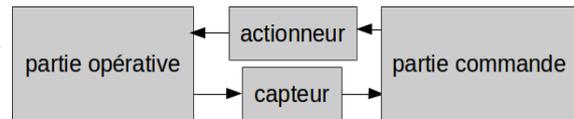


Capteurs

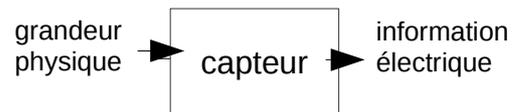
L'amélioration des performances des systèmes techniques (précision, régulation, automatisation) nécessite de *recueillir des informations pertinentes et fiables sur leur partie opérative afin d'élaborer au niveau de la partie commande une consigne correctrice efficace.*



« La première condition pour qu'un système soit gouvernable est qu'il soit observable. Ce sont, à défaut d'être l'homme, les capteurs qui observent le système automatisé. »

Ainsi, de plus en plus de capteurs sont utilisés dans l'industrie, les transports, les appareils numériques, l'habitat.

Un capteur est le composant en début de la chaîne d'information assurée par les fonctions acquérir, traiter, communiquer.



Un capteur est un dispositif qui a pour fonction, à partir d'une **grandeur physique d'entrée** appelée *mesurande* ou *excitation*, de fournir une grandeur de sortie appelée *réponse*, compatible (souvent électrique¹).

« grandeur : propriété d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, que l'on peut exprimer quantitativement sous forme d'un nombre et d'une référence »²

1. Propriétés d'un capteur

La résistance aux différents types d'environnement (pression, humidité, fluides corrosifs, chocs, vibrations) auquel le capteur va être soumis durant sa durée de vie.

L'étendue ou la plage de la mesure est l'intervalle de valeur d'entrée dans laquelle il fonctionne correctement.

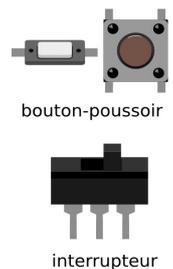
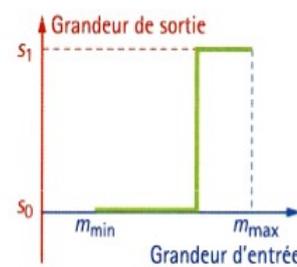
La caractéristique entrée-sortie est la fonction de transfert ou son graphe qui associe le signal à la grandeur physique.

Le signal fourni, information image, peut être de nature différent selon le nombre de valeur qu'il peut prendre dans son intervalle :

- **logique** : deux valeurs possibles (0=faux ou 1=vrai), aussi désigné tout ou rien (TOR), logique, binaire. On parle alors de détecteurs qui sont utilisés dans les automatismes séquentiels. Les plus triviaux étant les interrupteurs et boutons-poussoirs
- **analogique** : le signal peut prendre (donc une infinité) de valeurs de son intervalle
- **numérique** : nombre fini de valeur (2^n codé sur n bits)

La sortie du capteur à 0%, ne correspond pas de la grandeur mesurée, c'est ce qu'on appelle le La **sensibilité** S est le rapport (autour d'une valeur de la variation du signal de sortie par rapport à la

$$S = \frac{di_s}{di_e}$$



▲ Caractéristique de transfert



▲ Caractéristique de transfert d'un capteur analogique.



▲ Caractéristique de transfert d'un capteur numérique.

1 Mais aussi mécanique (effort, position, pression pneumatique ou hydraulique) voire lumineuse etc.

2 <http://www.bipm.org/fr/publications/guides/#vim>

1.1. Précision et erreurs de mesure

Une erreur systématique est régulière (surévaluation ou sous-évaluation par ex. par dilatation thermique) et peut être détectée par un étalonnage du capteur sur une grandeur physique de référence (ex. 1dm³ d'eau de masse 1 kg) puis être réduite par des réglages ou ré-étalonnages.

Si un capteur présente une *erreur systématique faible* alors il est dit **juste**.

Une erreur aléatoire s'observe lors de la même mesure d'une grandeur physique dans les mêmes conditions par la dispersion des signaux en raison d'un environnement variable (humidité ambiante fluctuante). Elle correspond à un manque de répétabilité. Pour la compenser on choisit par exemple la valeur moyenne des différentes mesures. On peut quantifier l'erreur aléatoire par la calcul de l'écart-type.

Si un capteur présente des *erreurs aléatoires faibles* alors il est dit **fidèle**.

La précision requiert justesse et fidélité :

Si un capteur est *juste et fidèle* alors il est dit **précis**.

Plus un capteur est précis, plus son coût est généralement important.

Le temps de réponse $Tr(\%)$ permet de qualifier la rapidité du capteur. Tr est composé d'un temps de retard à la montée et d'un temps de montée T_m . C'est un élément important à prendre en compte lorsque l'on doit mesurer une grandeur ayant des vitesses de variation très rapides. Le temps de réponse d'un capteur installé sur un système dépend aussi des autres composants.

La finesse caractérise la faible influence du capteur sur la grandeur à mesurer par transfert d'énergie.

1.2. Incertitudes

« Le mot «incertitude» signifie doute. Ainsi, dans son sens le plus large, «incertitude de mesure» signifie doute sur la validité du résultat d'un mesurage. (...) »

incertitude (de mesure) : paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande »³

L'incertitude de mesure est l'erreur maximale pour un certain *niveau de confiance*.

Le résultat d'un mesurage doit être donné sous la forme d'un intervalle des valeurs probables de la grandeur mesurée. Les derniers *chiffres significatifs* conservés sont ceux sur lesquels porte l'incertitude de mesure.

Exemples : $T = 10,2 \pm 0,1 \text{ K}$; $K = [10,1 ; 10,3] \text{ K}$; [voir écriture scientifique]

L'incertitude relative est le rapport de l'incertitude de mesure par rapport à la grandeur mesurée.

2. Principe de l'acquisition & types de capteurs

La plupart du temps la grandeur à mesurer n'est pas convertible directement en un signal électrique exploitable. L'élément de mesure (ou élément sensible) convertit la grandeur à mesurer en une grandeur intermédiaire facilement traduisible en signal électrique. La loi qui lie la grandeur intermédiaire à la grandeur à mesurer doit être parfaitement connue.

Le transducteur assure la conversion de la grandeur intermédiaire en une grandeur électrique. Le transducteur, ou encore appelé capteur primaire, peut se comporter comme une impédance (on parlera de capteur passif) ou comme un générateur (capteur actif).

3. Capteurs passifs

la grandeur physique d'entrée modifie directement la grandeur électrique passive : une impédance (résistance, la capacité ou l'inductance).

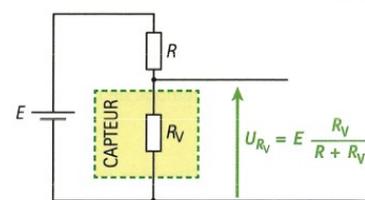
3.1. Variation de résistance

Elle peut-être due à une *déformation* d'un fil de diamètre calibré, ce qui permet de construire des jauges de déformation et, en collant cette dernière à un corps d'épreuve dont le comportement élastique (force → déformation) est précisément prédit, on peut en déduire l'action mécanique qu'il subit. C'est un principe est largement appliqué pour des grandeur à mesurer convertibles en en force (pression, masse, densité, viscosité).

Ce peut-être le fait d'une modification de *température* agissant sur l'ensemble des paramètres de la résistance (principe d'une thermistance).

3.2. Variation de capacité

Elle peut-être due à une modification des caractéristiques du diélectrique d'un condensateur. Elle est utilisée dans la mesure de niveau, l'hygrométrie. Elle peut provenir d'un déplacement des armatures d'un



Dessin 1: montage potentiométrique

3 <http://www.bipm.org/fr/publications/guides/#gum>

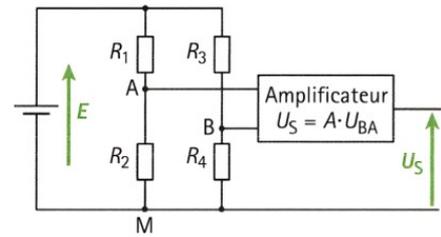
condensateur associé à l'élément de mesure sous l'effet d'une pression.

3.3. Variation d'inductance

Le déplacement de l'élément sensible modifie la position du noyau ferromagnétique d'une bobine : LVDT (de l'anglais Linear Variable Differential Transformer). Son inductance par conséquent varie.

3.4. Conditionnement du capteur

On va ensuite conditionner le capteur qui traduit la grandeur passive en tension par un montage : potentiométrique ou en pont de mesure (pont de Wheatstone déséquilibré pour une résistance variable, pont d'impédance pour une capacité ou une inductance variable) ou à un oscillateur dont la fréquence est fixée par la résonance d'un circuit RLC.



Dessin 2: montage en pont

4. Capteurs actifs

La variation de la grandeur physique d'entrée produit une variation électrique de la grandeur électrique de sortie de type générateur (tension, courant ou charge) :

à **effet Doppler-Fizeau** : modification de la fréquence de l'onde réfléchiée en fonction de la vitesse de l'obstacle

à **effet thermoélectrique (ou effet Seebeck)** : une différence de potentiel apparaît à la jonction de deux matériaux soumis à une différence de température. Cet effet est notamment à la base des thermocouples.

à **effet piézo-électrique** : la propriété que possèdent certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique et réciproquement de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique. Les deux effets sont indissociables. Le premier est appelé effet piézoélectrique direct ; le second effet piézoélectrique inverse. Les matériaux piézoélectriques sont très nombreux. Le plus connu est sans doute le quartz, toujours utilisé aujourd'hui dans les montres pour créer des impulsions d'horloge. Mais ce sont des céramiques synthétiques, les PZT (Titano-Zirconate de Plomb) qui sont le plus largement utilisées aujourd'hui dans l'industrie

à **effet photoélectrique** : largement utilisé sur les capteurs à principe optique

à **induction électromagnétique** : L'induction électromagnétique, aussi appelée induction magnétique, est un phénomène physique produisant une différence de potentiel électrique dans un conducteur électrique soumis à un champ magnétique variable. Cette différence de potentiel peut engendrer un courant électrique dans le conducteur.

les capteurs magnétiques de type fluxmètre ; les micros magnétiques (guitares, pianos) ; les dynamos tachymétriques

à **effet Hall** : un courant électrique traversant un matériau baignant dans un champ magnétique engendre une tension perpendiculaire à celui-ci. Cela permet de mesurer des champs magnétiques (teslamètres) et l'intensité des courants électriques (capteur de courant - pince ampèremétrique) de détecter une position sans contact dans les moteurs, les transmissions, les compteurs électriques domestiques (électroniques, les mécaniques utilisant le courant de Foucault)

à **effet Faraday** : interaction entre la lumière et un champ magnétique dans un matériau : la polarisation de la lumière effectue une rotation proportionnelle à la composante du champ magnétique sur la direction de propagation de la lumière.

autres phénomènes : dilatation, déformation, principe de la corde vibrante



capteur de courant à effet Hall

5. Chaîne de mesure

« suite d'éléments d'un système de mesure qui constitue un seul chemin du signal depuis le capteur jusqu'à l'élément de sortie »



Parfois le capteur est composite et comporte un corps d'épreuve (ex. un pièce déformable sous l'action d'un effort) qui va fournir une mesurande secondaire (ex. une déformation) qui sera converti par un transducteur (ex. jauge) en un signal exploitable.

Le signal émis est en général, un signal analogique en tension (1-5volts) ou en courant (4 - 20mA).

L'alimentation en énergie électrique du capteur peut être faite par la ligne de communication.

Le conditionneur peut amplifier (avec un amplificateur opérationnel pour un certain gain en dB), filtrer (par différents types de filtres), linéariser, adapter le signal à l'unité de traitement (un comparateur, ou un microprocesseur) et de communication (afficheur, un réseau de terrain I2C, SPI ou CAN). Le conditionneur peut être déjà associé au capteur qui est alors qualifié d'« intégré ».

6. Capteurs classés par grandeur mesurée

1. Présence, Position

potentiomètre (rectiligne ou rotatif), souris (informatique), capteur-détecteur de proximité (capacitif, inductif, à ultrason, à infra-rouge), barrière photo-électrique, codeur incrémentaux et absolus, détecteur de mouvement, LVDT et RVDT, corde vibrante, interrupteur de position, butée machine, GPS

2. Angle

Il existe deux types principaux de codeurs de position rotatifs : les codeurs incrémentaux relatifs ; les codeurs absolus.

3. Courant

capteur de courant à effet Hall, shunt (résistance de faible valeur permettant de mesurer le courant électrique la traversant), fluxgate, capteur de courant à effet Néel

4. Distance

optique (confocal chromatique, triangulation, réflexion (télémètre laser), ombroscopie, diascopie, épiscopie, lidar, stéréovision, défocalisation), inductif (variation de reluctance, courants de Foucault), capacitif, ultrason, micro-onde

5. Déplacement

capteur capacitif de déplacement, LDVT, RDVT de l'anglais Linear ou Rotary Variable Differential Transformer est un capteur électrique actif (inductif) de déplacements

6. Vitesse

à partir de la rotation de la transmission ou du moteur par détection de présence, radar à effet Doppler-Fizeau, génératrice tachymétrique

7. accélération

à détection piézoélectrique (console de jeux, smartphone), à détection piézorésistive, à détection capacitive, à détection inductive, à détection optique, à poutre vibrante, à ondes de surface

inclinomètre, gyromètre, gyroscope

8. Force

dynamomètre, à jauges de déformation, résistif (→ clavier)

9. Déformation, Contrainte, Pression

capteur de flexion, corde vibrante, piézo-électrique, jauge de contrainte (jauge de déformation dans une balance électronique), plot magnétique, tube de Bourdon, capsule anéroïde, à membrane, piézo-électrique, corde vibrante, baromètre, hypsomètre, pressostat piezo-électrique (lave-vaisselle)

Pression : Voir Sonde de pression.

10. Débit

débitmètre à turbine, roue ovale, plaque à orifice, tube de Pitot, débitmètre à effet vortex, débitmètre électromagnétique, débitmètre à effet Venturi, débitmètre à ultrasons, débitmètre ionique, débitmètre massique

11. Niveau

à pression différentielle, à sonde capacitive, à tube de torsion, à flotteur, à rayon gamma, à ultrasons, par radar

12. Lumière

photorésistance, photodiode, phototransistor, capteur photographique, capteur CCD, cellule photoélectrique

13. Son

microphone, micro pour instruments, micro magnétique pour guitare électrique, hydrophone

14. Température

thermomètre, thermomètre à résistance de platine, thermocouple (chauffage au gaz), pyromètre infrarouge, thermistance (CTN ou CTP, résistance dans un four, plaque à induction)

15. Champ magnétique

Présence d'un champ par Interrupteur Lame Souple (ILS), sonde à effet Hall, capteur à effet Faraday (fluxmètre), Fluxgate, Fluxmètre, Magnétorésistances, Magnétoimpédance

16. Électromagnétique

antenne, bobine

17. Autres

capteur météorologiques, hygromètre capacitif, détecteur de métaux, sonde lambda (taux d'oxygène dans un moteur thermique), capteur de pluie, détecteur de fumée



codeur rotatif



potentiomètre linéaire



télémètre à ultrasons



capteur de courant



potentiomètre rotatif



Télémètre infra-rouge



potentiomètre linéaire



capteur de force résistif



capteur de flexion résistif



débitmètre



photorésistance



humidistance



thermistance



capteur de température



interrupteur à lame souple



antenne