

Chapitre n°2 : Les capteurs

Introduction

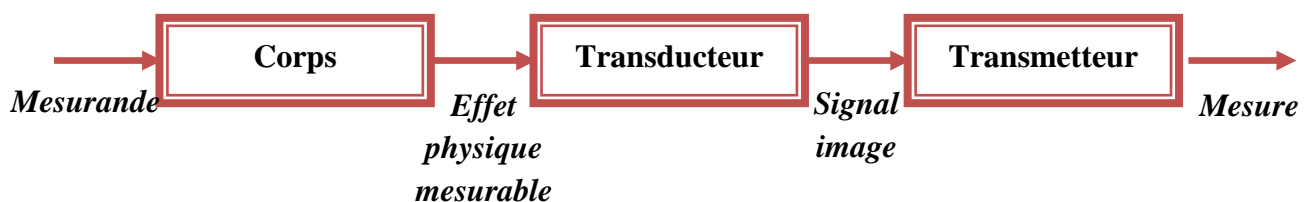
Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services, loisirs ...), on a besoin de contrôler de nombreux paramètres physiques (température, force, position, vitesse, luminosité, ...).

Le capteur est l'élément indispensable à la mesure de ces grandeurs physiques.

I. Structure et fonctions principales d'un capteur

Un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (très souvent électrique). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande.

De façon simple, un capteur peut être défini comme un transducteur convertissant une grandeur physique (**mesurande**) en un signal électrique (**mesure**). Cette transformation peut être directe dans quelques cas simples, mais en réalité, la technologie des capteurs fait souvent appel à plusieurs conversions de phénomène physique avant d'arriver au signal de sortie.



- **Corps d'épreuve** : C'est un élément mécanique qui réagit sélectivement à la grandeur à mesurer. Il transforme la grandeur à mesurer en une autre grandeur physique dite mesurable.
- **Transducteur** : Il traduit les réactions du corps d'épreuve en une grandeur électrique constituant le signal de sortie.

- **Transmetteur** : Il réalise la mise en forme, le filtrage, la mise à niveau du signal de sortie pour sa transmission à distance. Il peut être incorporé ou non au capteur proprement dit.

II. Classification des capteurs

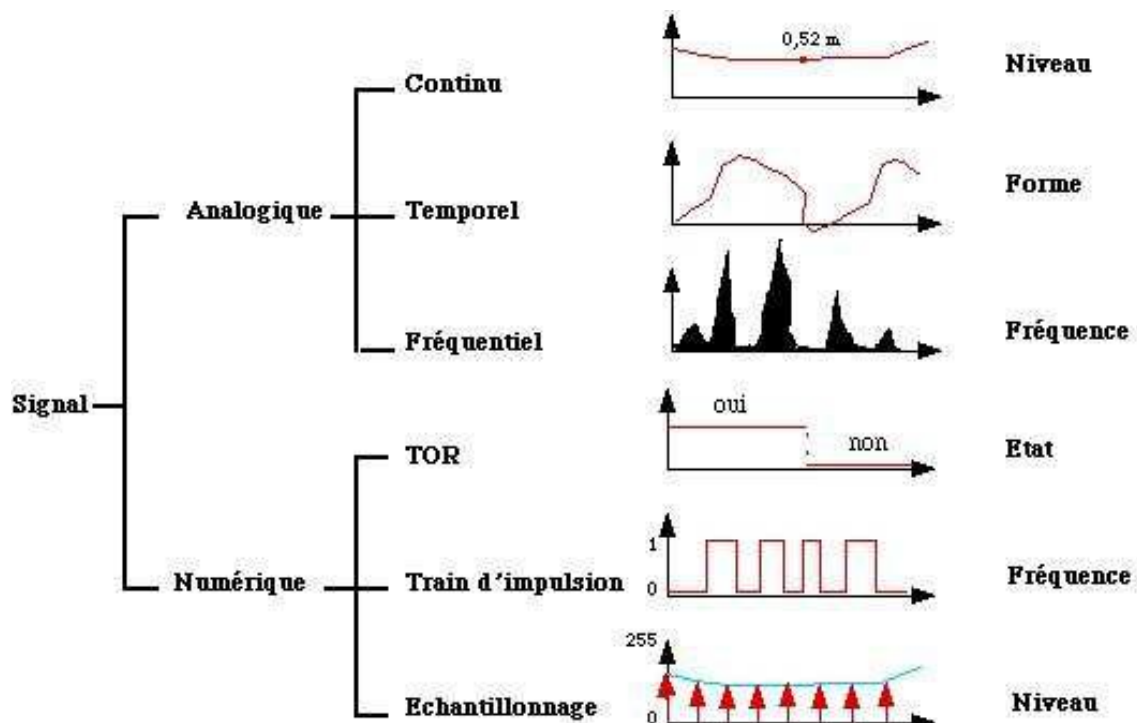
➤ Par la nature du signal d'entrée

Les principales grandeurs physiques à mesurer sont (liste non exhaustive) :

- ✚ La présence d'un objet, sa position, son déplacement linéaire/angular, sa vitesse linéaire/angular, son accélération ;
- ✚ La force, le couple, la pression ;
- ✚ La température, l'humidité, la luminosité, la vitesse du vent ;
- ✚ Le débit, le niveau, le bruit...

➤ Par la nature du signal de sortie

La sortie d'un capteur peut varier de 2 façons différentes, et délivre donc une information de type analogique ou numérique.



Un signal est dit analogique si l'amplitude de la grandeur physique le représentant peut prendre une **infinité** de valeurs dans un intervalle donné.

- **Signal continu** : C'est un signal qui varie 'lentement' dans le temps : température, débit, niveau.
- **Forme** : C'est la forme de ce signal qui est importante : pression cardiaque, chromatographie, impact.
- **Fréquentiel** : C'est le spectre fréquentiel qui transporte l'information désirée : analyse vocale, sonar, spectrographie.

Un signal est dit **numérique** si l'amplitude de la grandeur physique le représentant ne peut prendre qu'un nombre **fini** de valeurs. En général ce nombre fini de valeurs est une puissance de 2.

- **Tout ou rien (TOR)** : Il informe sur l'état bivalent d'un système.

Exemple : une vanne ouverte ou fermée.

- **Train d'impulsion** : Chaque impulsion est l'image d'un changement d'état. Exemple : un codeur incrémental donne un nombre fini et connu d'impulsion par tour.
- **Echantillonnage** : C'est l'image numérique d'un signal analogique.

Exemple : température, débit, niveau, son (pression)...

➤ *Par la distinction actif/passif*

Capteurs passifs :

Ils font intervenir une impédance dont la valeur varie avec la grandeur physique ; il faut donc intégrer un capteur passif dans un circuit avec une alimentation.

✚ **Capteurs résistifs** : R varie avec la grandeur physique :

- mesure de température par résistance à fil de platine (sonde Pt100), thermistance (CTN, CTP) ;
- mesure d'effort par jauge de contrainte ;
- mesure d'intensité lumineuse par photorésistance.

✚ **Capteurs inductifs** : L varie avec la grandeur physique :

- mesure de déplacement par inductance variable (Transformateur Différentiel Linéaire LVDT) ;
- mesure d'effort par capteur magnéto-élastique.

✚ **Capteurs capacitifs** : C varie avec la grandeur physique :

- mesure de déplacement et de position : l'objet dont on veut mesurer le déplacement se déplace avec une armature du condensateur
- mesure de niveau : la présence de liquide modifie la valeur de la capacité.

Capteurs actifs :

La grandeur d'entrée ou ses variations génère directement une énergie (tension, courant, charge électrique). Cette énergie étant généralement faible, les capteurs nécessitent tout de même l'utilisation d'amplificateurs.

- Capteurs à effet photoélectrique ou photovoltaïque : basés sur la libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux, ou plus généralement d'une onde électromagnétique. Exemple : mesure de lumière (capteur CCD, photodiode).
- Capteurs à effet thermoélectriques : basés sur la création d'une tension à la jonction de deux matériaux soumis à une différence de température. Exemple : mesure de température (thermocouple).
- Capteurs à effet piézoélectrique : l'application d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézoélectriques (le quartz par exemple) entraîne l'apparition d'une tension entre leurs faces opposées. Exemple : mesure d'effort, d'accélération (accéléromètre).
- Capteur à effet d'induction électromagnétique : La variation du flux d'induction magnétique dans un circuit électrique induit une tension électrique aux bornes de ce circuit. Exemple : détection de passage d'un objet métallique (détecteur inductif, capteur d'ABS pour automobile).
- Capteur à Effet Hall : Un champ magnétique B et un courant électrique I créent dans un matériau semi-conducteur une tension proportionnelle à B et à I .
Exemple : mesure de courant (pince ampèremétrique).

<i>Grandeur physique mesurée</i>	<i>Effet utilisé</i>	<i>Grandeur de sortie</i>
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux de rayonnement optique	Photo-émission Effet photo-électrique	Courant Tension
Force Pression	Piézo-électricité	Charge électrique
Accélération Vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position (Aimant) Courant	Effet Hall	Tension

III. Caractérisation des capteurs

Étendue de mesure : il s'agit de la plage de valeurs possibles du mesurande m :

$$EM = m_{\max} - m_{\min}.$$

Sensibilité : elle traduit la capacité du capteur à détecter la plus petite variation possible du mesurande, et est la pente de la caractéristique entrée/sortie du capteur. Plus un capteur est sensible plus la mesure pourra être précise. C'est une caractéristique importante pour l'exploitation et l'interprétation des mesures.

Résolution : plus petite variation du mesurande mesurable par le capteur.

Erreurs : Le capteur et toute la chaîne de traitement de la mesure introduisent des erreurs : bruit, décalage, référence, linéarité...

L'erreur globale de mesure ne peut être qu'estimée. Une conception rigoureuse de la chaîne de mesure permet de réduire les erreurs et donc l'incertitude sur le résultat. On parle de :

- ✚ Fidélité : un capteur est fidèle si ses valeurs ne changent pas au cours du temps (mesures reproductibles)
- ✚ Justesse : un capteur est juste si ses valeurs ne changent pas quand on les compare à des valeurs étalon, ou à des valeurs données par d'autres capteurs normalisés.
- ✚ Précision : elle réunit la justesse et la fidélité.

Linéarité : la linéarité implique que la relation entre grandeur physique à mesurer et grandeur électrique est linéaire (équation d'une droite).

Étalonnage : L'étalonnage permet d'ajuster et de déterminer, sous forme graphique ou algébrique, la relation entre le mesurande et la grandeur électrique de sortie. Très souvent l'étalonnage n'est valable que pour une seule situation d'utilisation du capteur.



Les contraintes mécaniques, thermiques ou électriques auxquelles un capteur est soumis entraînent, lorsque leurs niveaux dépassent des seuils définis, une modification des caractéristiques du capteur. Au dessus d'un certain seuil, l'étalonnage n'est plus valable. Au-dessus d'un autre plus grand le capteur risque d'être détruit.

Rapidité - Temps de réponse : La rapidité est la spécification d'un capteur qui permet d'apprécier de quelle façon la grandeur de sortie suit dans le temps les variations du mesurande.




Finesse : La présence du capteur peut perturber le phénomène physique mesuré. La finesse est une spécification qui permet d'estimer l'influence de la présence du capteur et de ses liaisons sur la valeur du mesurande. La finesse est d'autant plus grande que l'influence du capteur est faible.

IV. Capteurs et système IOT



1. Exemple de capteurs analogique

	<i>Capteur</i>	<i>Utilité</i>
	Accéléromètre	Capteur utilisé pour détecter les mouvements, les vibrations, les orientations et les chocs
	Capteur de lumière	Capteur analogique pour détecter la concentration de la lumière

Lors de l'utilisation d'un capteur analogique sur une carte embarqué il faut vérifier la présence des PIN ou GPIO analogique. Dans le cas contraire il faut utiliser un convertisseur analogique numérique CAN (DAC- Digital to Analog Convertor).

	<i>Carte embarqué</i>	<i>Entrée Analogique</i>	<i>Entrée Numérique</i>
	<i>Beagle Bone black</i>	<i>OUI</i>	<i>OUI</i>
	<i>Raspberry Pi</i> <i>(tous les modèles)</i>	<i>NON</i>	<i>OUI</i>
	<i>Arduino</i>	<i>OUI</i>	<i>OUI</i>

2. Exemple de capteurs numérique

	<i>Capteur</i>	<i>Utilité</i>
	Capteur de température et d'humidité	DHT22 : un capteur numérique haute précision pour mesurer une température et une humidité
	Accéléromètre numérique	ADXL345 : stocke jusqu'à 32 ensembles d'échantillons de données X, Y, Z pour déterminer si le système doit activement répondre à un changement de mouvement ou d'accélération.

Dans certains cas les capteurs numériques peuvent implémenter des comparateurs réglables manuellement. **Exemple** : Si le comparateur d'un capteur d'humidité est réglé à 25%, alors il retourne 1 si l'humidité est supérieure ou égale à 25%.

3. FREQUENCE D'ECHANTILLONNAGE

Lors de l'utilisation d'un capteur il faut distinguer (chercher) deux types de fréquences

FREQUENCE DE REPONSE DE CAPTEURS

Représente la vitesse (l'intervalle) avec laquelle le capteur retourne la valeur ou la mesure physique, cette fréquence est constante pour chaque capteur (imposé par le constructeur)

→ Cette fréquence représente la fréquence maximale d'échantillonnage logique qu'on peut atteindre lors du développement d'une solution IoT

→ Il est inutile de calibrer un programme à communiquer avec un capteur à une vitesse supérieur à la fréquence de réponse.

Capteur	Fréquence réponse capteur	Calibrage programme	Constatacion
DHT11	1 seconde/ 1Hz	0.5 seconde	<ul style="list-style-type: none">▪ Valeur dupliquée▪ Gaspillage de ressources
		1 seconde	Vitesse maximale significatif à atteindre

FREQUENCE D'ECHANTILLONNAGE SIGNIFICATIF

Il faut noter que le calibrage d'un programme python ou C pour collecter les données depuis un capteur dépend du cas d'utilisation de ce capteur

Capteur	Fréquence réponse capteur	Cas d'utilisation	Calibrage Programme	constatation
Température	1 seconde/ 1Hz	Domotique pour contrôler le climatiseur	30 minutes	Il est possible d'augmenter la fréquence d'échantillonnage
			1 seconde	Gaspillage des ressources • La température ambiante ne Change pas chaque 1 seconde
		Industriel pour contrôler l'état d'une machine	1 seconde	Vitesse maximale significatif à atteindre
			30 minutes	Cette valeur n'est plus significative • Le changement de température d'une machine industrielle peut survenir en quelques secondes

Lors du calibrage de la fréquence de collectes des données à partir d'un capteur il est préférable de choisir une valeur qui est :

- Supérieur ou égale au temps de réponse du capteur (à chercher dans la datasheet)
- Augmenter le maximum de tel façon ne pas perdre la signification des données collectées

NOMBRE D'ECHANTILLONS

En pratique la collecte et l'envoi des données à partir d'un capteur, dans un programme IOT, ne se fait pas d'une manière infinie. Mais il existe plusieurs techniques.

EXEMPLE POUR UN CAPTEUR DE TEMPERATURE :

- Choisir un intervalle d'échantillonnage maximale sans perdre la signification
- Envoyer seulement une valeur à la fois (si un changement survient)

→ **Nombre d'échantillons peut être égale à 1**

EXEMPLE POUR UN CAPTEUR DE RYTHME CARDIAQUE :

- Pour ce cas il n'est pas possible d'envoyer une valeur à la fois, car une seule valeur n'a pas de signification

- Lors du prélèvement d'un rythme cardiaque, il faut prélever le maximum de valeur possible pendant 1 minute

→ **Nombre d'échantillons est en fonction du temps**

EXEMPLE POUR UN ACCELEROMETRE

- Pour ce cas il n'est pas possible d'envoyer une valeur à la fois, car une seule valeur n'a pas de signification
- Il faut prélever un nombre d'échantillon successif ≥ 64 et de la forme 2^n , ce nombre est déduit à partir de l'équation ou algorithme à utiliser pour analyser les données, dans ce cas le FFT (Transformé de Fourier)

→ **Nombre d'échantillons est en fonction de l'algorithme d'échantillonnage à utiliser**

4. VIRTUAL SENSOR OU CAPTEUR VIRTUEL

L'implémentation d'une architecture IOT conforme aux standards Web of Things suppose que pour chaque capteur (ou actionneur) il existe un API REST (URL) permettant l'accès (le contrôle) des objets connectés à distance. La solution est d'implémenter un serveur web dans la carte embarquée et d'y héberger les API REST directement sur la carte et **implémenter une architecture de capteurs virtuels** :

- Pour chaque capteur physique sur la carte embarquée, un capteur virtuel est présenté sur le Cloud
- La carte embarquée envoie (lorsque c'est possible) les valeurs du capteur physique au Cloud
- Le Cloud met à jour la valeur du capteur virtuel à partir de la donnée envoyée par la carte embarquée. Si un problème survient le Cloud prédit la valeur du capteur virtuel en se basant sur un algorithme intelligent
- L'accès aux données générées par le capteur se fait via un API

REST héberger dans le Cloud.