

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université des Sciences et de la Technologie d'Oran

Mohammed Boudiaf

FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

DÉPARTEMENT D'ÉLECTRONIQUE



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة العلوم والتكنولوجيا بهران

محمد بوضياف

كلية الهندسة الكهربائية

قسم الإلكترونيك

Socle commun 4ème semestre

Domaine: Sciences et Technologies

Filière : Génie BioMédical

Matière : Capteurs de Grandeurs Physiques

Enseignant : Abdelmoudjib BENKADA

Objectifs de l'enseignement

Cette matière est destinée principalement à l'étude détaillée des différentes familles de capteurs utilisés dans le domaine biomédical et l'étude du système de conditionnement associé. À l'issue de cette matière, l'étudiant sera capable de :

- Définir les différents types de capteurs biomédicaux,
- Résoudre les problèmes de conditionnement de capteur,
- Expliquer le principe de fonctionnement de capteurs dédiés à des applications en biomédical.

Connaissances préalables recommandées : Notions de base en électricité et en électronique

Contenu de la matière

Chapitre 1 : Concepts fondamentaux de la détection des grandeurs physiologiques et mesure

Chapitre 2 : Capteurs résistifs et applications biomédicales

Thermistance, Jauge de contrainte (métallique, électrolytique, à mercure), Magnétorésistif (effet hall), Photorésistances

Chapitre 3 : Capteurs inductifs et applications biomédicales

Mutuelle inductance (transformateur différentiel à variation linéaire LVDT et à variation rotationnelle RVDT)

Chapitre 4 : Capteurs capacitifs et applications biomédicales

Circuits de mesure de capacité, Capacités biologiques

Chapitre 5 : Capteurs photoélectriques et applications biomédicales

Tubes à photo émission, Cellules photovoltaïques, Diodes électroluminescentes, Phototransistor

Chapitre 6 : Capteurs piézoélectriques et applications biomédicales

Ultrasons et leurs applications

Chapitre 7 : Capteurs thermoélectriques et applications biomédicales

Thermoélectricité : l'effet Peltier

Chapitre 8 : Capteurs chimiques et application biomédicales

Loi de Dalton, loi d'Henry, électrodes de mesures, Capteurs chimique à fibre optique, Électrodes à ion spécifique, Transistor à effet de champ à ion spécifique,

Chapitre 9 : Électrodes et microélectrodes

Chapitre 1 : Concepts fondamentaux de la détection des grandeurs physiologiques et mesure

1.1 Concepts fondamentaux

1.1.1 Définitions et généralités sur les capteurs

3

Mesurande (m) : Grandeur physique que l'on veut mesurer, présente à l'entrée du capteur (excitation)

Ex. : déplacement, température, pression, vitesse, etc.

Mesurage : Ensemble des opérations expérimentales servant à la connaissance de la valeur numérique du mesurande.

■ Objectif : Obtenir à partir du mesurande, et à l'aide de moyens électroniques de traitement du signal, une grandeur électrique qui est une représentation aussi exacte que possible du mesurande : ceci signifie que la grandeur électrique et ses variations apportent toute l'information nécessaire à la connaissance du mesurande.

Capteur : Dispositif qui soumis à l'action d'un mesurande m non électrique présente une caractéristique de nature électrique (charge, tension, courant ou impédance) désignée par s (grandeur de sortie) et qui est fonction du mesurande :

$$s = F(m)$$

Courbe d'étalonnage :

■ Objectif : La mesure de s doit permettre de connaître la valeur de m (**Fig. 1.1**).

■ 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, qui dépend de :

- géométrie et dimensions ;
- matériaux qui le constituent ;
- son environnement et son mode d'emploi (température, alimentation).

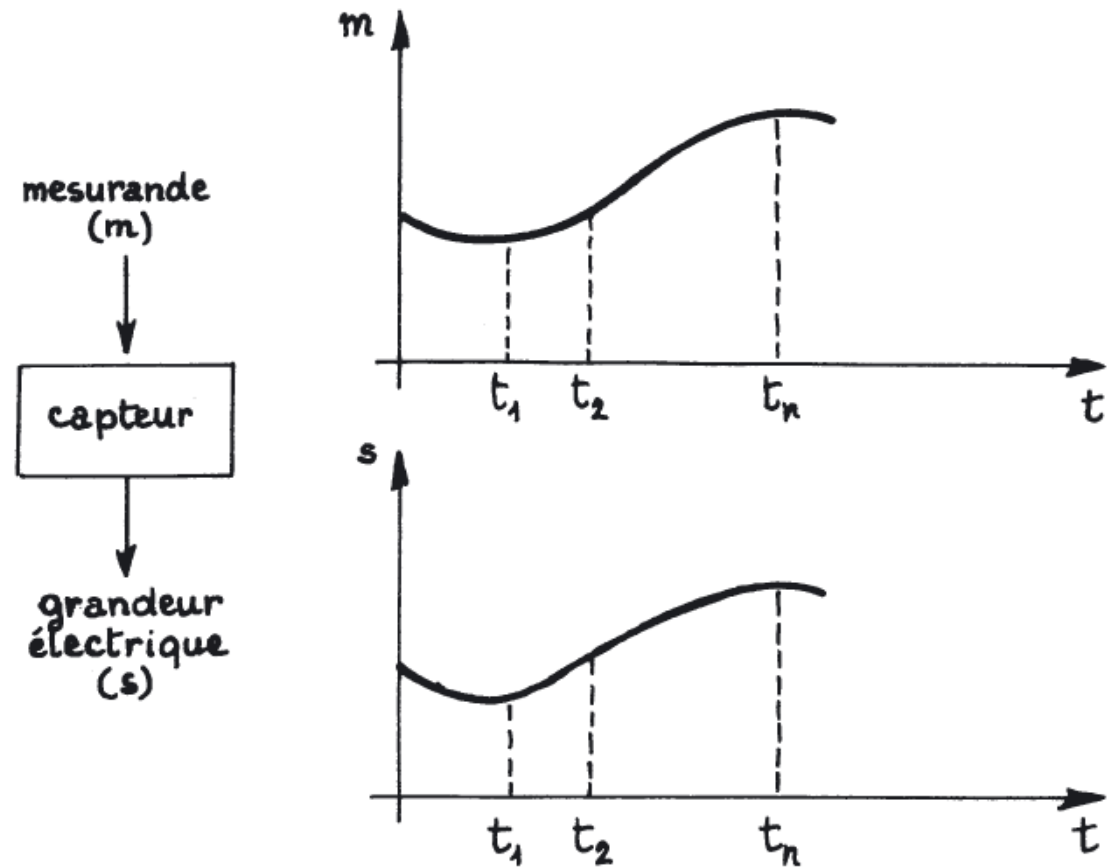


Figure 1.1 – Exemple d'évolution d'un mesurande m et de la réponse s correspondante du capteur.

■ **Étalonnage** : est l'opération permettant d'avoir la forme numérique de la relation $s = F(m)$.

Démarche : à partir d'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** (Fig. 1.2a) ; et inversement, à toute valeur mesurée de s , permet d'associer la valeur de m qui la détermine (Fig. 1.2b).

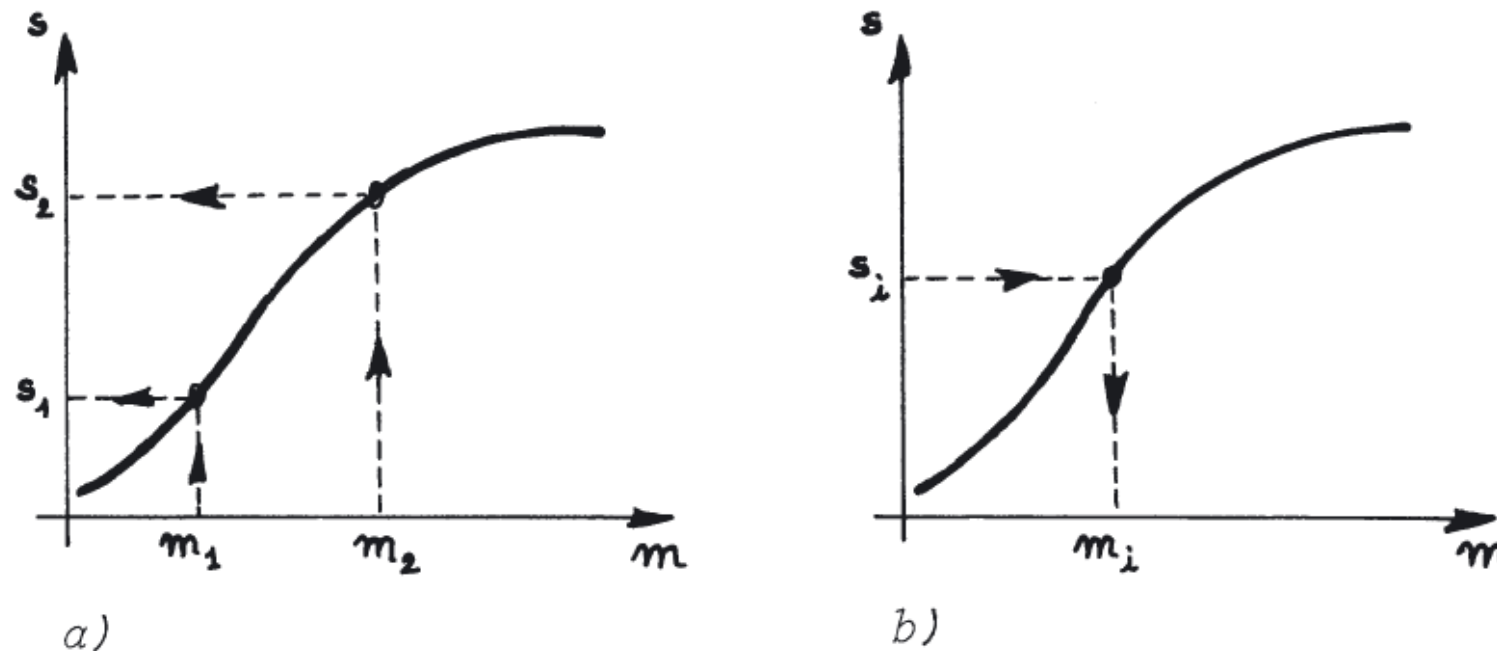


Figure 1.2 – Courbe d'étalonnage d'un capteur :

a) son établissement, à partir de valeurs connues du mesurande m ;

b) son exploitation, à partir des valeurs mesurées de la réponse s du capteur.

Considérations pratiques

1. Pour faciliter l'exploitation du capteur, il doit être réalisé, ou au moins utilisé, avec **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.

2. Un des problèmes importants dans 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 qui ne sont pas l'objet de la mesure et que l'on désigne comme **grandeurs d'influence**.

1.1.2 Différents types de capteurs

De point de vue électrique, le capteur vu de sa sortie, est :

- soit comme un générateur, s étant une charge, une tension ou un courant et il s'agit alors d'un **capteur actif** ;
- soit comme une impédance, s étant alors une résistance, une inductance ou une capacité : le **capteur est alors dit passif**.

■ Cette différence fondamentale réside dans la nature même des phénomènes physiques mis en jeu.

■ Le signal électrique est la partie variable du courant ou de la tension qui porte l'information liée au mesurande : amplitude et fréquence du signal doivent être liées de façon étroite à l'amplitude et à la fréquence du mesurande.

■ Un capteur actif qui est une source, délivre immédiatement un signal électrique ; il n'en est pas de même d'un capteur passif dont les variations d'impédance ne sont mesurables que par les modifications du courant ou de la tension qu'elles entraînent dans un circuit par ailleurs alimenté par une source extérieure.

■ Le circuit électrique qui doit être associé à un capteur passif est un **conditionneur**, et c'est l'ensemble du capteur et du conditionneur qui est la source du signal électrique.

1.1.2.1 Capteur passif

■ Ce sont des impédances dont l'un des paramètres est fonction du mesurande. Dans cette fonction sont présents des termes liés à/aux :

1. la géométrie et aux dimensions du capteur :

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 (Fig. 1.3).

8

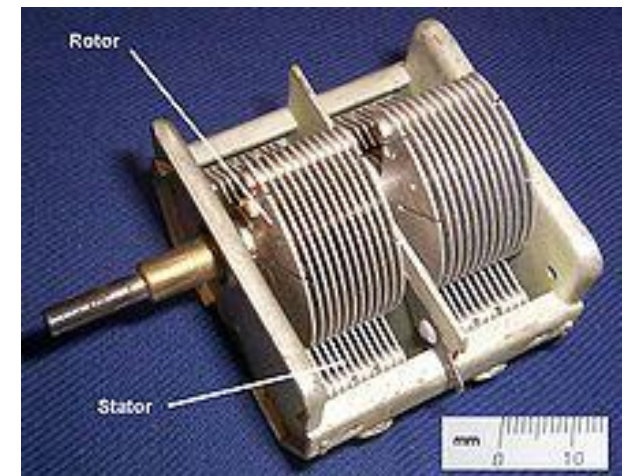


Figure 1.3 - a) Potentiomètre, b) Inductance à noyau mobile, c) Condensateur à armature mobile.

Dans le second cas, la déformation résulte de forces – ou de grandeurs s’y ramenant (pression, accélération) – appliquées soit directement soit indirectement au capteur : armature d’un condensateur soumise à une pression différentielle, jauge d’extensométrie liée rigidement à une structure soumise à contrainte (**Fig. 1.4**).

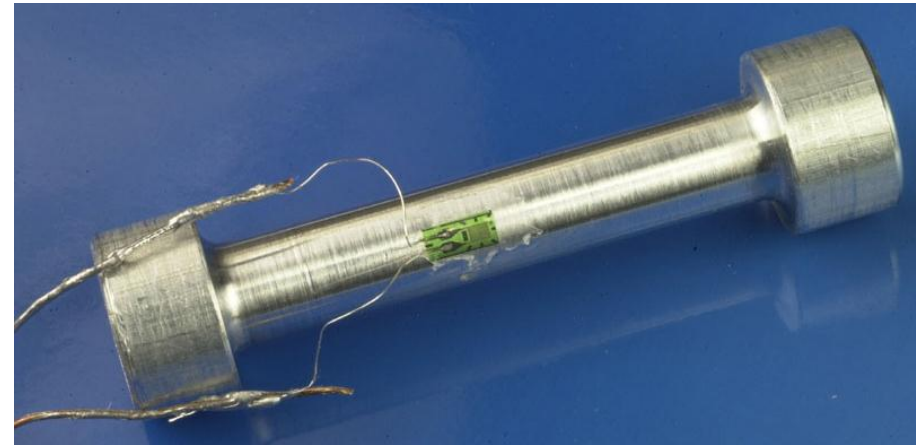
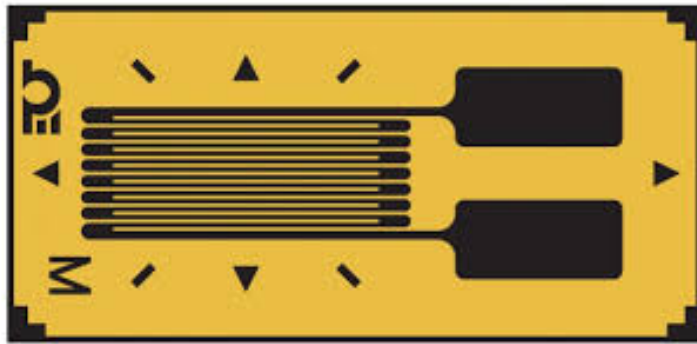


Figure 1.4 - a) Jauge d’extensométrie, b) Jauge d’extensométrie liée à une structure.

2. aux **propriétés électriques des matériaux** : résistivité ρ , perméabilité magnétique μ , constante diélectrique ϵ .

- Ces propriétés peuvent être sensibles à des grandeurs physiques variées : température, éclairnement, pression, humidité...
- Si l’une seule de ces grandeurs varie, toutes les autres étant maintenues constantes, cela entraîne une relation directe entre la valeur de cette grandeur et celle de l’impédance du capteur : ce qui se traduit par la courbe d’étalonnage, qui permet, à partir de la mesure de l’impédance de déduire la valeur du mesurande.

- Les **Tab** 1.1 et 1.2 donnent un aperçu des divers mesurandes susceptibles de modifier les propriétés électriques de matériaux employés pour la réalisation de capteurs passifs ; on y remarque, en particulier, la place importante des capteurs résistifs.

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

Tableau 1.1 – Capteurs passifs :
principes physiques et matériaux.


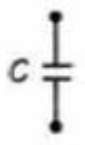

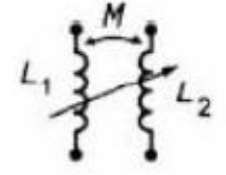
Grandeur de traduction	Transformations possibles
	Résistance R : $R = f(\rho, \ell, s)$ ρ résistivité, ℓ longueur, s section
	Capacité C : $C = f(S, e, \varepsilon)$ S surface des armatures, e distance entre armatures, ε permittivité
	Inductance L : $L = f(\ell, S, \mu, n)$ ℓ longueur, S surface d'une spire, n nombre de spires, μ perméabilité
	Inductance mutuelle : $M = f(L_1, L_2)$

Tableau 1.2 – Transformations possibles avec les différentes impédances

Considérations pratiques

- La mesure de l'impédance d'un capteur passif et ses variations exige de ce dernier d'être intégré dans un circuit électrique, alimenté et qui est son conditionneur.
- 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 (le conditionnement fera l'objet du § 1.3)

1.1.2.2 Capteur actif

Ce type de capteur fonctionne en générateur, 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 dans le **Tab 1.3**, et sont décrits dans le paragraphe suivant :

Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux de rayonnement optique	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 1.3 – Capteurs actifs : principes physiques de base.

1.1.2.2.1 Phénomènes physiques utilisés dans les capteurs actifs

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 $e(T_1, T_2)$ (**Fig. 1.5**).

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

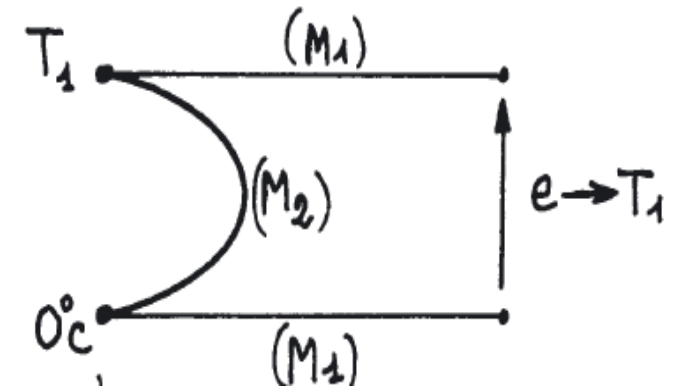


Figure 1.5 - Effet thermoélectrique.

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 (**Fig. 1.6**).

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.

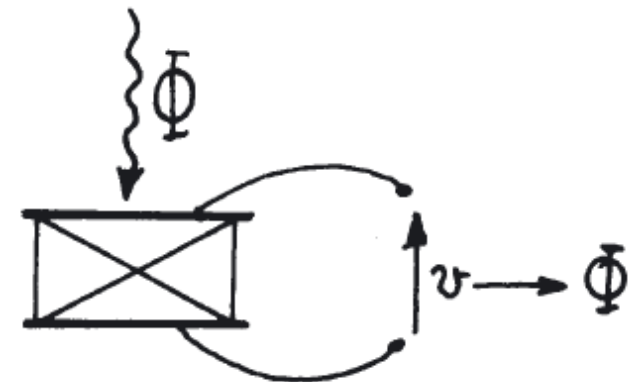


Figure 1.6 - Effet pyroélectrique.

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 (**Fig. 1.7**).

Application : 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.

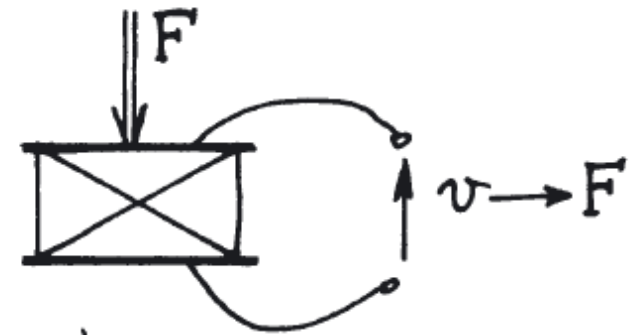


Figure 1.7 - Effet piézoélectrique.

15

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 (**Fig. 1.8**).

Application : la mesure de la f.é.m. d'induction permet de connaître la vitesse du déplacement qui est à son origine.

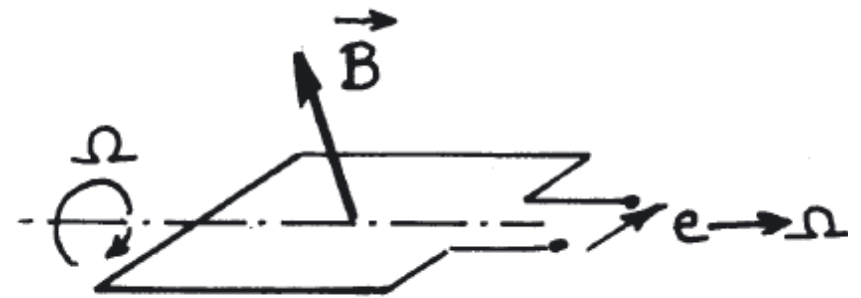


Figure 1.8 - Effet d'induction électromagnétique.

Effet photoélectrique

Cet effet englobe plusieurs types, qui diffèrent par leurs manifestations mais qui ont pour origine commune la libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement électromagnétique, dont la longueur d'onde est inférieure à une valeur seuil, caractéristique du matériau (**Fig. 1.9**).

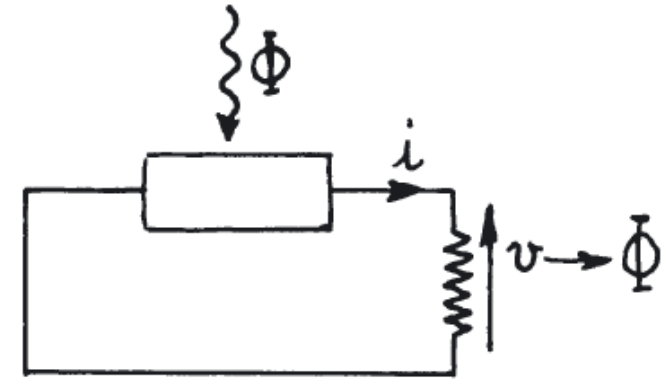


Figure 1.9 - Effet photoélectrique.

Effet Hall

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 (**Fig. 1.10**).

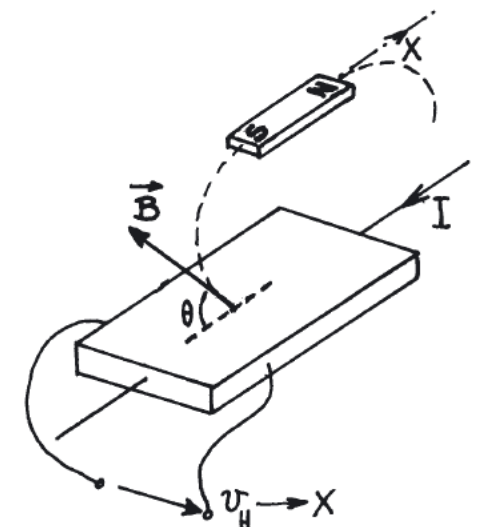


Figure 1.10 - Effet Hall

1.1.2.3 Capteur composite (corps d'épreuve)

- Pour des raisons de coût ou de facilité d'exploitation, le capteur peut être utilisé, non pas sensible au mesurande mais à l'un de ses effets.
- Le **corps d'épreuve** est le dispositif qui, soumis au mesurande étudié délivre une autre grandeur physique non-électrique, le **mesurande secondaire**, qu'un capteur adéquat est alors capable de traduire en une grandeur électrique (**Fig 1.11**). L'ensemble formé par le corps d'épreuve et un capteur actif ou passif constitue un **capteur composite**.

17

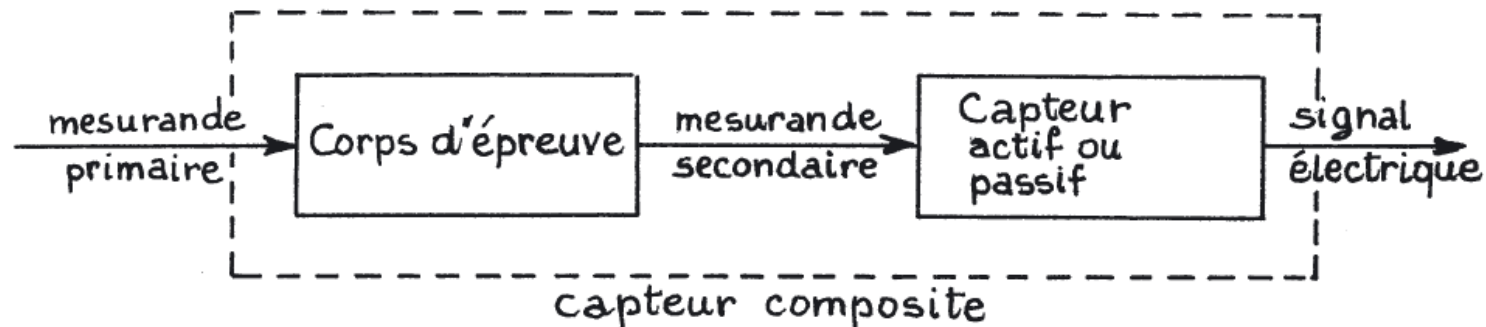


Figure 1.11 – Structure d'un capteur composite.

- 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 auxquels un capteur approprié est sensible.

Exemples :

1. Une traction F exercée sur une barre (longueur L , section A , module d'Young E) entraîne une déformation $\Delta L/L_0$ qui est mesurable par la variation $\Delta R/R_0$ 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 est donnée par la loi de Hooke :

$$\sigma = E\varepsilon$$

Avec

σ : Contrainte (force exercée par unité de surface, en $[\text{N/m}^2]$ ou $[\text{Pa}]$)

E : Module d'Young (ou d'élasticité) en $[\text{N/m}^2]$ ou $[\text{Pa}]$

ε : Déformation relative [1], avec $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L-L_0}{L_0}$

Ainsi, on a :

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{1}{E} \cdot \frac{F}{A}$$

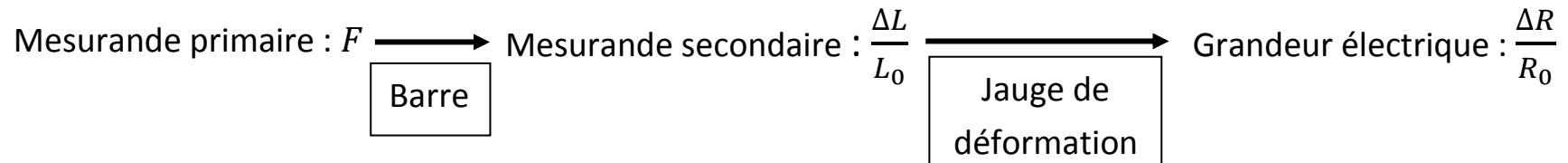
- et d'autre part l'équation du capteur liant sa grandeur d'entrée, ici la déformation, à sa réponse électrique $\Delta R/R_0$ soit :

$$\frac{\Delta R}{R_0} = K \cdot \frac{\Delta L}{L_0}$$

K : est une constante représentant la sensibilité de la jauge, et qui dépend des matériaux et de la température.

Enfin, on en déduit la relation entre traction et variation de résistance :

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{K}{E} \cdot \frac{F}{A}$$



2. Une pression est mesurable au moyen d'une membrane, corps d'épreuve, dont la déformation est traduite électriquement par une jauge de contrainte. La membrane d'un microphone électrodynamique est un corps d'épreuve car c'est de son mouvement, conséquence de la pression acoustique à laquelle elle est soumise, que résulte le signal électrique. Dans un accéléromètre, la masse sismique est le corps d'épreuve qui convertit l'accélération, mesurande primaire, en une force d'inertie, mesurande secondaire auquel est sensible un capteur piézoélectrique.

■ 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 ».

1.1.2.4 Capteur intelligent

Un capteur intelligent est un ensemble de sous-systèmes de fonctions distinctes dont les principaux sont (**Fig 1.12**) :

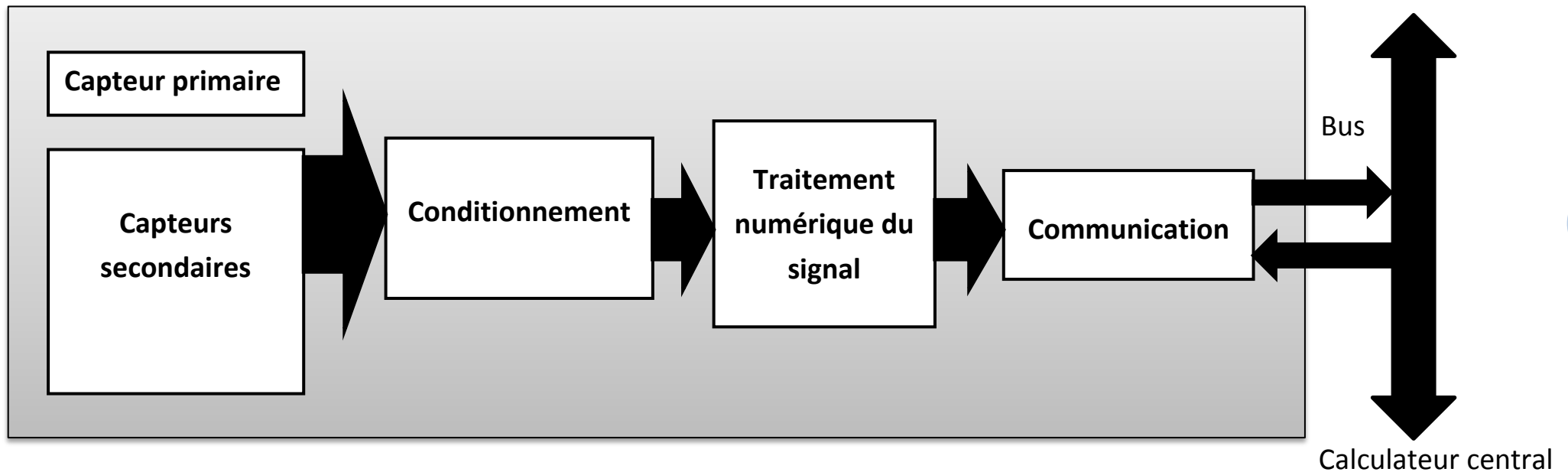
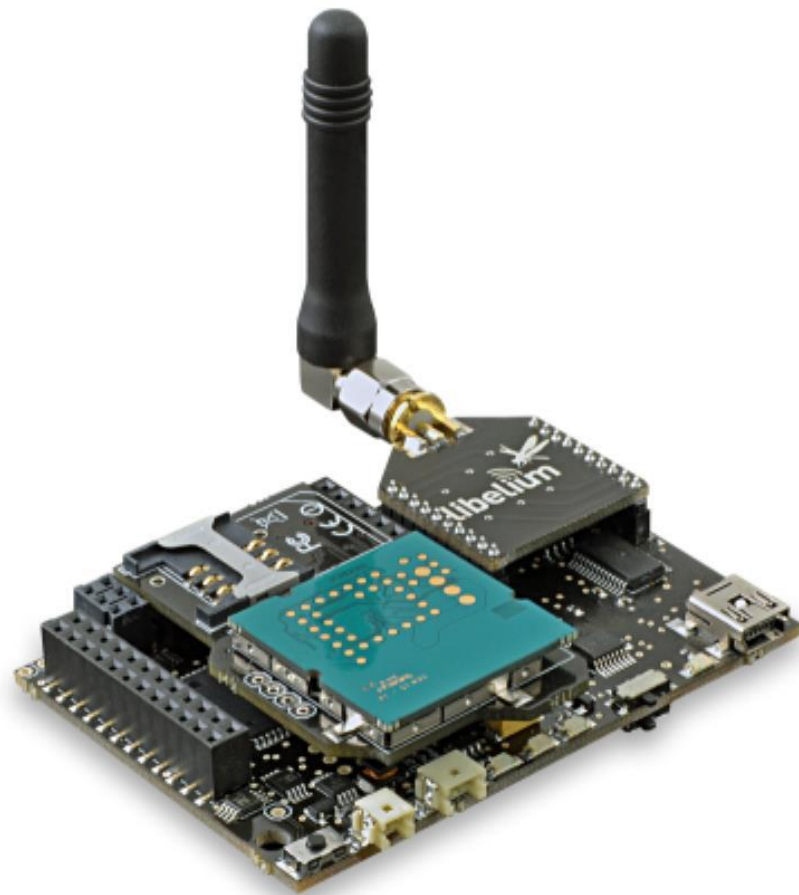


Figure 1.12 – Schéma général d'un capteur intelligent.

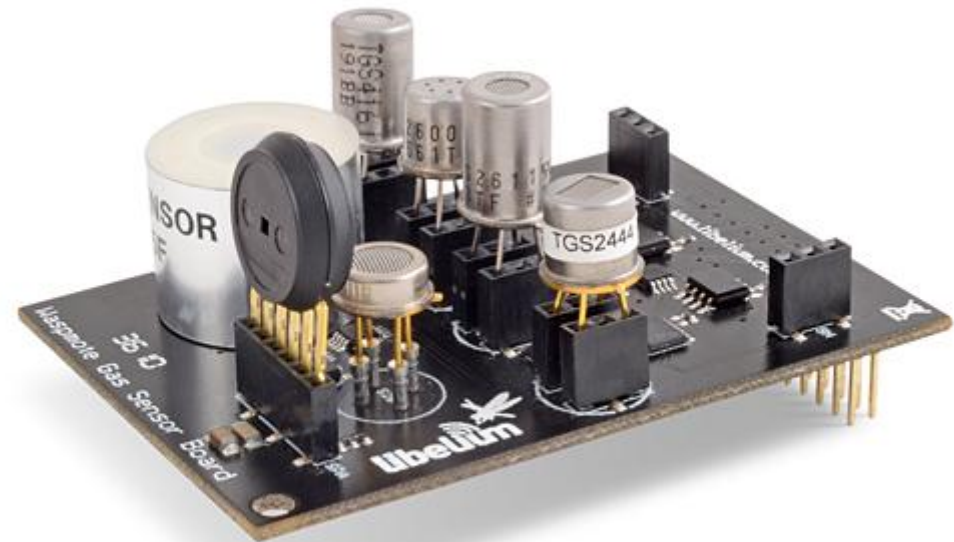
1. Sous-système capteurs : il comporte un capteur principal spécifique du mesurande étudié, et plusieurs capteurs secondaires propres aux grandeurs d'influence susceptibles d'affecter la réponse du capteur principal.

2. Sous-système de conditionnement : il comporte plusieurs étages permettant l'obtention sous forme numérique de la grandeur de sortie de chaque capteur : conditionneur, multiplexeur, amplificateur, échantillonneur-bloqueur, convertisseur analogique-numérique ;
3. Sous-système de traitement piloté par un microprocesseur : le microprocesseur est chargé de : gestion de l'acquisition, correction de l'effet des grandeurs d'influence à l'aide des données fournies par les capteurs secondaires, linéarisation, diagnostic des capteurs, etc.
4. Sous-système de communication : il s'agit d'une **interface de communication bidirectionnelle** assurant la liaison du capteur à un ordinateur central via un bus partagé entre plusieurs capteurs intelligents. L'information spécifique à un capteur donné transite par l'interface :
 - soit dans le sens ordinateur vers capteur : configuration, autoétalonnage...
 - soit dans le sens capteur vers ordinateur : résultats de mesure, état de la chaîne de mesure (étendue de mesure, dépassements de gamme du mesurande ou d'une grandeur d'influence...).

Avantages d'un capteur intelligent : Configurabilité à distance ; crédibilité accrue des mesures et aide à la maintenance grâce aux informations d'état fournies (auto-diagnostic) ; répartition des tâches, déchargeant le ordinateur central.



a)



b)

Figure 1.13 – a) Capteur intelligent avec communication à distance, b) Capteur intelligent environnemental (mesure de température, humidité, différents gaz, etc.

1.1.3 Grandeurs d'influence

■ Dans un environnement normal d'emploi, le capteur peut être soumis à des grandeurs physiques « parasites », auxquelles la réponse du capteur peut être sensible. Ce sont les **grandeurs d'influence**.

Ainsi, par exemple :

- la température est grandeur d'influence pour un capteur optique comme la résistance photoconductrice ;
- il en est de même pour le champ magnétique vis-à-vis d'un capteur thermométrique comme la résistance de germanium.

■ Les principales grandeurs d'influence sont :

- la température : Elle modifie les caractéristiques électriques, mécaniques et dimensionnelles des composants du capteur ;
- la pression, l'accélération et les vibrations : Elles sont susceptibles de créer dans certains éléments constitutifs du capteur des déformations et des contraintes qui altèrent la réponse ;
- l'humidité : Elle est déterminante dans les valeurs de certaines propriétés électriques comme la constante diélectrique ou la résistivité (risque de dégradation de 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 magnétorésistant ;
- la tension d'alimentation (amplitude et fréquence) : Son influence, de par le principe même du capteur, est présente dans la grandeur électrique de sortie.

■ Si l'on désigne par $g_1, g_2...$ les grandeurs d'influence, la relation entre grandeur électrique de sortie s et mesurande m , qui dans le cas idéal serait :

$$s = F(m)$$

devient :

$$s = F(m, g_1, g_2...)$$

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 hygroscopie 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.