

COURS

Mesurer les grandeurs physiques

Les systèmes, qu'ils soient simples ou complexes nécessitent l'acquisition de grandeurs physiques.

Exemple :

- Centrale météorologique (mesure de la température, direction et vitesse du vent, quantité d'eau).
- Aspirateur autonome (présence d'obstacles, niveau d'énergie restant dans la batterie, encrassement filtre, etc).
- Véhicule (présence de la ceinture de sécurité, vitesse, pneu dégonflé, etc)

Ce cours est destiné à vous faire connaître les concepts de l'acquisition de mesure. En aucun cas tous les capteurs seront évoqués tant il sont nombreux. Il existe autant de capteurs que de grandeurs physiques mesurables !!

1 Les grandeurs physiques mesurables

Pour illustrer les nombreux capteurs sur le marché, je vous propose de vous rendre sur le site web de GoTronic où vous pourrez avoir un simple aperçu.



Figure 1: Exemple de grandeurs physiques

Les images présentées précédemment sont les solutions constructives (technologiques) permettant de mesurer les grandeurs physiques.

Voici quelques exemples de grandeurs physiques :

Pression	Couleurs	Force – Poids	Rythme cardiaque
Température	Distance / Angle	Latitude et Longitude	Epreinte digitale
Humidité	Vitesse (translation et rotation)	Inclinaison	Niveau
Intensité du courant	Accélération (translation et rotation)	Présence de personnes	
Tension électrique	Débits	Présence d'obstacles	

2 Situation des capteurs dans la chaîne d'informations

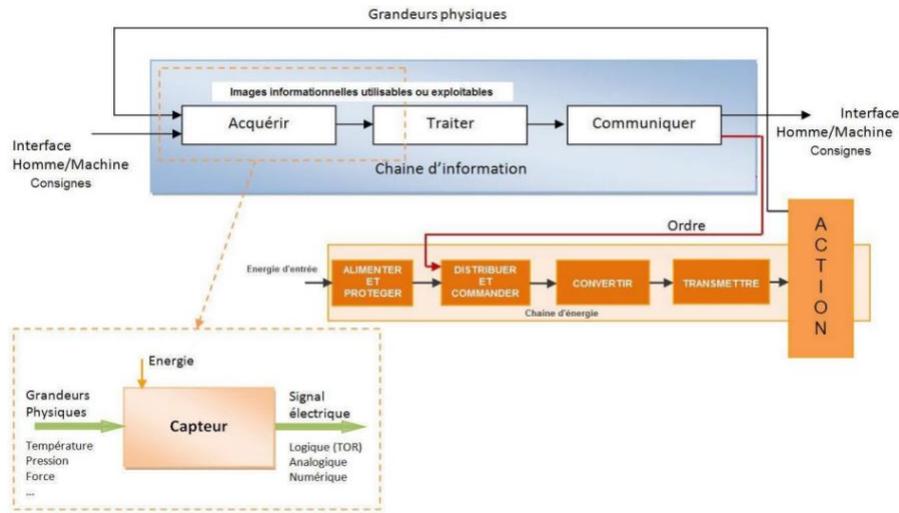


Figure 2: Place des capteurs dans la chaîne d'information

Remarque

Remarquez bien que les capteurs convertissent une grandeur physique en un signal électrique (dans la grande majorité des cas). Il existe cependant des capteurs qui transforment les grandeurs physiques en grandeurs pneumatiques (l'information physique est retranscrite en niveau de pression).

L'information fournie peut-être de trois types :

- **Logique** (Tout Ou Rien : TOR). Ex : la température de 20°C est dépassée ou pas.
- **Analogique** : l'information, image de la grandeur physique, est transmise sous forme d'une tension analogique (Ex : 2,47 V pouvant signifier une température de 20°C par exemple).
- **Numérique** : l'information, image de la grandeur physique, est transmise sous forme numérique (100110 pouvant signifier une température de 20°C par exemple)

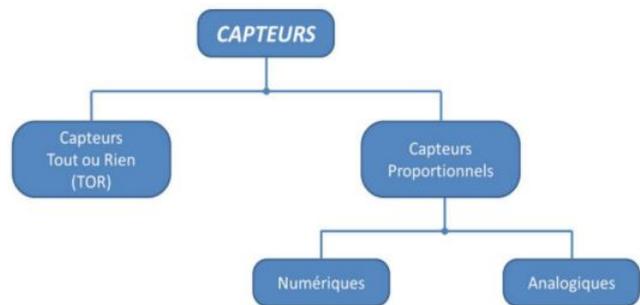


Figure 3: Organigramme des capteurs

2.0.1 Les capteurs T.O.R

T.O.R : Acronyme de Tout Ou Rien
 Ces capteurs délivrent une information binaire.

Une valeur de seuil est définie. Lorsque la grandeur d'entrée est inférieure au seuil, la sortie du capteur est à 0, lorsque la grandeur d'entrée est supérieure au seuil, la sortie du capteur est à 1



Figure 4: comportement d'un capteur T.O.R

2.1 Les capteurs analogiques

Ils fournissent un signal (électrique en général) proportionnel à la grandeur mesurée.

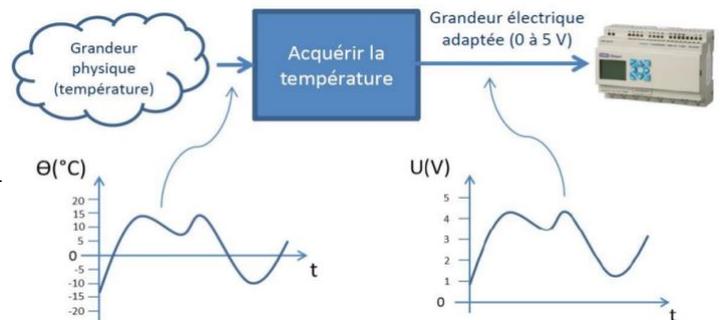


Figure 5: comportement d'un capteur analogique

2.2 Les capteurs numériques

Ils fournissent des signaux numériques proportionnels à la grandeur à mesurer.

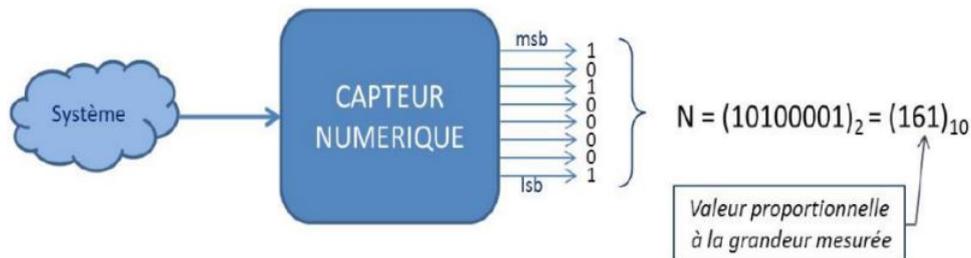


Figure 6: comportement d'un capteur numérique

Un des capteurs 100% mécanique très connu utilisé dans le positionnement mécanique est le codeur **absolu** (cf. vidéo en cliquant sur la figure 7)

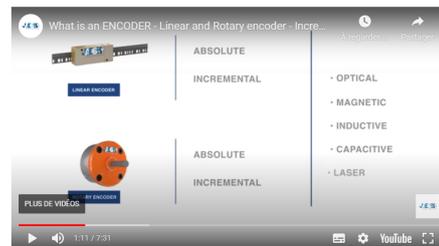


Figure 7: Vidéo Codeur incrémental

Exemple de capteur numérique 100% mécanique

- Un codeur absolu est un capteur doté d'un axe rotatif et retournant un code binaire en fonction de la position angulaire de l'axe.
- Le capteur est constitué d'un disque solidaire de l'axe, comportant des motifs pouvant être lus par un dispositif optique.



Figure 8: Illustration d'un codeur rotatif absolu

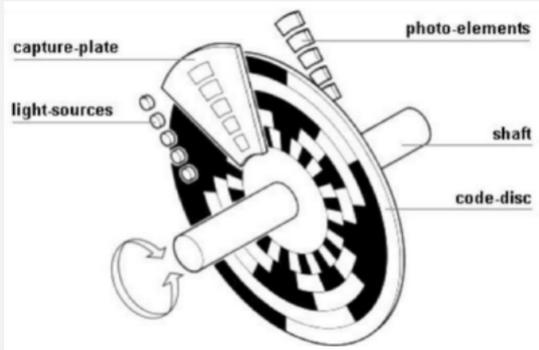


Figure 9: Structure interne d'un codeur absolu

En fonction de la position du disque, chaque détecteur renvoie une information binaire. Le code formé par l'ensemble des détecteurs indique la position angulaire de l'axe du capteur.

Encodages utilisés dans les codeurs absolus

Encodage en binaire naturel

Standard Binary Encoding				
Sector	Contact 1	Contact 2	Contact 3	Angle
0	off	off	off	0° to 45°
1	off	off	ON	45° to 90°
2	off	ON	off	90° to 135°
3	off	ON	ON	135° to 180°
4	ON	off	off	180° to 225°
5	ON	off	ON	225° to 270°
6	ON	ON	off	270° to 315°
7	ON	ON	ON	315° to 360°

Le codage binaire naturel est facile à décoder, mais si les capteurs ne sont pas parfaitement synchronisés, des états transitoires erronés peuvent apparaître lors du passage d'un secteur à un autre. On préfère pour cela utiliser le codage GRAY (cf. figure 11)

Figure 10: Encodage en binaire naturel

Encodage en code GRAY

Gray Coding				
Sector	Contact 1	Contact 2	Contact 3	Angle
0	off	off	off	0° to 45°
1	off	off	ON	45° to 90°
2	off	ON	ON	90° to 135°
3	off	ON	off	135° to 180°
4	ON	ON	off	180° to 225°
5	ON	ON	ON	225° to 270°
6	ON	off	ON	270° to 315°
7	ON	off	off	315° to 360°

Le code GRAY nécessite un décodage mais comme il n'y a qu'un seul bit qui change d'état (0/1) d'un secteur à l'autre, il évite les états erronés de transition.

Figure 11: Encodage en code GRAY

2.3 Capteur à sortie impulsionnelle

Cette catégorie est peut être classée dans les capteurs numériques bien que l'information fournie ne transporte aucune donnée numérique !

Un des capteurs très connu concernant le positionnement mécanique est le codeur **incrémental** (cf. vidéo en cliquant sur la figure 13

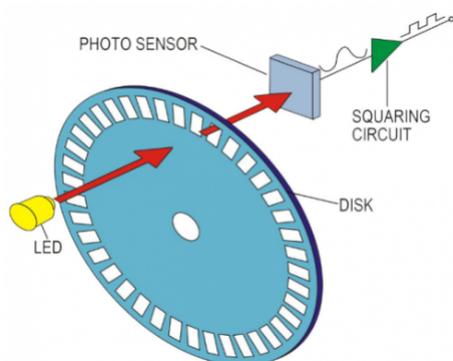


Figure 12: Fonctionnement Codeur Incrémental

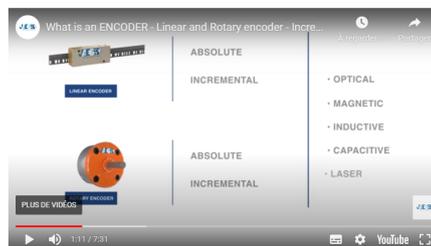


Figure 13: Vidéo Codeur incrémental

Fonctionnement d'un capteur à sortie impulsionnelle

Ces capteurs fournissent un signal carré.

L'idée est de compter le nombre d'impulsions qui sont proportionnelles à la grandeur physique mesurée

Exemple : capteur de débit 1 impulsion / Litre

2.4 Capteur à rapport cyclique variable

Certains capteurs fournissent en sortie un signal à fréquence fixe mais à rapport cyclique α variable.

Il faut ainsi à partir d'une entrée digitale de micro-contrôleur (par exemple Arduino) déterminer la valeur du rapport cyclique pour estimer la valeur de la grandeur mesurée.

2.5 Capteurs numérique à sortie Série

Avec l'avènement de l'électronique numérique, de nombreux capteurs mesurant des grandeurs physiques analogiques, restituent l'information sous forme numérique sur différents protocoles de communication (UART, RS232, SPI, I2C, CAN, DMX et bien d'autres).

Protocole = langage informatique

Les systèmes communicants doivent utiliser le même protocole pour se comprendre. Les protocoles sont nombreux avec chacun leurs avantages / inconvénients

Illustrations : Communication I2C entre capteur BMP280 et une carte Arduino

Le capteur BMP280 (en violet) mesure la température, la pression et l'humidité relative. Toutes ces informations sont transmises à la carte Arduino par l'entremise du protocole I2C.

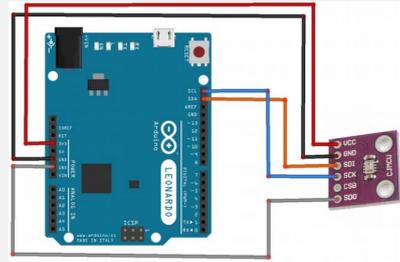


Figure 14: Exemple de communication Série avec un capteur de pression

Illustrations : Communication I2C entre centrale inertielle MPU9250 et une carte Arduino

Mise en situation d'une centrale inertielle MPU9250

Dans certaines situations, il est nécessaire de connaître les accélérations et les rotations (ex : pour stabiliser un drone).

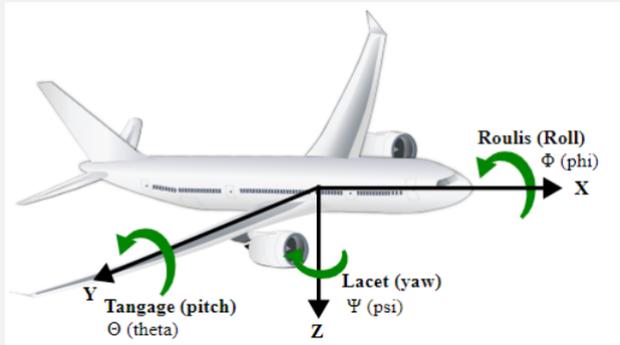


Figure 15: Exemple d'application de centrale inertielle

La centrale inertielle MPU9250 est équipée de :

- 3 accéléromètres (accélération linéaire sur les trois axes X Y et Z).
- 3 gyroscopes (vitesse de rotation angulaires sur les 3 axes).
- 1 magnétomètre (mesure du champs magnétique sur les 3 axes).

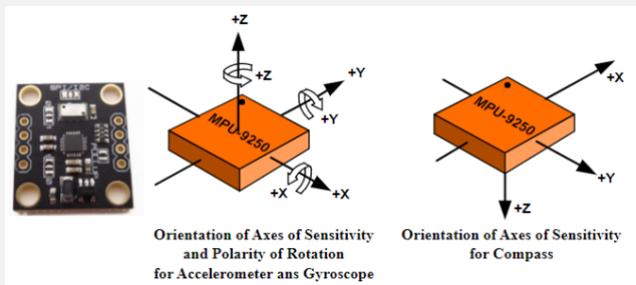


Figure 16: Présentation centrale inertielle MPU9250

Le câblage de cette centrale inertielle à une carte arduino est donné ci-contre. Seuls les deux fils vert et jaune (notés « Fils de communication ») servent à transmettre les informations vers la carte Arduino !

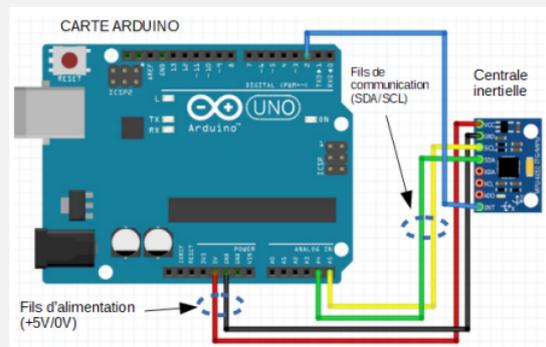


Figure 17: Câblage centrale inertielle MPU9250 à une carte Arduino

3 Caractérisation d'un capteur

Exemple

Capteur de pression $0 - 20000 \text{ Pa} \pm 20 \text{ Pa}$ Tension de sortie $0 - 5V$ Constante de temps : 0.7 ms

Figure 18: Exemple d'un capteur de pression

Les capteurs sont caractérisés par les éléments suivants :

- **Étendue de la mesure** : valeurs extrêmes pouvant être mesurées par le capteur.

Pour l'exemple du capteur de pression figure 18 $0 - 20000 \text{ Pa}$

- **Résolution** : plus petite variation de grandeur mesurable par le capteur. Nous parlerons essentiellement de résolution pour les capteurs numériques ou pour les capteurs analogiques associé à un convertisseur analogique-numérique (C.A.N).

Pour l'exemple du capteur de pression figure 18 en admettant que le signal $0 - 5 \text{ V}$ "entre" sur un C.A.N 8 bits (le cas d'une entrée analogique d'une carte Arduino).

Avec $n=8$ bits on peut coder 2^n valeurs soit $2^8 = 256$ valeurs ... ce qui fait 255 intervalles (tout le monde me suit ?).

La valeur d'un intervalle ^a pour notre capteur de pression est donc $\frac{20000}{255} = 78.43 \text{ Pa}$

^aplus petite variation mesurable

- **Sensibilité** : variation du signal de sortie par rapport à la variation du signal d'entrée

Sensibilité

$$S = \frac{\text{variation de sortie}}{\text{variation d'entre}} = \frac{\Delta V}{\Delta \text{Physique}}$$

Pour l'exemple du capteur de pression figure 18

$$S = \frac{\text{variation de sortie}}{\text{variation d'entree}} = \frac{5 - 0}{20000 - 0} = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ V} \cdot \text{Pa}^{-1}$$

- **Précision** : aptitude du capteur à donner une mesure proche de la valeur vraie. *Pour notre capteur la précision vaut $\pm 20 \text{ Pa}$*

- **Rapidité** : temps de réaction du capteur.

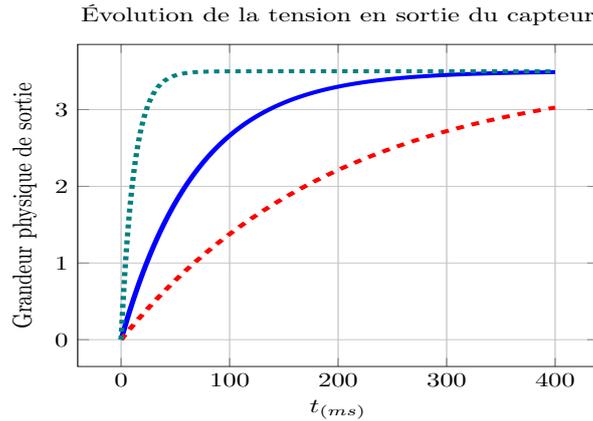


Figure 19: Temps de réponse de 3 capteurs de pression avec des constantes de temps différentes
La réponse du capteur de l'exemple est la courbe bleue en trait continu

- **Linéarité** : un capteur est linéaire si sa sensibilité est constante donc l'image de la grandeur mesurée est proportionnelle à la mesure.

Hélas certains capteurs fournissent une image de la grandeur mesurée non-proportionnelle à cette dernière ! Il faudra donc procéder le cas échéant à une régression mathématiques pour déterminer l'équation de la fonction de transfert.

3.1 Exemple de régression mathématique pour un capteur non linéaire

En mesure on apprécie beaucoup les capteurs qui restitue un signal linéaire (proportionnel à la mesure).

Cependant certains capteurs ne sont pas linéaires. Avec l'électronique numérique, il est possible d'interpréter très correctement les mesures effectuées en procédant à l'établissement de l'équation mathématique répondant à la caractéristique du capteur.

Les deux vidéos ci-après vous montrent comment il est possible d'obtenir l'équation mathématique de n'importe quelle courbe (l'exemple est fait sur un capteur de distance infrarouge SHARP).

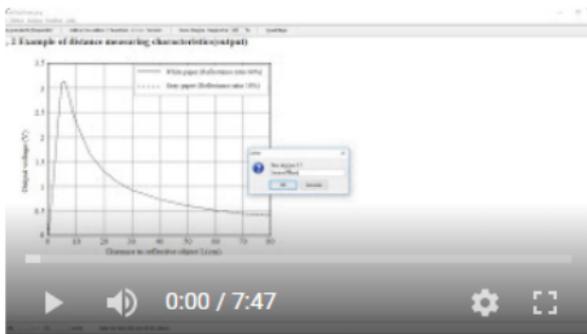


Figure 20: Modélisation avec PlotDigitizer

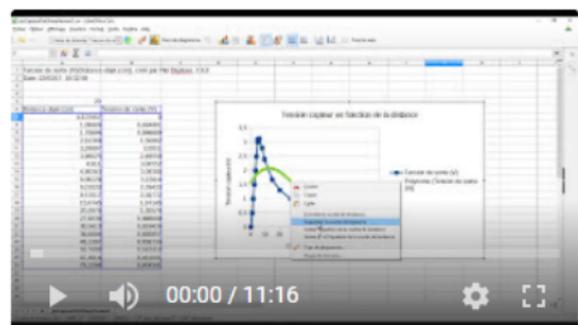


Figure 21: Modélisation d'un capteur infra-rouge Sharp

3.2 Précision et de fidélité

- **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.
- **Fidélité** : un capteur est fidèle si ses valeurs ne pas au cours du temps.

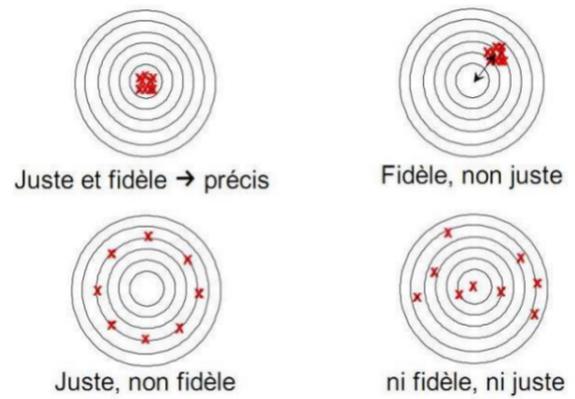


Figure 22: Cibles fidélité et justesse