



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique
Université Labri Ben M'hindi, Oum El Zouaghi
Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Année ; 3^{ème} /ELN
Matière ; Capteurs et Chaines de mesure

Chapitre 1: Les capteurs et chaine d'acquisition

1. Grandeurs électriques et grandeurs non électriques :

Les grandeurs électriques sont par exemple: le courant électrique I (unité: Ampère), tension électrique V (unité : Volt), charge électrique C_b (unité: Coulomb), et impédance électrique Ω (unité: Ohm).

Les grandeurs physiques mesurables sont par exemple: Angle, Contrainte, Débit, Déplacement, Distance, Force, Lumière, Niveau, Position, Pression, Son, Température, Vitesse ...,

2. Définitions et généralités sur les capteurs :

Organe chargé de prélever une grandeur physique à mesurer (Angle, Contrainte, Débit, Déplacement, Distance, Force, Lumière, Niveau, Position....) et de la transformer en une grandeur ou signal électrique exploitable (courant électrique I , tension électrique V , charge électrique C_b) (Figure1).

-La grandeur physique à mesurer « mesurande » constitue le signal d'entrer (ou stimulus) du capteur.

-La grandeur exploitable étant de nature électrique constitue le signal de mesure (signal électrique de sortie (réponse)) du capteur. Elle est une représentation de la grandeur à mesurer.

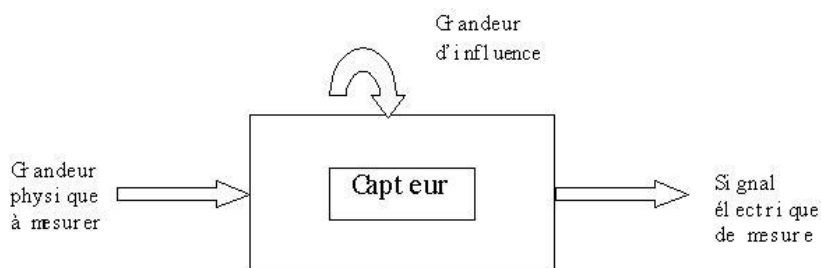


Figure1. Fonction d'un capteur [4]

Le capteur est donc un organe de saisie d'informations, c'est le premier maillon de toute chaîne de mesure, acquisition de données, de tout système d'asservissement, régulation, de tout dispositif de contrôle, surveillance, sécurité.

Hormis le **mesurande** à caractériser, le capteur peut être soumis à d'autres grandeurs physiques susceptibles d'influencer la grandeur électrique de sortie, qu'il n'est pas possible de distinguer de l'action du mesurande.

Ces grandeurs « **parasites** » auxquelles la réponse du capteur peut être sensible sont des **grandeurs d'influence**.

La réponse, $s = f(m)$ (1), d'un capteur devient:

$$s = f(m, g_1, g_2, \dots, g_n) \quad (2)$$

Pour avoir une réponse représentative du seul mesurande m , il faut:

- soit minimiser l'importance des grandeurs d'influence au niveau du capteur en le protégeant par isolement adéquat;
- soit stabiliser ces grandeurs d'influence à des valeurs fixes et connues et procéder à un étalonnage du capteur dans ces conditions de fonctionnement;
- soit utiliser un montage de compensation des parasites.

La **mesure** est l'évaluation d'une grandeur par comparaison avec une autre grandeur de même nature prise pour unité.

Le **mesurage** ensemble d'opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur [1,6].

3. Différents types de capteurs:

3.1. 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 dans le tableau 1; dans la suite, on en donne une description sommaire destinée à éclairer leur mode d'application.

Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux de rayonnement optique	Pyroélectricité Photoémission Effet photovoltaïque Effet photoélectromagnétique	Charge Courant Tension Tension
Force Pression Accélération	Piézoélectricité	Charge
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension

Position (aimant)	Effet Hall	Tension
-------------------	------------	---------

Tableau 1. Capteurs actifs : principes physiques de base [1,7,9]

3.2. Capteurs passifs:

Il s'agit d'impédances dont l'un des paramètres déterminants est sensible au mesurande.

Dans l'expression littérale d'une impédance sont présents des termes liés :

- d'une part à sa géométrie et à ses dimensions ;
- d'autre part aux propriétés électriques des matériaux : résistivité ρ , perméabilité magnétique μ , constante diélectrique ϵ (Tableau 2).

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 ;
- 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 [4].

Mesurande	Effet utilisé (grandeur de sortie)	Matériaux
Température	Résistivité	Platine, Nickel, cuivre, semi-conducteurs.
Très basse température	Cste diélectrique	Verre.
Flux optique	Résistivité	semi-conducteurs
Déformation	Résistivité Perméabilité	Alliages nickel Alliages ferromagnétiques
Position	Résistivité	Magnétorésistances: Bismuth, antimoine d'indium
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

Tableau 2. Exemples d'application d'effets physiques à la réalisation de capteurs actifs : (a) thermoélectricité, (b) pyroélectricité, (c) piézoélectricité, (d) inductionélectromagnétique, (e) photoélectricité, (f) effet Hall [1,7,9]

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. 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 2 donne 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. 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 [3,4].

3.3. Capteurs numérique:

La sortie est une séquence d'états logiques qui, en se suivant, forme un nombre. La sortie peut prendre une infinité de valeurs discrètes. Le signal des capteurs numériques peut être du type :

- Train d'impulsions, avec un nombre précis d'impulsions ou avec une fréquence précise.
- Code numérique binaire.
- bus de terrain.

Quelques capteurs numériques typiques :

- Codeur rotatif incrémental.
- Codeurs référentiels AA34 6,7 [9].

3.4. Capteurs intelligent:

En plus de leur faculté de mesurer une grandeur physique, ils possèdent d'autres fonctionnalités dont voici une liste non exhaustive :

- Fonctions configurables de traitement du signal (filtre, gains, etc.).
- Fonctions d'auto-test et d'auto-contrôle.
- Etalonnage automatique.
- Sortie sur des bus de terrain.

3.5. Capteurs composite:

Un corps d'épreuve est un capteur qui n'est pas sensible au mesurande, mais à l'un de ses effets.

Il permet de délivrer une grandeur physique non électrique appelée mesurande secondaire, un capteur adéquat convertit ce dernier en grandeur électrique.

L'ensemble formé par le corps d'épreuve et un capteur actif ou passif constitue un capteur composite.

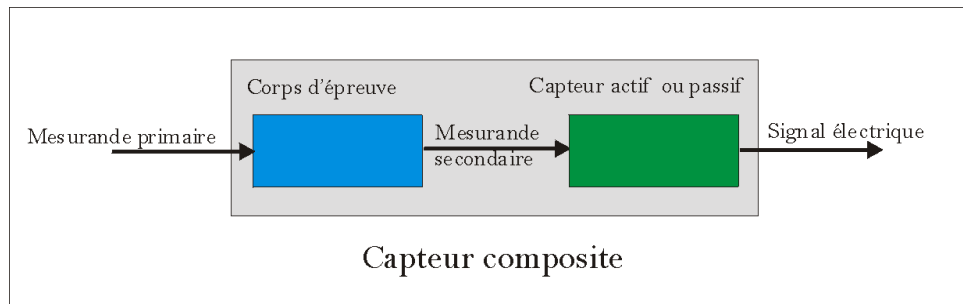


Figure2. Structure d'un capteur composite [7]

4. Phénomènes physiques utilisés dans les capteurs:

4.1. 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).

Application: détermination à partir de la mesure de e d'une température inconnue T_1 lorsque T_2 (0 °C par exemple) est connue (Figure3a).

4.2. 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 (Figure3b) [7].

4.3. 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.

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 (Figure3c).

4.4. 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 [4].

La mesure de la f.é.m. d'induction permet de connaître la vitesse du déplacement qui est à son origine (Figure3d).

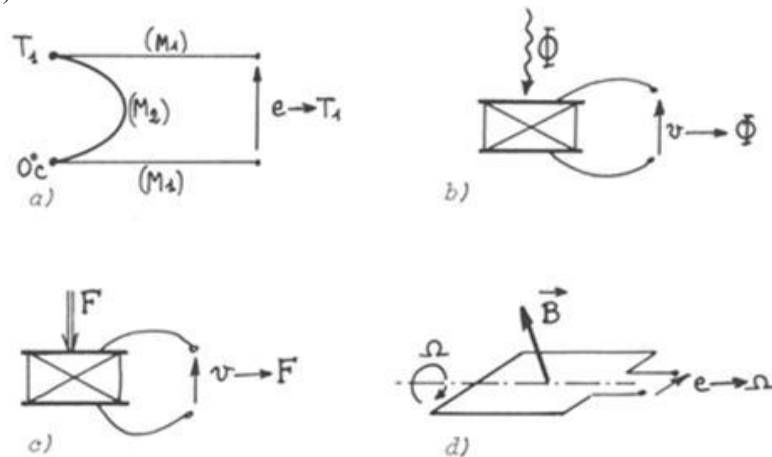


Figure3. : a) thermoélectricité, b) pyroélectricité, c) Piézoélectricité, d) induction électromagnétique [9]

4.5. Effets photoélectriques:

On en distingue plusieurs, 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 (Figure4).

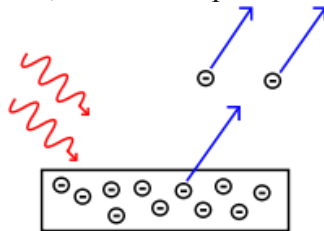


Figure4. Effet photoélectrique [4]

4.6. Effet photoémissif :

Les électrons libérés sont émis hors de la cible éclairée et forment un courant collecté par application d'un champ électrique (Figure5).

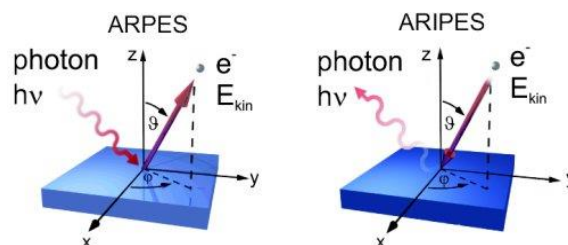


Figure5. Effet photoémissif [4]

4.7. Effet photovoltaïque:

Des électrons et des trous sont libérés au voisinage d'une jonction de semiconducteurs P et N illuminée ; leur déplacement dans le champ électrique de la jonction modifie la tension à ses bornes (Figure6).

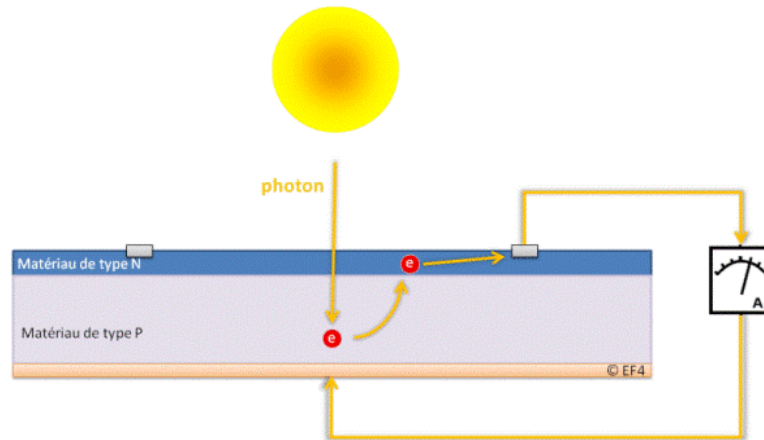


Figure6. Effet photovoltaïque [4]

4.8. 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 :

$$V_H = K_H I B \sin\theta \quad (3)$$

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 I 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 (Figure7).

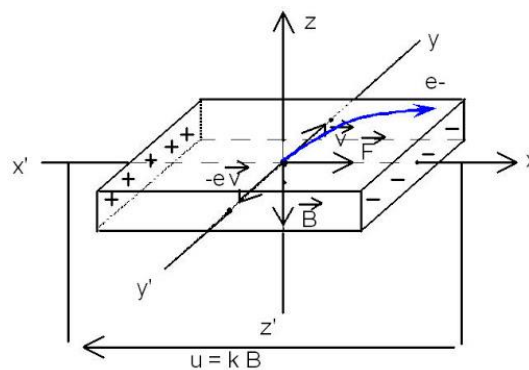


Figure7. Principe de l'effet Hall dans un conducteur filiforme à section rectangulaire [4]

4.9. Effet magnétorésistif:

La **magnétorésistance** est la propriété qu'ont certains matériaux de présenter une **résistance électrique** qui évolue lorsqu'ils sont soumis à un **magnétique**, mais ce dernier est cependant incapable de faire varier la résistance électrique de plus de 5 %.

Dans un semiconducteur, on peut observer une magnétorésistance proportionnelle à $(1+(\mu B)^2)$ (4),
 où μ est la mobilité électronique (en $m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$ ou T^{-1}) et B le champ magnétique (en teslas).
 L'antimoniure d'indium, semiconducteur à haute mobilité, pourrait présenter une mobilité au-dessus de $4 m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$ à 300 K. Ainsi, dans un champ de 0.25 T, on observerait une augmentation de magnétorésistance de 100 % [1].

4.10. Effet Doppler:

L'effet Doppler est le **décalage de fréquence d'une onde** (mécanique, acoustique, électromagnétique ou d'une autre nature) observé entre les mesures à **l'émission et à la réception**, lorsque la distance entre **l'émetteur** et le **récepteur** varie au cours du temps.

Ainsi l'effet Doppler exprime que si le receveur d'un signal vibrant est en mouvement par rapport à la source émettrice du dit signal, il perçoit une fréquence différente de celle d'émission [6].

La relation est donnée par:

$$F_o = F_s / (1 \pm V / V_c) \quad (5)$$

$F_o(\text{Hz})$ est la fréquence perçue par l'observateur (ou auditeur).

$F_s(\text{Hz})$ est la fréquence de la source.

$V(\text{m/s})$ est la vitesse relative entre source et receveur du signal.

$V_c(\text{m/s})$ est la célérité de l'onde dans le milieu d'évolution du phénomène.

Le signe + correspond à un moment où la source s'éloigne du récepteur.

Le signe - correspond à un moment où la source se rapproche du récepteur.

Exemple de Capteurs hyperfréquences utilisant l'effet Doppler:

Système non-intrusif installé en accotement de chaussée, sur mât, ou portique. Un train d'ondes électromagnétiques pulsées est émis à une fréquence de l'ordre de 10 et 25GHz par une antenne radar en direction d'un véhicule. Au contact du véhicule, l'onde est réfléchiée et renvoyée modifiée vers le capteur.

L'onde renvoyée par le véhicule permet de calculer la vitesse à partir du décalage de fréquence entre le signal émis et reçu. La forme et l'amplitude du signal reçu sont directement liées à la forme du véhicule et à sa surface de réflexion. La valeur de la SER (Surface Équivalente Radar exprimée en m^2) analysée permet de distinguer la silhouette des véhicules (VL/PL). Le capteur peut aussi estimer la longueur du véhicule [6,12].

4.11. Effet Seebeck:

Une différence de potentiel apparaît à la jonction de deux matériaux soumis à une différence de température. L'utilisation la plus connue de l'effet Seebeck est la mesure de température à l'aide de thermocouples. Cet effet est également à la base de la génération d'électricité par effet thermoélectrique.

La figure ci-dessous montre le circuit thermoélectrique de base. Deux matériaux conducteurs 1 et 2 de natures différentes sont reliés par deux jonctions froide et chaude de températures T_c et T_f . Dans le cas de l'effet Seebeck, une différence de température $dT = T_c - T_f$ est appliquée entre les deux jonctions, ce qui entraîne l'apparition d'une différence de potentiel dV entre eux.

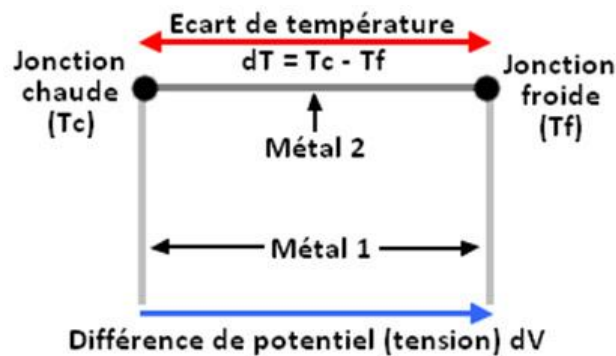


Figure8. Principe de l'effet Seebeck [10]

5. Structure globale d'une chaîne de mesure complète:

Généralement, la grandeur à mesurer, appelée mesurande, n'est pas accessible directement et les méthodes de mesure mises en œuvre font appel à différentes lois physiques et propriétés des matériaux. Une chaîne de mesure est généralement constituée des éléments suivants, schématisés sur la figure suivante :

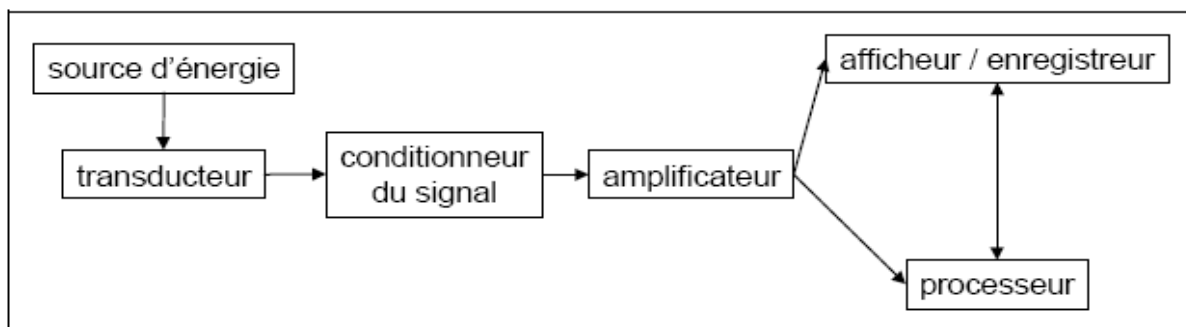


Figure8. Schéma type d'une chaîne de mesure [6]

- Transducteur:

C'est l'élément fondamental du dispositif, fondé sur l'utilisation d'une loi physique particulière. Il fait correspondre à une valeur G_e de la grandeur à mesurer une valeur G_s d'une autre grandeur, généralement électrique, appelée grandeur de sortie. On recherche généralement des transducteurs tels que la relation entre la variation du mesurande et la variation du signal sortant du transducteur soit linéaire, ou tout au moins à utiliser la partie linéaire de cette relation si celle-ci est plus complexe.

- Conditionneur:

C'est un circuit électrique ou électronique qui convertit, compense ou modifie le signal de sortie du transducteur afin de le transformer en un signal électrique usuel. Le conditionneur est souvent physiquement indissociable du transducteur. Le pont de Wheatstone évoqué à l'alinéa précédent permet ainsi de transformer la variation de résistance du transducteur en une variation de tension aux bornes du pont.

- Amplificateur:

C'est un élément indispensable lorsque le signal de sortie du conditionneur est faible, il est très souvent nécessaire de les amplifier dans des rapports de 10 à 1000, ou plus. Après amplification, on atteint des tensions comprises généralement entre 0 et 5 ou 10V.

- Afficheur/enregistreur:

C'est un élément qui mesure le signal (courant ou tension) sortant de l'amplificateur pour le restituer sous une forme lisible et interprétable par l'utilisateur.

- Processeur:

C'est un élément présent sur tous les dispositifs de mesure affichant et/ou délivrant un signal numérique. Il s'agit généralement d'un convertisseur analogique/numérique.

Dans la pratique, le terme « capteur » désigne des choses différentes selon les auteurs et les interlocuteurs :

- Le transducteur lui-même ;
- L'ensemble transducteur + conditionneur ;
- L'ensemble de la chaîne de mesure représentée en Figure 8.

Les distinctions sont parfois difficiles car de plus en plus de transducteurs sont physiquement associés à des conditionneurs et des amplificateurs, les progrès de la miniaturisation ayant permis de réduire considérablement la taille de ces éléments. L'intérêt principal de cette intégration matérielle réside dans la réduction des perturbations du signal de sortie du transducteur (interférences, parasites, pertes d'énergie et de signal, etc.) avant son traitement par les éléments suivants.

Nous appellerons capteur la partie de la chaîne de mesure en contact avec le milieu où s'effectue le mesurage, et transmetteur le reste des éléments de la chaîne de mesure [3,4].

Références bibliographiques:

1. G. Asch, « Les Capteurs en Instrumentation Industrielle », Dunod, 2010.
2. P. Dassonville, « Les Capteurs : Exercices et problèmes corrigés », Dunod, 2005.
3. T. Lang, « Electronique des systèmes de mesure », Masson, 1992.
4. G. Asch, « Acquisition de données : du capteur à l'ordinateur », Dunod, 2003.
5. F. Cottet, « Traitement des signaux et acquisition de données : Cours et exercices », Dunod, 1999.
6. M. Cerr, « Instrumentation industrielle », Tomes 1 et 2 ; Edition Tech et Doc.

7. G. Asch et al. « Acquisition de données », 3^e édition, Dunod, 2011.
8. P. Oguic, « Mesures et PC », Edition ETSF.
9. F. Boudoin, M. Lavabre, « Capteurs : principales utilisations », Edition Casteilla, 2007
10. J. G. Webster, "Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook", Taylor & Francis Ltd.
11. <http://www.elharzli.com/Lescapteurs.html>
12. <http://www.equipementsdelaroute.developpement-durable.gouv.fr/capteurs-hyperfrquences-utilisant-l-effet-doppler-a349.html>

