



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique
Université Larbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi
Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique
Année ; Master I /ESE
Matière ; Capteurs intelligents et MEMS



Chapitre 1: Rappels sur les capteurs

1. Capteurs actifs et passifs:

1.1. 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	Charge
	Photoémission	Courant
	Effet photovoltaïque	Tension
	Effet photoélectromagnétique	Tension
Force Pression Accélération	Piézoélectricité	Charge
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position (aimant)	Effet Hall	Tension

Tableau1. Capteurs actifs : principes physiques de base [1,6]

1.1.1. 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 (Figure1.a).

1.1.2. 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 [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 (Figure1.b).

1.1.3. 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 (Figure1.c) [1].

1.1.4. 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.e.m dont il est le siège est égale (et de signe contraire) à la vitesse de variation du flux d'induction [6,7].

Application : la mesure de la f.é.m. d'induction permet de connaître la vitesse du déplacement qui est à son origine (Figure1.d).

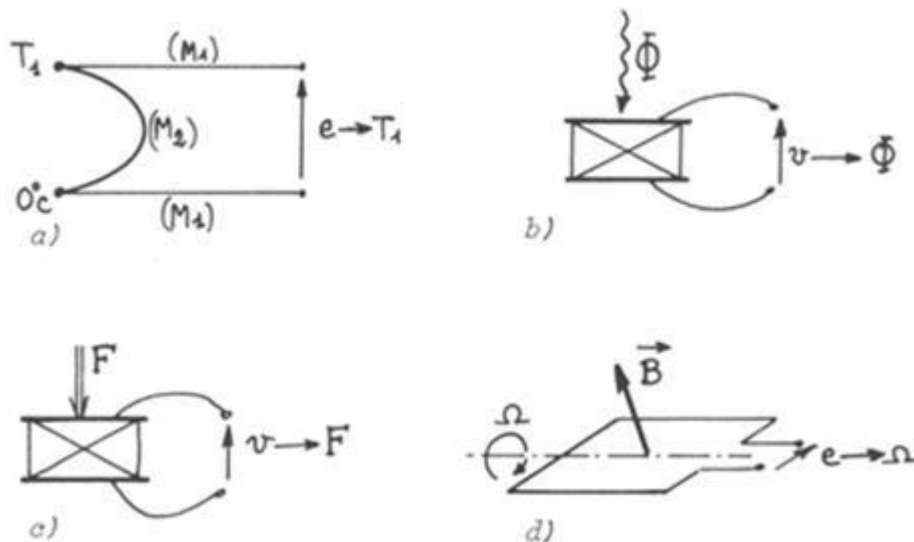


Figure1 : a) thermoélectricité, b) pyroélectricité, c) Piézoélectricité, d) induction électromagnétique [1,6]

1.1.5. 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 (Figure2).

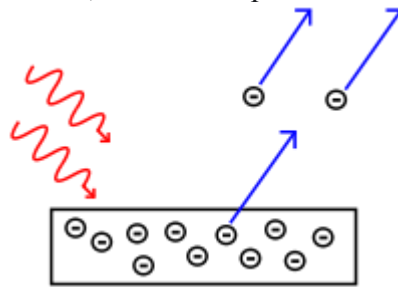


Figure2. Effet photoélectrique [7,9]

1.1.6. Effet photoémissif:

Les électrons libérés sont émis hors de la cible éclairée et forment un courant collecté par application d'un champ électrique (Figure3).

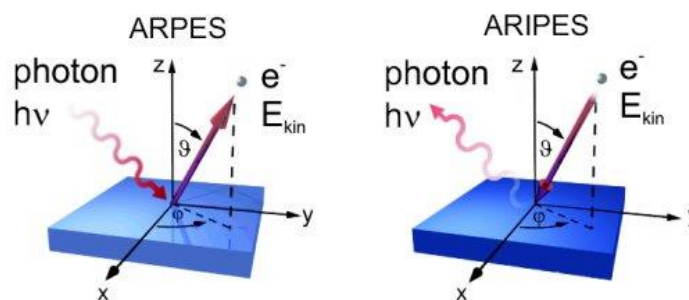


Figure3. Effet photoémissif [7,9]

1.1.7. 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 (Figure4).

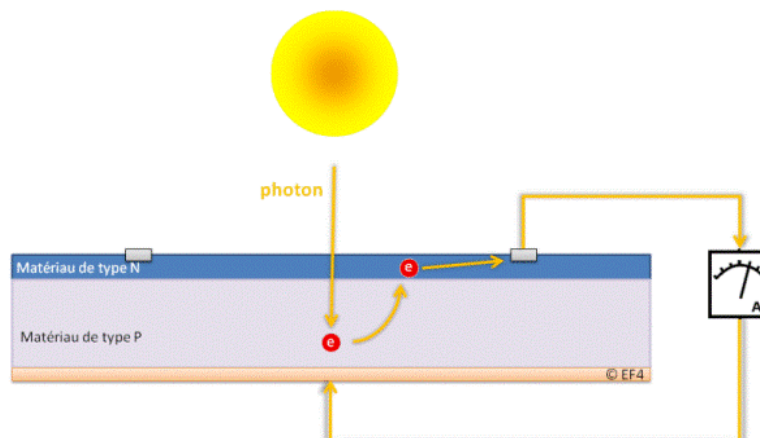


Figure4. Effet photovoltaïque [7,9]

1.1.8. Effet photoélectromagnétique:

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.

Applications: Les effets photoélectriques qui permettent d'obtenir des courants ou tensions 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 [1,6].

1.1.9. 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 :

$$V_H = K_H I B \sin\theta \quad (1)$$

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 (Figure5).

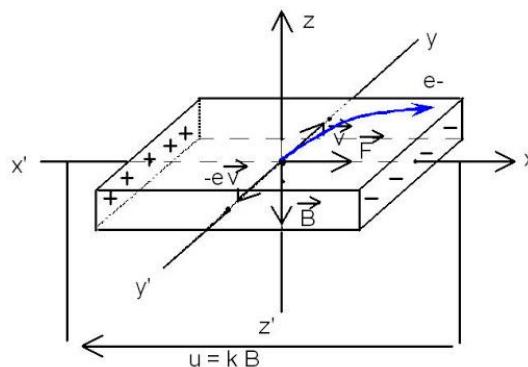


Figure5. Principe de l'effet Hall dans un conducteur filiforme à section rectangulaire [1]

1.1.10. 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 % [7].

1.1.11. 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 [12].

La relation est donnée par:

$$F_o = F_s / (1 \pm V / V_c) \quad (2) [12]$$

F_o (Hz) est la fréquence perçue par l'observateur (ou auditeur).

F_s (Hz) est la fréquence de la source.

V (m/s) est la vitesse relative entre source et receveur du signal.

V_c (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 m²) analysée permet de distinguer la silhouette des véhicules (VL/PL). Le capteur peut aussi estimer la longueur du véhicule [6].

1.1.12. 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.

Dans la pratique le coefficient Seebeck ne peut être mesuré que pour un couple de matériaux. Il est donc nécessaire de disposer d'une référence [1].

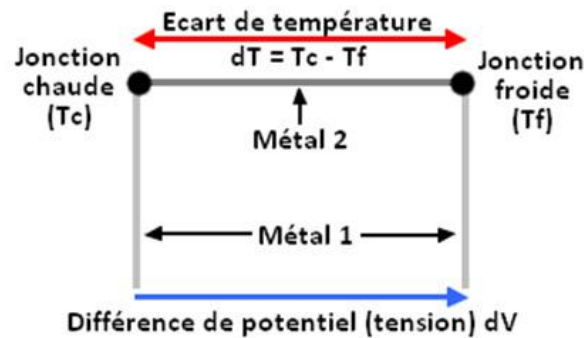


Figure6. Principe de l'effet Seebeck [1,9]

1.2. 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 (Tableau2).

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 [1,6].

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.

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

Tableau2. Exemples d'application d'effets physiques à la réalisation de capteurs actifs : (a) thermoélectricité, (b) pyroélectricité, (c) piézoélectricité, (d) induction électromagnétique, (e) photoélectricité, (f) effet Hall [1,6]

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'extensomètre 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 [1,6,9].

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 [1,6].

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.

2. Grandeurs physiques de mesure:

Les capteurs doivent pouvoir mesurer ou contrôler les grandeurs physiques les plus diverses.

2.1. Domaine d'évolution de la grandeur:

Elle peut être statique ou dynamique :

- En statique, le mesurande conserve dans le temps une valeur stable ou peu rapidement variable. C'est le domaine des phénomènes continus. On convient de classer dans ce domaine les phénomènes variants de 0 à quelques hertz (Hz).
- En dynamique, le mesurande varie en fonction du temps selon une loi de fréquence élevée. On convient de partager le domaine dynamique en plusieurs tranches :
- de **0 à 250 Hz**, très basse fréquence (**TBF**).
- de **250 Hz à 2 KHz**, basse fréquence (**BF**).
- de **2 à 10 KHz**, moyenne fréquence (**MF**).
- **au-delà de 10 KHz**, hautes fréquence (**HF**) [7].

2.2. Etendue des valeurs pouvant être prises par le mesurande:

Elle peut être classée en deux catégories :

a-Valeurs courantes est définie par les valeurs extrêmes que peut prendre le mesurande de manière courante.

b-Valeurs accidentelles est définie par les valeurs extrême que peut prendre le mesurande sous l'action de causes extérieur ou prévisibles. Il s'agit la plupart du temps de valeurs de faible durée [7,9].

2.3. Durée du phénomène à mesurer:

C'est une caractéristique importante à considérer parallèlement au domaine d'évolution de la grandeur, on distingue :

- Les phénomènes statiques de très longue durée.
- Les phénomènes dynamiques de longue durée. (Essai d'endurance ou de fatigue).
- Les phénomènes dynamiques de courte durée (transitoires) [9].

2.4. Grandeurs d'influences:

Grandeurs étrangères peuvent provoquer sur le capteur c'est donc une cause d'erreurs agissant sur le signal de sortie. Citons en particuliers :

- La température (la plus répandue et la plus gênante).
- La pression comme :
- Les vibrations mécaniques ou acoustiques, les chocs, le temps.
- La position du capteur et sa fixation.
- L'humidité, la projection d'eau.
- Les ambiances corrosives.
- Les perturbations électromagnétiques.
- Les rayonnements nucléaires.
- Les accélérations et la pesanteur.
- L'alimentation et la pesanteur.
- L'alimentation électrique du capteur.

3. Constitution d'un capteur:

Les parties constitutives d'un capteur sont les suivantes :

3.1. Corps d'épreuve:

C'est un élément mécanique qui réagit à la grandeur à mesurer, il a pour rôle de transformer la grandeur à mesurer en une autre grandeur physique dite mesurable. Cette grandeur constitue la réaction du corps d'épreuve.

3.2. Élément de transduction:

C'est un élément sensible lié au corps d'épreuve. Il traduit les réactions du corps d'épreuve en une grandeur électrique constituant le signal de sortie.

3.3. Boîtier:

C'est un élément mécanique de protection, de maintien et de fixation du capteur.

3.4. Instrument de mesure:

Appareil mesureur, destiné à exécuter les mesures en atelier.

3.5. Chaîne de mesure:

C'est une suite d'éléments transducteurs et d'organe de liaison d'un instrument de mesure allant du capteur qui est le premier élément au dispositif d'indication, de stockage ou de traitement qui en est le dernier élément.

3.6. Boucle de régulation:

C'est un ensemble d'éléments utilisé par l'asservissement à une grandeur, elle va du capteur à l'actionneur (organe de sortie). Les éléments intermédiaires traitent généralement le signal par voie électronique ou pneumatique.

3.7. Transmetteur:

Il est influencé par une grandeur physique mesurée, qui transmet un signal se peut être un ensemble de capteurs, d'amplificateur ou d'un convertisseur.

3.8. Transducteur:

Instrument qui sert à transformer suivant une loi déterminée la grandeur mesurée en une autre grandeur en valeur de la même grandeur avec précision spécifiée [4,7,9].

4. Conditionnement électronique du signal électrique:

Selon les cas, on a les fonctions suivantes pour le conditionneur électronique du signal électrique fournit par le capteur:

-Alimentation électrique du capteur (si elle est nécessaire).

- Mise en forme et amplification du signal de sortie.
- Filtrage, correction, traitement du signal.
- Conversion du signal (analogique / numérique / tension / fréquence ...).
- Mise à niveau du signal de sortie pour sa transmission à distance.

Ce module électronique porte souvent le nom de transmetteur (Figure 7).

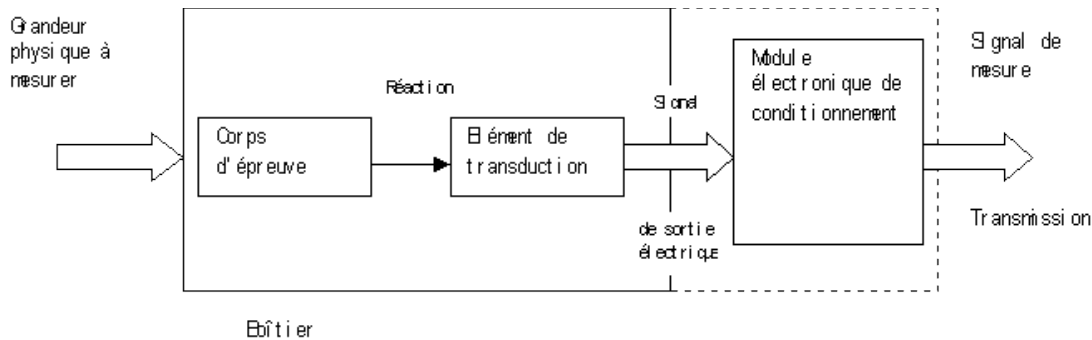


Figure 7. Eléments constitutifs d'un capteur [4]

5. Classifications des capteurs:

5.1. Capteurs analogique:

La sortie est une grandeur électrique dont la valeur est une fonction de la grandeur physique mesurée par le capteur. La sortie peut prendre une infinité de valeurs continues. Le signal des capteurs analogiques peut être du type :

- Sortie tension ;
- Sortie courant ;
- Règle graduée, cadran, jauge (avec une aiguille ou un fluide).

Quelques capteurs analogiques typiques :

- Capteur à jauge de contrainte ;
- Un capteur électrique passif (inductif) de déplacements linéaires.
- Thermocouple.

La grandeur du signal peut prendre une infinité de valeurs dans un intervalle donné. L'information peut alors être :

- **Continue** : on mesure le niveau (tension ou intensité).

- **Temporelle** : on mesure la période ou la fréquence [4,5,7].

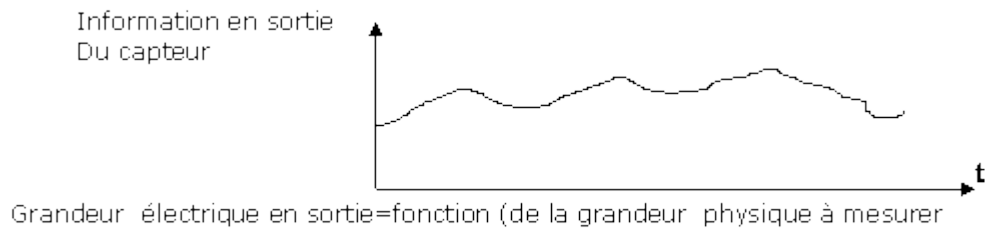


Figure8. Signal de sortie d'un capteur analogique [7]

5.2. Capteur numérique:

La sortie est une séquence d'états logiques ou binaires 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 [4,6,9].

5.3. Capteurs logiques:

La sortie est un état logique que l'on note 1 ou 0. La sortie peut prendre ces deux valeurs.

Il y a notamment 4 types de capteurs logiques :

- Courant présent/absent dans un circuit ;
- Potentiel, souvent 5 V/0 V ;
- DEL allumée/éteinte ;
- Signal pneumatique (pression normale/forte pression) [7] ;

L'information peut alors être :

Tout ou rien (TOR): exemple de l'état d'une vanne ouverte ou fermée.

Ces capteurs génèrent une information électrique de type **binaire** (Vrai ou faux) qui caractérise le phénomène à détecter ou capter.

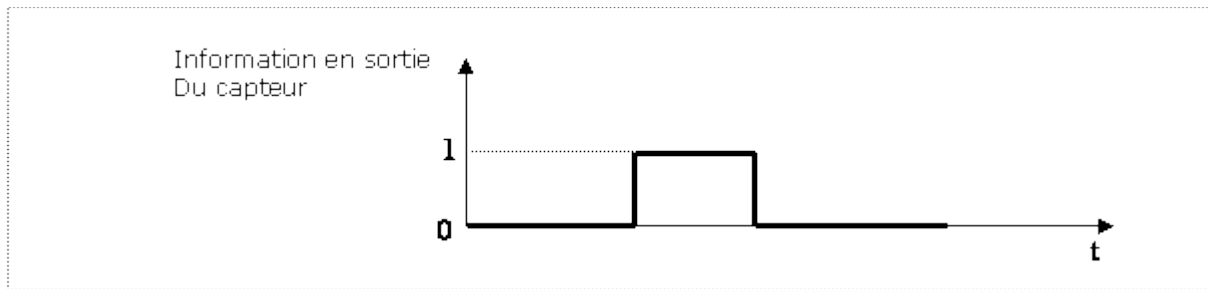
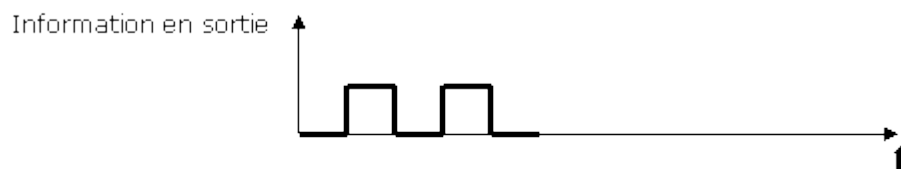


Figure9. Signal de sortie d'un capteur TOR [7]

Remarque : On distingue les capteurs TOR avec ou sans contact physique vis-à-vis de l'objet à détecter.

Un signal électrique périodique (Signal carré) à période variable.

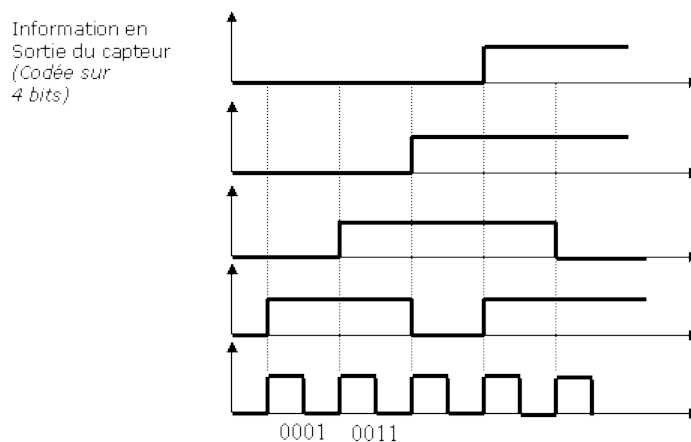


Exemple de signal en sortie d'un capteur numérique dont la période est caractéristique de la grandeur physique à capter

Figure10. Signal de sortie carré d'un capteur numérique [9]

Soit un signal numérique codé sur n variables binaires (n Bits).

On donne en figure11 un exemple de signal de sortie d'un capteur numérique dont le nombre binaire est codé sur 4 bits et qui est caractéristique de la grandeur physique à mesurer.



Exemple de signal en sortie d'un capteur numérique dont le nombre binaire (Codé sur 4 bits) est caractéristique de la grandeur physique à capter

Figure11. Exemple de signal de sortie d'un capteur numérique [9]

Quelques capteurs logiques typiques :

- Capteurs de fin de course ;
- Capteurs de rupture d'un faisceau lumineux ;
- Divers capteurs de position.

5.4. Capteurs proprioceptifs et extéroceptifs:

En robotique mobile, il est important de distinguer entre des capteurs proprioceptifs, qui effectuent leurs mesures par rapport à ce qu'ils perçoivent localement du déplacement du robot, ou extéroceptifs, qui se basent sur des mesures prises par rapport à son environnement global (repère absolu). Par exemple, des capteurs mesurant les déplacements angulaires des roues d'un robot pourront permettre de reconstituer sa trajectoire à condition que les roues ne glissent pas (dérapage, patinage). Ce sont des capteurs proprioceptifs. Par contre, le repérage par une tourelle laser de balises optiques fixées dans l'environnement de déplacement du robot permet une mesure absolue. On parle alors d'un capteur extéroceptif [4,7,10].

5.5. Capteurs intelligents:

En plus de leur faculté de mesurer une grandeur physique, les capteurs intelligents 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 [5,13].

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-leffet-doppler-a349.html>
13. Lin, Y.-L., Kyung, C.-M., Yasuura, H., Liu, Y., Smart Sensors and Systems.