I. Introduction

Les moyens de détection traditionnels des phénomènes physiques autant qu'être humain sont basés sur la sensation.

Soit sans contact :

- **L'œil** : pour détecter la lumière et identifier les objets (et leurs formes sans dimensionnement exacte)
- **L'oreille** : pour détecter le son
- **L'odorat**: pour la détection de l'odeur

Soit avec contact :

- **Le goût :** pour percevoir les saveurs (sucré, salé, amer, ...)
- **Le touché** (moyen perception tactile) : sensations de contact, de pression, de froid, de chaleur et de douleur parviennent par la peau (à travers l'épiderme et le derme)

L'inconvénient des moyens humains cités ci-dessus est qu'ils ne permettent pas de tolérer, d'une manière précise, l'ordre de grandeur du phénomène. C'est pour cela, nous somme appelé à utiliser d'autres moyens assurant plus de robustesse et de précision. Ces moyens sont les **« capteurs »**.

Définition : Capteur et transducteur

- **Le capteur: permet de convertir le phénomène physique (non électrique) à une grandeur électrique souvent courant ou tension (voir figure ci-dessous).**
  Exemple : température-tension

- **Le transducteur : Convertir un type d'énergie en un autre.**

Remarque

- **Un transducteur est considéré comme capteur, lorsqu'il convertit une quantité mesurable (niveau de pression acoustique (microphone), intensité optique (lampe), champ magnétique (moteur), etc.) en un signal électrique.**
- **Lorsque le transducteur convertit un signal électrique en une autre forme d'énergie, telle que le son (qui, soit dit en passant, est un champ de pression), mouvement mécanique léger, il est considéré comme actionneur.**

Figure I.1. Exemple de trois types de transducteurs : lampe ; microphone et moteur.

II. Chaine de mesure ou d'instrumentation

On appel chaine de mesure ensemble d'appareils (blocs) ou opérations pour but de détecter une grandeur physique (voir figure I.2). Le premier élément de la chaine de mesure en contact direct avec le phénomène physique est le capteur.

- **Le bloc de mise en forme:** le signal issu du capteur peut être un étage d'amplification (parce que le signal a une faible amplitude) ou un étage de filtrage (le signal issu du capteur est souvent noyé dans le bruit).
- **Bloc de transmission :** Quelque soit le type du capteur avec contact ou sans contact, l'information issu du bloc précédent nécessite d'être transmis à l'étage de traitement par un moyen filaire ou sans fil.
- **Bloc de conversion analogique-numérique (A/N) :** Généralement le signal fournit par un capteur est de type analogique, donc pour effectuer un traitement numérique du signal un convertisseur analogique numérique est nécessaire. Par la suite le signal traité subira d'autres opérations telles que l'affichage, le

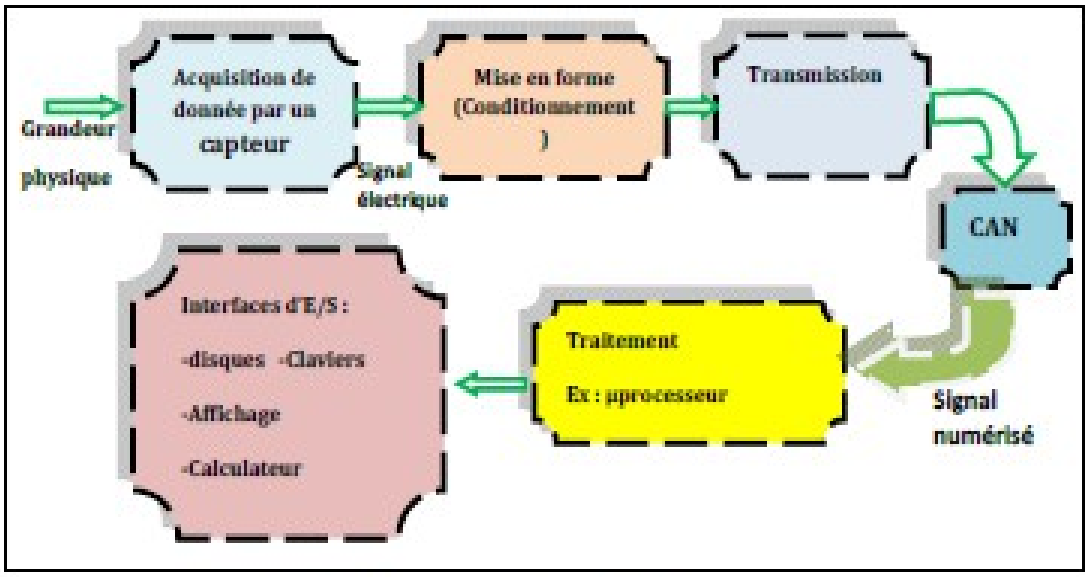


Figure I.2. Schéma bloc d'une chaine de mesure

III. Les types des capteurs

Selon la fonction à réaliser, le type du mesurande et la manière avec la quelle le capteur est construit, on distingue deux types de capteurs:

III.1. Capteurs passifs

Un capteur passif exploite la variation des paramètres géométriques et physiques des impédances (résistances, inductances et capacités) pour la détection des phénomènes.

Exemples

- Utilisation de la résistance comme capteur de lumière, de température, de pression, de niveau ou de déplacement. La mesure est basé sur la variation de l'un des paramètres géométriques (longueur : l et/ou section : S) ou physiques (résistivité : ρ) de la résistance telle que :

$$R = \frac{\rho l}{s} \qquad \text{(I.1)}$$

- Utilisation de la capacité comme capteur de niveau, de déplacement ou d'humidité. La mesure est basé sur la variation de l'un des paramètres

géométriques (la surface : S ou l'épaisseur entre armature : d) ou physique (permittivité du matériau :ε) de la capacité.

$$C = \frac{\varepsilon S}{d} \qquad \textbf{(I.2)}$$

- Utilisation de la bobine comme capteur de vitesse, de champ, de présence ou de niveau. La mesure est basé sur la variation de l'un des paramètres géométriques (surface : S et/ou longueur du fil : l) ou physique (perméabilité : μ) de l'inductance de la bobine

$$L = \frac{\mu S N^2}{l} \qquad \textbf{(I.3)}$$

Les propriétés électriques des matériaux peuvent être sensibles à des grandeurs physiques variées appelées grandeurs d'influences: la température, l'éclairement, la pression, l'humidité, etc. (voir tableau I.1).

Mesurande	Caractéristiques électriques sensibles au mesurande	Types de matériaux utilisés
Température	Résistivité	**Platine, semiconducteur,...**
Très basse température	Constante diélectrique	**Verre**
Flux, rayonnement optique	Résistivité	**Semiconducteurs**
Déformation	Résistivité, perméabilité magnétique	**Alliage NiSi**
Position (aimant)	Résistivité	**Bismuth, Antimoine, Indium**
Humidité	Résistivité, constante diélectrique	**LiCl, Al....**
Niveau	Constante diélectrique, Résistivité résistivité	**Liquide isolant** **Flotteur**

Tableau I.1. Quelques propriétés électriques des matériaux utilisés par les capteurs

III.2. Les Capteurs actifs

Dans son principe, Le capteur actif est généralement fondé sur l'effet physique qui assure la conversion en une énergie électrique de la forme d'énergie propre du mesurande. Parmi ces effets on peut citer :

a) Effet thermoélectrique

Cet effet est à la base du capteur de température à savoir le thermocouple. La thermoélectricité est un processus bidirectionnel. Il peut se référer soit :

- A la façon dont une différence de température entre un côté d'un matériau et l'autre peut produire de l'électricité.
- A l'inverse: la façon dont l'application d'un courant électrique à travers un matériau peut créer une différence de température entre ses deux côtés. Cette propriétés peut être utilisé pour chauffer ou refroidir des objets sans combustion ni pièces mobiles.

Principe

Lorsque les deux fils (composé de deux métaux différents) sont raccordés à leurs extrémités (soudés) et que l'une d'elle est chauffée, il se produit une circulation de courant continu dans le circuit. C'est **l'effet thermoélectrique.**

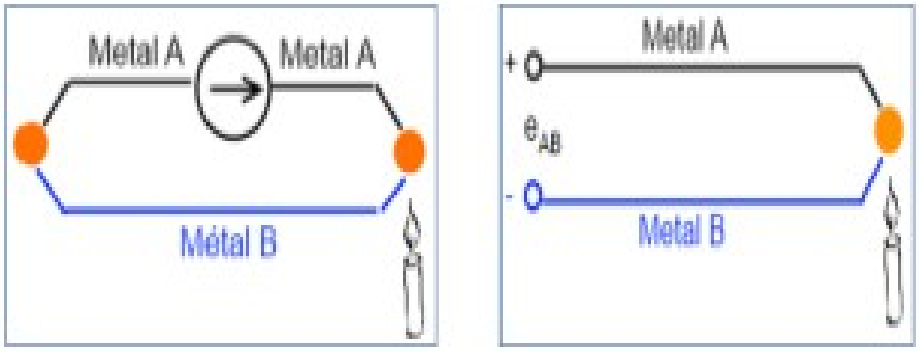


Figure I.3. Principe de l'effet thermoélectrique.

Si on coupe le circuit, et en chauffant la jonction des deux métaux différents A et B, une tension e_{AB} apparait. Cette **d.d.p** est fonction de la température et la composition des deux métaux.

$$e_{AB} = f(T_1 - T_2) \qquad (I.4)$$

Remarque

Tous les métaux dissemblables présentent cet effet.

Dans un circuit fermé constitué de deux conducteurs de nature différente, il circule un courant lorsqu'on maintient entre les deux jonctions une différence de température. Ce phénomène est en relation avec les trois effets thermoélectriques se manifestant dans les métaux : **l'effet Seebeck, l'effet Peltier et l'effet Thomson** (voir chapitre 04).

***b)* Effet piézoélectrique :** *Phénomène électromécanique démontré expérimentalement (la balance à Quartz piézoélectrique) par Pierre et Paul Jacques Curie en 1880.*

Principe

L'apparition d'une force et plus généralement d'une contrainte mécanique sur certaine matériaux dits piézoélectriques (Quartz, Sel du signet) entraine une déformation qui suscite l'apparition de charges égales et opposées sur les surfaces.

Ainsi le terme **piézoélectricité** désigne la propriété que présentent certains corps de se polariser électriquement -- soit de générer un champ ou un potentiel électrique -- sous l'action d'une contrainte mécanique. On parle **d'effet piézoélectrique direct** et l'**effet piézoélectrique** inverse puisqu'il est également observé (voir figure I.4).

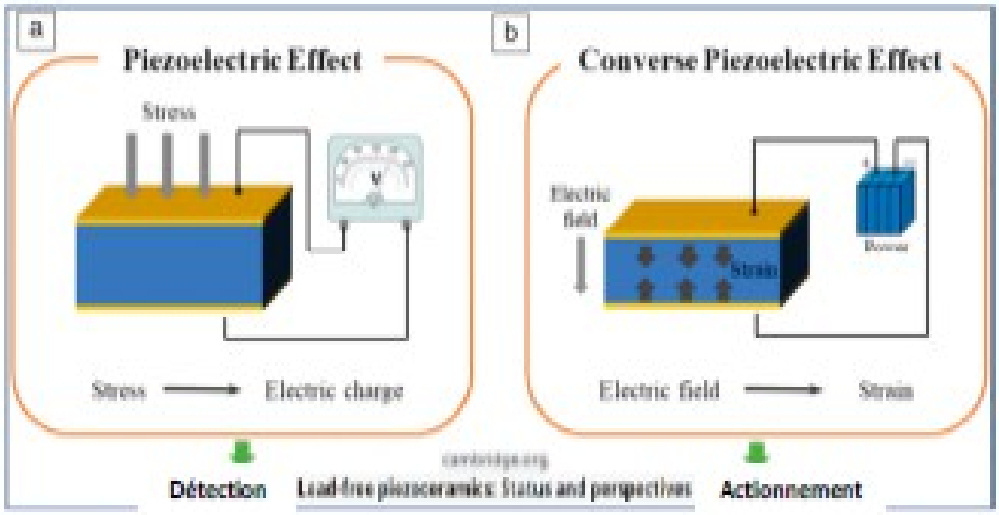


Figure I.4. Principe de l'effet piézoélectrique

- L'effet piézoélectrique direct : Si on compresse le matériau, on relèvera une certaine tension à ses bornes. Inversement, si on étire ce même matériau, on aura une tension de sens inverse.
- L'effet piézoélectrique inverse : Si une tension est appliquée sur le matériau, il s'ensuit un allongement du cristal. Inversement, si une tension de sens inverse est appliquée sur ce matériau, il s'ensuit une contraction du cristal.

Donc l'effet piézoélectrique est réversible

Energie mécanique ⟺ **Energie électrique**

Applications

- Le sonar développé, la première guerre mondiale, par le physicien français **Paul Langevin** (1872 - 1946) avec l'ingénieur **Constantin Chilowskiet**.
- Les manographes et les accélérographes (en 1937 par **H. Gondet & P. Beaudoin**).
- Une autre application courante de l'effet piézoélectrique direct est l'allume-gaz (voir figure 1.5). Dans cette dernière, la pression exercée produit une tension électrique qui se décharge brutalement sous forme d'étincelles.

- D'autres applications de la piézoélectricité on été développées durant la période entre la première et la deuxième guerre mondiale comme l'accéléromètre et le microphone universel ainsi que les phonographes pick-ups.

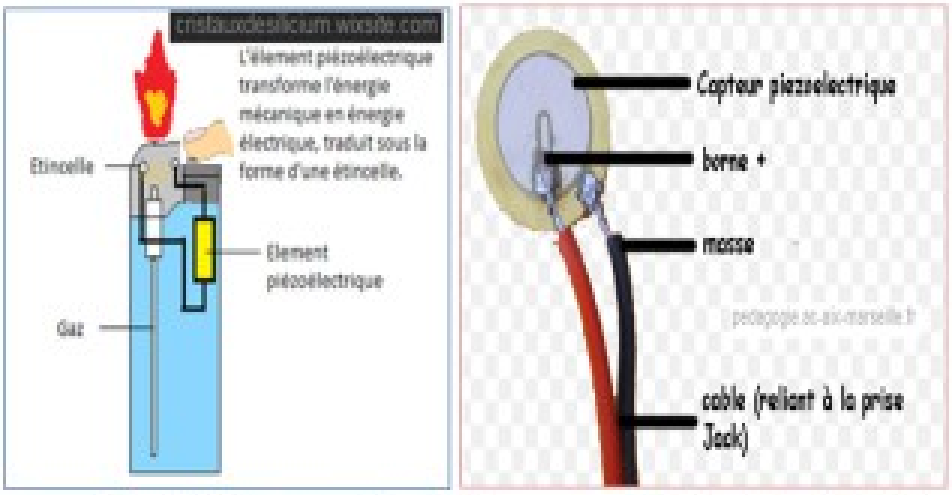
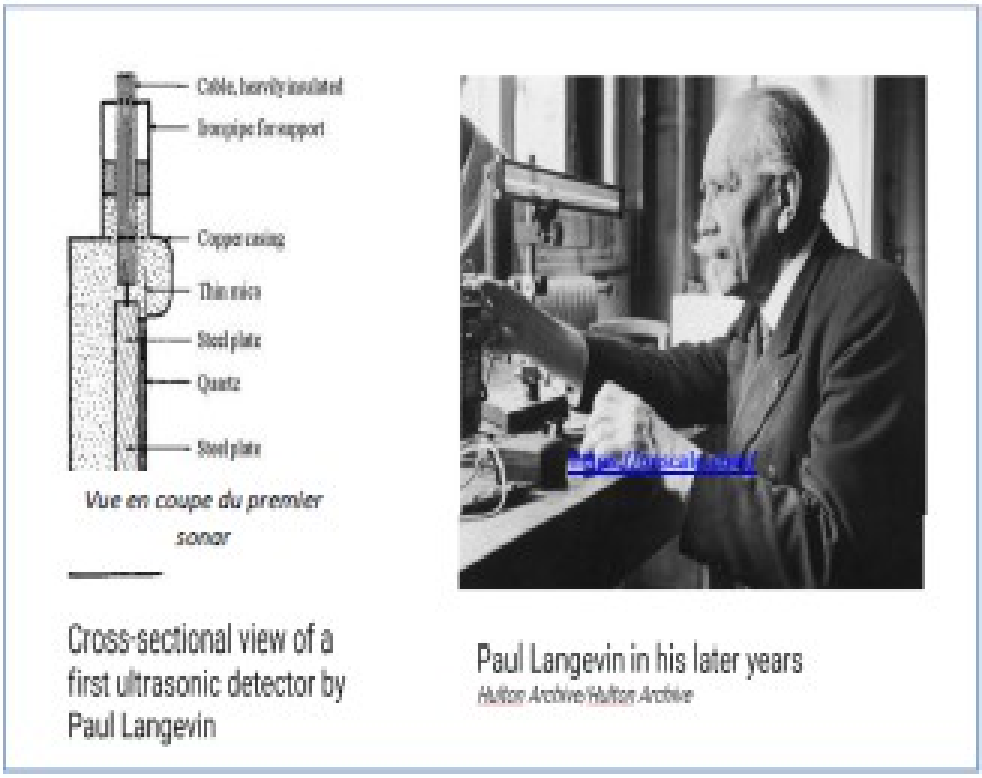


Figure I.5. Allume à gaz (à gauche) et un capteur piézoélectrique (à droite).



Microphone universel

Accéléromètre

Phonographe pick-ups

Figure I.6. Quelques applications de l'effet piézoélectrique.

c) **Effet pyro-électrique :** *L'effet pyro-électrique a été découvert pour la première fois dans la tourmaline (matériau minérale naturel) en* ***1707 par G. J. Schmidt.*** ***En 1824*** *le mot "pyroélectrique" a été prononcé pour la première fois par* ***David Brewster*** *(*inventeur du stéréoscope*).* ***William Thomson en 1878*** *et* ***Voight en 1897*** ont aidé à développer une théorie des processus.

David Brewster

Principe

La pyroélectricité (du grec pyr c-à-d feu) est la propriété d'un matériau dans lequel un changement de température entraine une variation de polarisation électrique. Cette variation de polarisation crée une différence de potentiel temporaire, celle-ci disparaissant après le temps de relaxation diélectrique.

Autrement, certains cristaux dits pyro-électriques (**Quartz, triglycine du soufre** (TGS) **ou de sélénium** (TGSe), **Thiourée, diacide de potassium** (KDP), etc.) ont une polarité spontanée dépendant de la température. Ils portent des charges positives sur une surface proportionnelle à cette polarisation et des charges négatives sur l'autre surface.

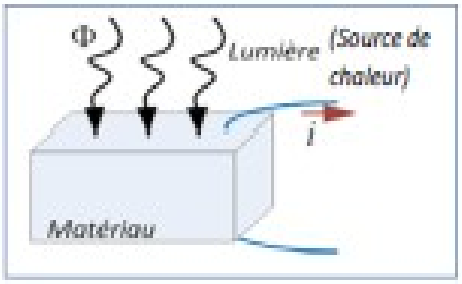


Figure I.7. Principe de l'effet pyro-électrique

Exemple: Détecteur de mouvement infrarouge.

Un capteur pyro-électrique est doté au moins de deux cellules sensibles à la chaleur (rayonnement infrarouge). Le capteur est élaboré de telle sorte qu'il permet la détection de la différence de chaleur entre les cellules qu'il comporte.

Figure I.8. Détecteur de mouvement infrarouge (IRA-E710ST0)

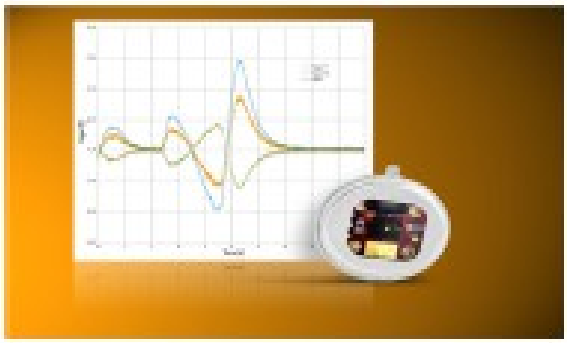


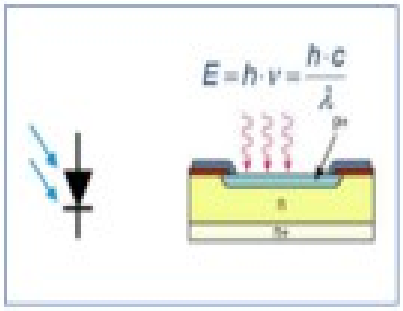
Figure I.9. Détecteur pyro-électrique Différentiel

d) **Effet photoélectrique** (*découvert en 1887 par le physicien Allemand* Heinrich Rudolf Hertz)

On distingue deux effets:

- **L'effet photoémissif :** Les électrons libérés dans le matériau éclairé forme un courant collecté par application d'un champ électrique.

Exemple : Photodiode SIP S5106



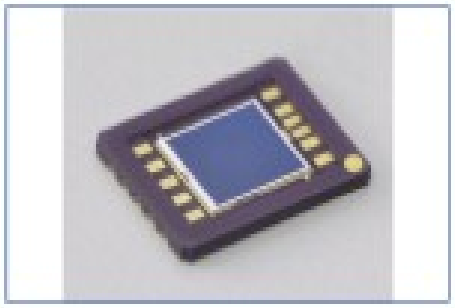


Figure I.10. Photodiode

- **L'effet photovoltaïque :** (*découvert en 1839 par le physicien français* ***Antoine Becquerel*** *et son fils* ***Alexandre Edmond***)

Les électrons et les trous sont libérés au voisinage d'une jonction PN illuminée. Leur déplacement se fait grâce au champ électrique interne de la jonction qui modifie la tension à ses

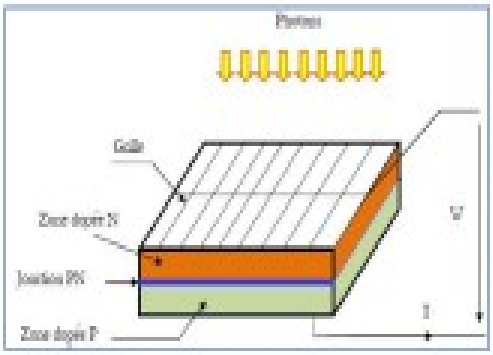


Figure I.11. Effet Photovoltaïque

Figure I.12. Panneau solaire

e) L'effet photo-électromagnétique

L'application d'un champ magnétique perpendiculaire au rayonnement provoque dans le matériau éclairé l'apparition d'une tension électrique dans la direction normale au champ et au rayonnement. Autrement dit c'est la libération des charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou une onde électromagnétique.

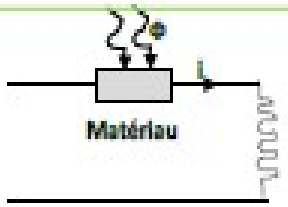


Figure I.13. Effet photo-électromagnétique

Exemple : Cet effet est utilisé dans les appareils photos afin de convertir une lumière en un signal qui sera numérisé afin d'obtenir une image numérique.

f) L'effet Hall : (*Découvert en 1879 par le physicien Américain* ***Edwin Herbert Hall***)

Quand un matériau semiconducteur (sous forme de plaquette) est parcouru par un courant électrique $\vec{I}$ et soumis à un une induction magnétique $\vec{B}$ faisant un angle θ avec la direction du courant, il apparait à ses bornes (perpendiculairement au plan $\vec{I}$ et $\vec{B}$ (voir figure I.14)) une tension V_H proportionnelle au courant et à l'induction $\vec{B}$ tel que :

$$V_H = R_H \cdot \frac{IB}{e} \qquad (I.5)$$

Avec :

e : épaisseur du barreau semiconducteur, I : intensité de la source de courant, R_H : constante de Hall (dépend du type de semiconducteur), B : champ magnétique

$$V_H = K_A I B \sin\theta \qquad (I.6)$$

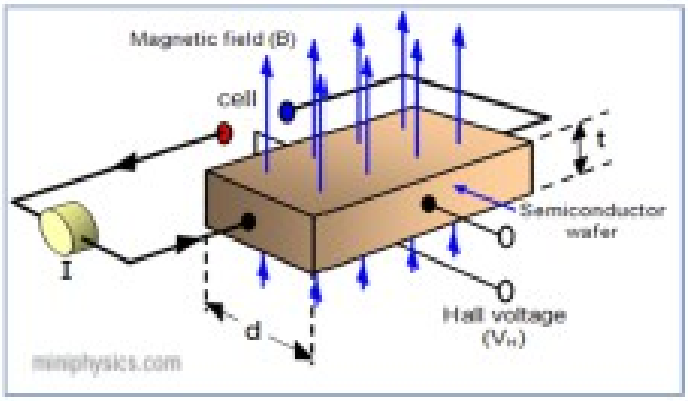


Figure I.14. Principe de l'effet Hall.

Applications de l'effet HALL

- **Réalisation des robots** : Cependant, il l'effet Hall est surtout employé dans les chaînes industrielles pour vérifier par exemple la position de pièce mécanique sans qu'il y ait contact.
- **Capteur de champ magnétique**

La structure typique d'un capteur de champ magnétique est la suivante :

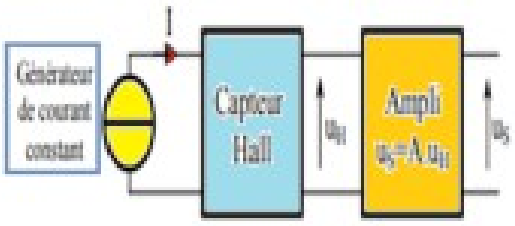


Figure I.15. Principe du capteur de champ magnétique

La sensibilité de ce capteur pourra être ajustée en agissant sur I et sur A.

- **Capteur de proximité**

Le capteur détecte l'approche de l'aimant placé au préalable sur un objet.

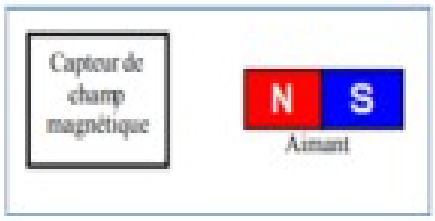


Figure I.16. Principe du capteur de proximité

- **Mesure de l'intensité d'un courant électrique sans "ouvrir " le circuit**

Le courant I crée un champ magnétique proportionnel à ce courant :

$$B = \frac{\mu I}{2\pi r} \qquad (I.7)$$

Avec μ la perméabilité magnétique et r le rayon.

Le capteur donne une tension de sortie $U_s = k.B = k'.I$ avec k et k' constantes.

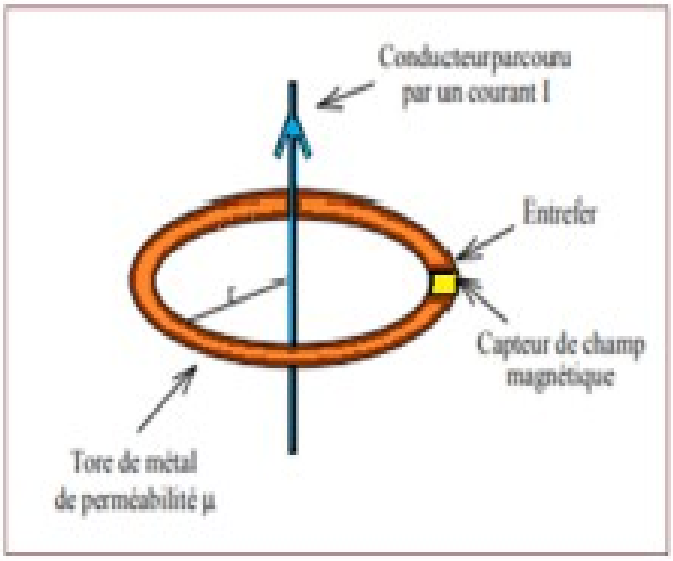


Figure I.17. Mesure de l'intensité d'un courant électrique sans "ouvrir " le circuit

C'est le principe des pinces ampèremétriques (mesure de forts courants de 1000A et plus).

Avantage:

- Plus de détérioration des ampèremètres "classiques".
- Pas de danger car le fil reste isolé (pas besoin d'ouvrir le circuit).
- Rapidité d'intervention.

g) L'effet inductif

Le principe général est la variation du couplage entre deux enroulements primaires et secondaires (voir figure 1.18). L'introduction ou la modification du noyau magnétique de couplage va pouvoir être mesurée par la variation de la tension électrique mesurée au secondaire alors que le primaire est alimenté par une tension alternative de référence.

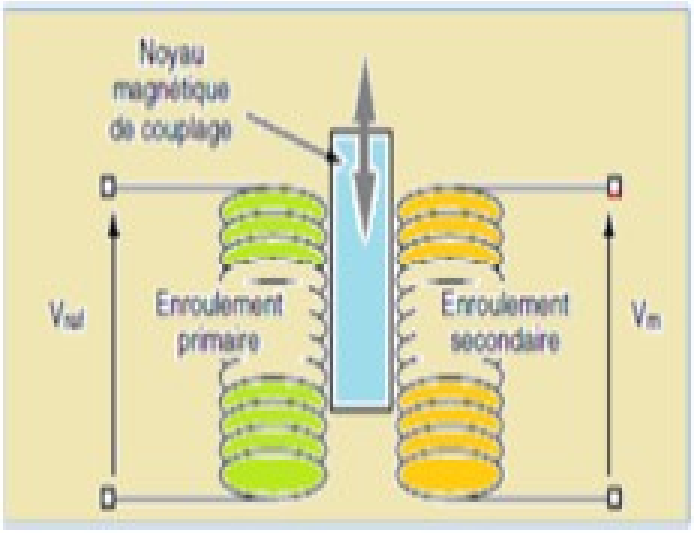


Figure I.18. Principe de l'effet inductif

Exemple: L'effet inductif est évidemment utilisé dans les mesures de grandeurs physiques et qu'il est possible de les transformer en mesure des déplacements. Ces déplacements sont alors liés au mouvement du noyau magnétique de couplage. Le tableau I.2 résume les principaux effets exploités par les capteurs actifs

Mesurande	L'Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux du rayonnement optique	Pyroélectricité	Charge
	Photoémission	Courant
	Photovoltaïque	Courant
	Photo électromagnétique	Tension
Force Pression Accélération	Piézoélectricité	Charge
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position	Effet Hall	Tension

Tableau I.2. Principaux effets exploités par les capteurs actifs

IV. Grandeurs d'influence

Un capteur, de part de ses conditions d'emploi, peut se trouver soumis non seulement au mesurande, mais à d'autres grandeurs physiques dont les variations sont susceptibles d'entrainer un changement de la grandeur électrique de sortie.

Ce changement n'est pas possible de distinguer de l'action du mesurande). Les grandeurs physiques parasites auxquels la réponse du capteur peut être sensible sont appelés grandeurs d'influence.

- La température : elle modifie les caractéristiques électriques, mécaniques et dimensionnelles du capteur.
- La pression, l'accélération ou les vibrations : peuvent déformer le capteur (corps d'épreuve).
- L'humidité : influe sur la constante diélectrique du matériau, et par la suite sur sa résistance engendrant une dégradation de l'isolant qui provoque des courts-circuits.