Figure 12) :

- Une chaîne de mesure pilotée par microprocesseur,
- Une interface de communication bidirectionnelle.

La chaîne de mesure comporte :

- Le capteur principal spécifique du mesurande étudié, et identifiable par un code stocké en PROM.
- Les capteurs secondaires propres aux grandeurs d'influence susceptibles d'affecter la réponse du capteur principal.
- Les dispositifs classiques permettant l'obtention sous forme numérique de la grandeur de sortie de chaque capteur : conditionneur, multiplexeur, amplificateur, échantillonneur - bloqueur, convertisseur analogique-numérique.
- Un microprocesseur assurant les tâches suivantes : gestion de l'acquisition, correction de l'effet des grandeurs d'influence au moyen des paramètres stockés en PROM et des données fournies par les capteurs secondaire, linéarisation, diagnostic des capteurs.

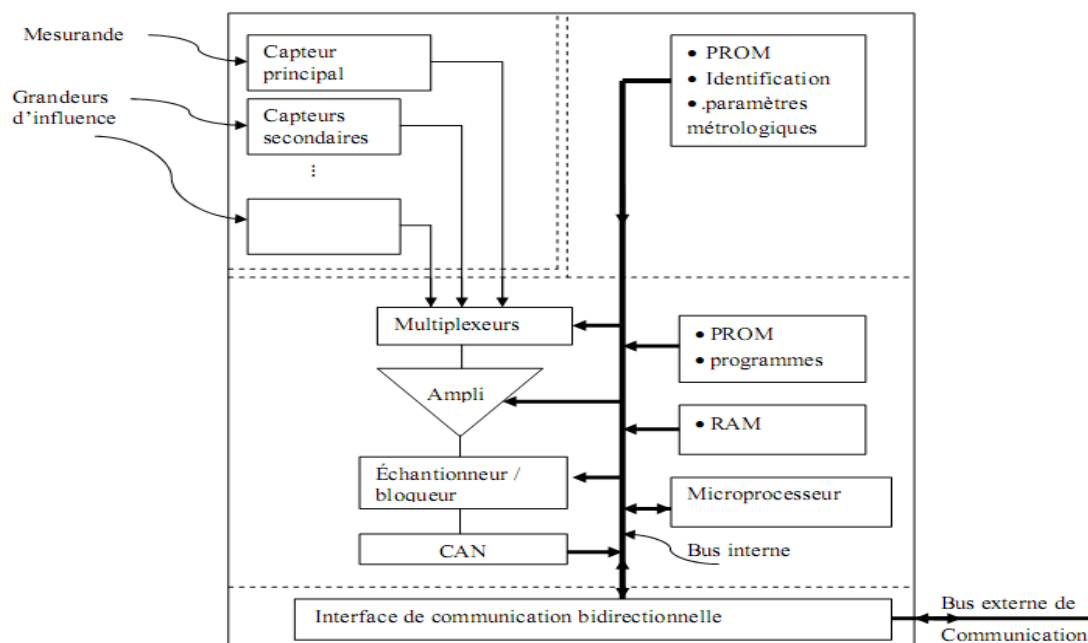


Figure 12 : Structure générale d'un capteur intelligent

L'interface de communication bidirectionnelle assure la liaison du capteur à un ordinateur central via un bus partagé entre plusieurs capteurs intelligents (Figure 12).

Les messages porteurs du code du capteur concerné transitent par l'interface soit dans le sens ordinateur vers capteur : configuration, auto étalonnage ..., soit dans le sens capteur vers ordinateur : résultats de mesure, état de la chaîne (étendue de mesure, dépassements de gamme du mesurande ou d'une grandeur d'influence ...).

Le capteur intelligent offre des avantages spécifiques : configurabilité à distance ; crédibilité accrue des mesures et aide à la maintenance grâce aux informations d'état fournies ; réparation des tâches, déchargeant le ordinateur central (Figure 13).

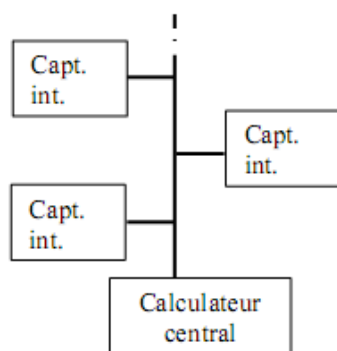


Figure 13 : Liaison par bus d'un ensemble de capteurs intelligents à un ordinateur central.

5. Phénomènes physiques utilisés dans les capteurs

5.1. Effet thermoélectrique

Un circuit formé de deux conducteurs de nature chimique différente dont les jonctions (les jonctions froide et chaude) sont à des températures T_1 et T_2 est le siège d'une force électromotrice $e(T_1, T_2)$.

Application : détermination à partir de la mesure de e d'une température inconnue T_1 lorsque T_2 (0°C par exemple) est connue (Figure 14)

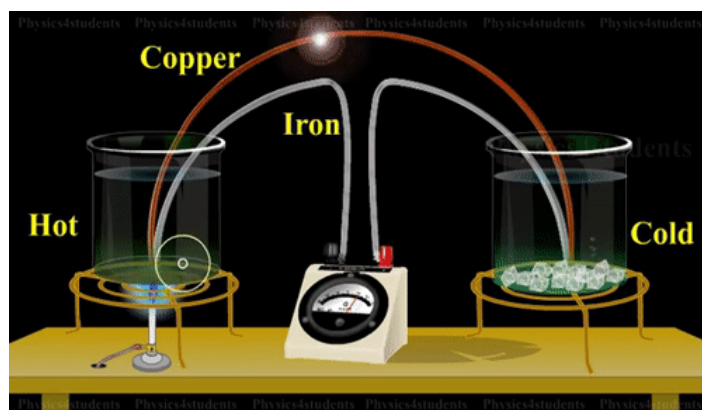
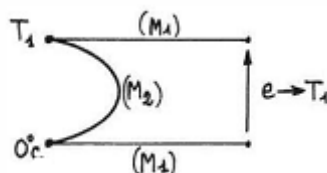


Figure 14 : Effet thermoélectrique

Considérons maintenant 2 matériaux des semi-conducteurs a et b respectivement de type n et de type p . L'effet Seebeck s'explique par la diffusion de porteur de charge, e^- (électrons) ou e^+ (trou) du côté chaud vers le côté froid. Pour un circuit ouvert les e^- (électrons) se massent dans la partie froide du matériau de type n alors que les e^+ (trou) se massent dans la partie froide

du matériau de type p. La partie froide du semi-conducteur n sera donc polarisée négativement et celle du semi-conducteur p positivement. Nous sommes donc en présence d'une différence de charges qui a pour effet de créer une différence de potentiel entre les 2 extrémités froides de ces matériaux (Figure 15).

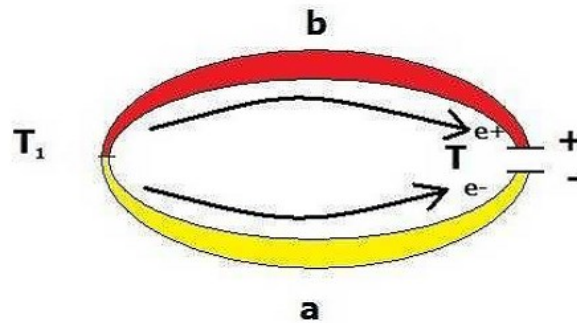


Figure 15 : Effet de Seebeck

L'application principale de cet effet est la mesure de température. En effet pour 2 matériaux donnés la différence de tension ne dépend que de la différence de température. On peut donc déduire de la fém mesurée l'écart de température entre les 2 jonctions.

L'effet inverse de l'effet Seebeck est l'effet Peltier : le passage d'un courant dans une jonction de deux matériaux provoque la diminution ou l'augmentation de température de cette jonction. L'effet Thomson est l'apparition d'un fém. le long d'un conducteur lorsque celui-ci est soumis à un gradient de température (Figure 16).

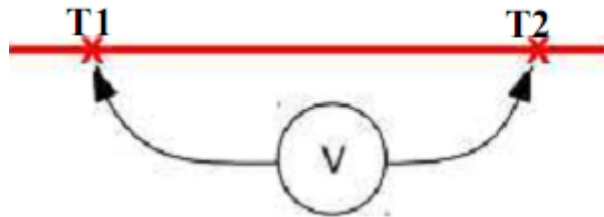


Figure 16 : Effet Thomson

5.2.Effet pyroélectrique

Certains cristaux dits pyroélectriques, le sulfate de triglycine par exemple, ont une polarisation électrique spontanée qui dépend de leur température; ils portent en surface des charges électriques proportionnelles à cette polarisation et de signes contraires sur les faces opposées.

Application : un flux de rayonnement lumineux absorbé par un cristal pyroélectrique élève sa température ce qui entraîne une modification de sa polarisation qui est mesurable par la variation de tension aux bornes d'un condensateur associé (Figure 17).

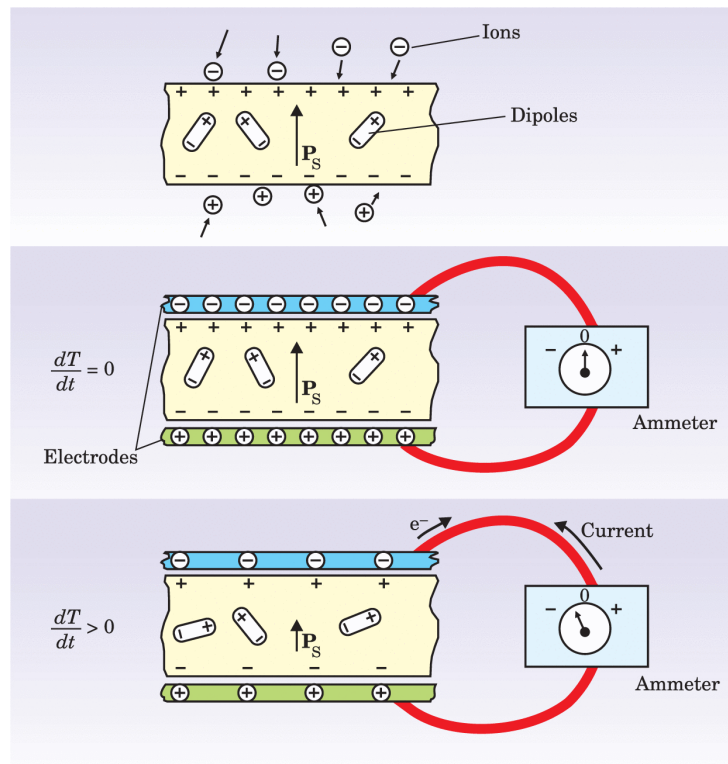


Figure 17 : Effet pyroélectrique

5.3.Effet piézoélectrique

L'application d'une force et plus généralement d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézoélectriques, le quartz par exemple, entraîne une déformation qui suscite l'apparition de charges électriques égales et de signes contraires sur les faces opposées (Figure 18).

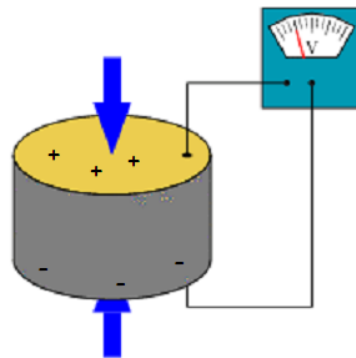


Figure : 18 : Effet piézoélectrique

Effet direct de la piézo-électricité : **FORCE** \Rightarrow **DEFORMATION** \Rightarrow **TENSION**.

Inversement le cristal se déforme lorsqu'on lui applique une tension électrique : c'est l'effet inverse de la piézo-électricité. Effet inverse de la piézo-électricité :

TENSION \Rightarrow **DEFORMATION**

La piézo-électricité du quartz a été découverte en 1880 par les frères Pierre et Jacques Curie. Ils ont montré que le quartz soumis à une tension électrique, vibre à une fréquence très stable et bien définie. C'est pour cette propriété que le quartz est utilisé pour fabriquer les montres et les horloges : en appliquant au quartz une tension provenant d'une pile, celui-ci vibre et permet la mesure du temps.

On peut citer principalement :



Figure 19 : Matériau piézoélectrique

Application : L'effet piézo-électrique trouve un très grand nombre d'applications dans la vie quotidienne et dans l'industrie :

- Mesure de forces ou de grandeurs s'y ramenant (pression, accélération) à partir de la tension que provoquent aux bornes d'un condensateur associé à l'élément piézoélectrique les variations de sa charge.
- Une application parmi les plus familières est le briquet. Dans un briquet, la force exercée sur le cristal piézo-électrique produit une tension électrique qui se décharge brutalement sous forme d'étincelles.
- Le Capteur de pression piézoélectrique est une application industrielle : ils sont notamment utilisés pour l'automobile (mesure de la pression des pneus...), l'aéronautique (mesure de la pression dans les tuyères...), ainsi que pour les mesures de niveau.
- La piézo-électricité est également utilisée en acoustique pour transformer des ondes acoustiques en signal électrique : microphones, haut-parleurs...



5.4.Effet d'induction électromagnétique

Lorsqu'un conducteur se déplace dans un champ d'induction fixe, il est le siège d'une f.é.m. proportionnelle au flux coupé par unité de temps, donc à sa vitesse de déplacement. De même, lorsqu'un circuit fermé est soumis à un flux d'induction variable du fait de son déplacement ou de celui de la source de l'induction (aimant par exemple), la f.é.m. dont il est le siège est égale (et de signe contraire) à la vitesse de variation du flux d'induction (Figure 20).

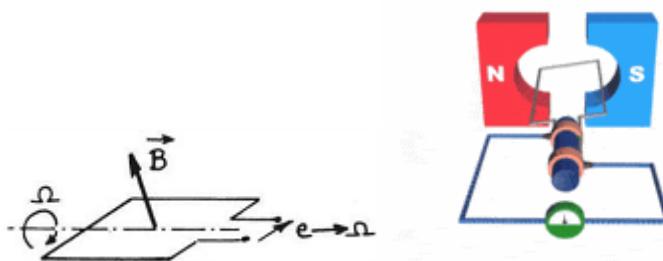


Figure 20 : Effet d'induction magnétique.

Application

- La mesure de la f.é.m. d'induction permet de connaître la vitesse du déplacement qui est à son origine.
- Tachymétrie (génératrice tachymétrique) : Elle délivre une tension proportionnelle à sa vitesse de rotation. Son principal domaine d'application se situe dans la régulation de vitesse d'un moteur électrique (Figure 21).



Figure 21: génératrice tachymétrique

5.5.Effets photoélectriques

Dans la matière, les électrons liés aux atomes peuvent devenir libres si on leur apporte une énergie E supérieure à leur énergie de liaison E_l . L'absorption d'un photon provoquera la libération d'un électron à condition que $E_{\text{photon}} > E_l$.

Sous l'influence d'un rayonnement lumineux, le matériau libère des charges électriques et celles-ci en fonction du rayonnement. L'effet photoélectrique entraîne une modification des propriétés électroniques du matériau et est le principe de base des capteurs optiques.

On désigne sous le nom d'effet photoélectrique tous les phénomènes électriques qui sont provoqués par l'action de la lumière sur la matière. L'absorption de lumière par un solide peut entraîner l'éjection d'électrons dans le vide ou dans le milieu qui est en contact avec lui : on parle alors d'émission photoélectrique. L'absorption de lumière peut également augmenter la conductibilité d'un corps : on parle alors de photoconductivité. Certaines chaînes de conducteurs éclairées de façon appropriée font apparaître des forces électromotrices d'où il résulte une transformation directe d'énergie lumineuse en énergie électrique : on parle alors d'effets photovoltaïques. Les effets photoélectriques sont le plus souvent observés dans les solides ; ils peuvent cependant aussi concerner les liquides et les gaz (Figure 22).

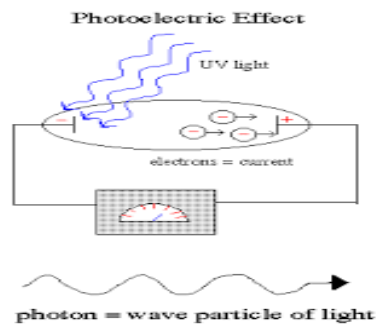


Figure 22: Effet photoélectriques.

Applications : Les effets photoélectriques qui permettent d'obtenir courant ou tension en fonction de l'éclairement d'une cible sont à la base de méthodes de mesure des grandeurs photométriques d'une part, et ils assurent d'autre part, la transposition en signal électrique des informations dont la lumière peut être le véhicule.

- Cellule photoélectrique : Capteur photosensible dont la résistance varie selon l'exposition à la lumière. Cette cellule est utilisée par exemple pour activer des systèmes d'éclairage automatisés (Figure 23).



Figure 23: Détecteur de luminosité.

- Cellule photovoltaïque : Composante électronique qui génère une tension électrique de l'ordre de 0,5 V lorsqu'elle est exposée à la lumière. Cette cellule est utilisée par exemple dans les panneaux solaires (Figure 24).



Figure 24: Panneau solaire

5.6.Effet Hall

L'effet Hall est un phénomène qui a été découvert par Edwin Hall en 1879. Il a remarqué que lorsque le courant circule à travers un conducteur et est exposé à un champ magnétique, la tension présente est perpendiculaire au courant et au champ magnétique. La découverte de cet effet nous a permis de détecter facilement des champs magnétiques (Figure 25).

Un matériau, généralement semi-conducteur et sous forme de plaquette, est parcouru par un courant I et soumis à une induction B faisant un angle θ avec le courant. Il apparaît, dans une direction perpendiculaire à l'induction et au courant, une tension V_H qui a pour expression :

$$v_H = K_H \cdot I \cdot B \cdot \sin \theta$$

Où K_H dépend du matériau et des dimensions de la plaquette.

Application : un aimant lié à l'objet dont on veut connaître la position détermine les valeurs de B et θ au niveau de la plaquette : la tension V_H qui par ce biais est fonction de la position de l'objet en assure donc une traduction électrique.

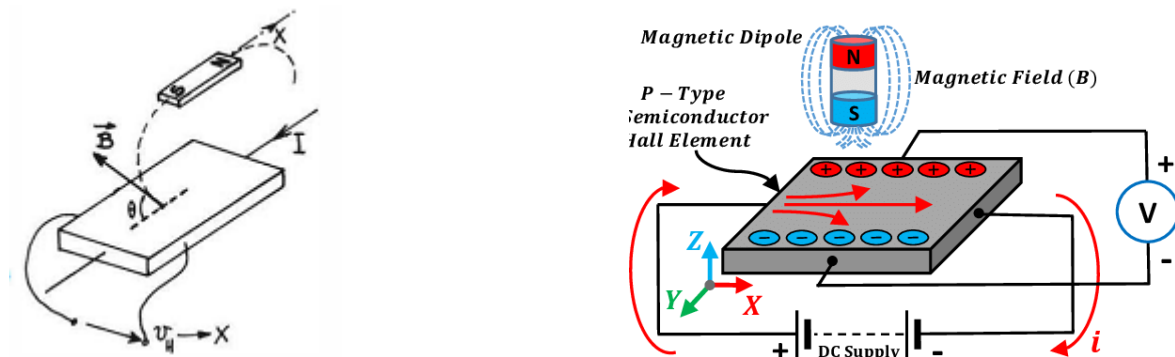


Figure 25 : Effet Hall.

Nous utilisons aujourd'hui cet effet pour diverses applications de détection (proximité, position, courant, vitesse de rotation), mais également pour des applications de commutation. L'utilisation de capteurs à effet Hall présente de nombreux avantages. Il s'agit de capteurs statiques (sans aucun rebondissement des contacts) qui présentent une durée de vie plus longue

et qui peuvent être utilisés dans des applications haute vitesse. Ils peuvent également être utilisés dans des conditions difficiles, avec un niveau de prix inférieur à celui d'un commutateur mécanique (Figure 26).

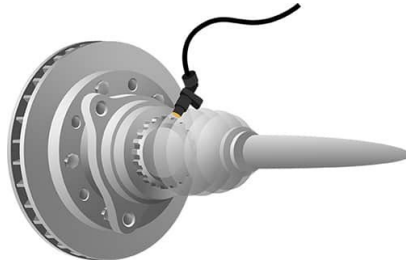


Figure 26 : Capteur à effet Hall

L'image ci-dessus est un exemple d'application de capteur à effet Hall courant. Dans cet exemple, un capteur à effet Hall est placé entre un aimant et les dents de l'engrenage de l'essieu d'une voiture. À chaque passage d'une dent, le champ magnétique fluctue et déclenche le capteur. Cet effet est utilisé pour calculer la vitesse et aide également les systèmes de contrôle de la traction à déterminer si les roues tournent de façon synchronisée.

Il peut également être utilisé pour déterminer la proximité ou la position en fonction de la force du champ magnétique, comme un commutateur, et pour détecter le courant. Les capteurs à effet Hall constituent une solution économique et efficace pour de nombreuses applications. Remarque : les capteurs basés sur l'effet Hall peuvent être classés parmi les capteurs actifs puisque l'information est liée à une f.é.m.; ce ne sont cependant pas des convertisseurs d'énergie car c'est la source du courant I et non le mesurande qui délivre l'énergie liée au signal.

5.7.Effet Doppler

L'effet Doppler est présent dans notre quotidien : radar, sirène d'un camion en mouvement... Cet effet se manifeste aussi bien par les ondes sonores que les ondes lumineuses. On suppose une source S émettant une onde dans l'air, de longueur d'onde λ_s de vitesse v_s . Simultanément, la source se déplace avec une vitesse v (Figure 27):

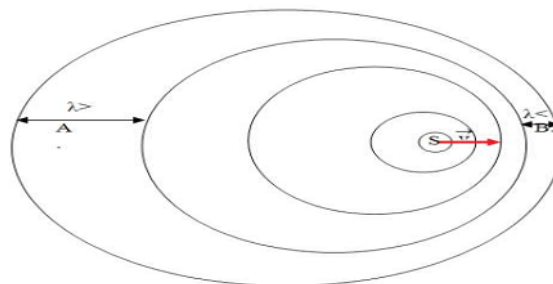


Figure 27 : Effet Doppler.

Lorsque la source se rapproche de l'observateur B , les ondes émises par la source ont une longueur d'onde λ inférieure à λ_s . Réciproquement, l'observateur A reçoit des ondes dont la longueur λ est supérieure à λ_s .

Oa ainsi, entre la fréquence de l'émission $f_s = v_s / \lambda_s$ et la fréquence $f = v_s / \lambda$ de l'onde reçue par les observateurs, les relations :

Pour l'observateur A : $f = f_s \times (1 - \frac{v_s}{v})$, on a alors $f < f_s$.

Pour l'observateur B : $f = f_s \times (1 + \frac{v_s}{v})$, on a alors $f > f_s$.

6. Conclusion

Le premier chapitre donne un aperçu général sur les capteurs et chaîne d'acquisition ainsi qu'elle présente les différents types de capteurs exprimant leurs phénomènes physiques utilisés dans les capteurs.