

1 Principes fondamentaux

1.1 Caractéristiques générales

La terminologie est issue du livre de référence [Asch2010], elle permet d'établir un vocabulaire précis pour la suite de ce cours

Définition 1.1: Mesurande m

Grandeur physique de l'objet de la mesure (déplacement, température, pression. . .) à acquérir.

Définition 1.2: Mesurage

Ensemble des opérations expérimentales qui concourent à l'acquisition de la valeur numérique du mesurande.

Définition 1.3: Capteur

Dispositif qui, soumis à l'action d'un mesurande non électrique, présente une caractéristique de nature électrique s qui est fonction du mesurande.

Formule 1.1: Grandeur de sortie s

$$s = F(m)$$

Avec :

Grandeur dans l'ISQ	Unité SI de mesure	Description
s : grandeur électrique	(/)	Grandeur (réponse) de sortie de nature électrique (charge, tension, courant ou impédance) fonction du mesurande
m : grandeur physique	(/)	Grandeur physique d'entrée d'excitation autre qu'électrique

La relation $s = F(m)$ est le résultat de :

forme théorique : lois physiques régissant le fonctionnement du capteur ;

expression numérique : la construction du capteur (géométrie, dimension), les matériaux le constituant, de son environnement et éventuellement de son mode d'emploi (température, alimentation).

L'expression numérique de tout capteur est exploitée par l'étalonnage.

Définition 1.4: Étalonnage

Ensemble de valeurs du mesurande m connus avec précision, auxquels sont mis en relation les valeurs correspondantes s , permettant ainsi d'associer à toute valeur de s la valeur de m la déterminant.

Par soucis de facilité d'exploitation et de lecture, on privilégiera une conception et une utilisation du capteur de sorte à ce qu'il établisse une relation linéaire entre les variations du mesurande Δm et de sa grandeur de sortie Δs . Ceci introduit la notion de *sensibilité* du capteur.

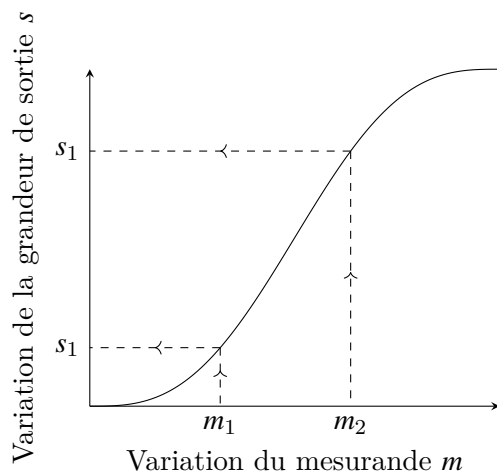


Formule 1.2: Sensibilité du capteur S

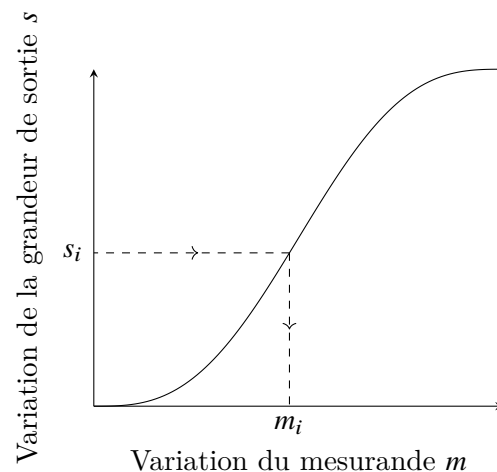
$$\Delta s = S \times \Delta m$$

Avec :

Grandeur dans l'ISQ	Unité SI de mesure	Description
Δs : grandeur électrique	(/)	Variation de la grandeur du mesurande
Δm : grandeur physique	(/)	Variation de la grandeur physique d'entrée d'excitation



(a) établissement à partir des valeurs connues du mesurande m_1 et m_2



(b) exploitation du capteur à partir de la valeur mesurée de la réponse s

FIG. 1.1: Courbe d'étalonnage d'un capteur

Une grande difficulté dans conception et l'utilisation des capteurs consiste à conserver une sensibilité S aussi constante que possible. Pour cela, elle doit dépendre aussi peu que possible :

linéarité : valeur de m ;

bande passante : fréquence de variation ;

temps : vieillissement ;

grandeurs d'influence : action d'autres grandeurs physiques issues de l'environnement du capteur et non de l'objet de la mesure.

1.2 Type de capteurs

Le capteur est un élément du circuit électrique, il peut dès lors présente un signal *passif* ou *actif*. Cela conduit à deux grandes catégories de capteurs dans leur conception physique.

Définition 1.5: Capteur actif

Capteur dont le signal de sortie s est un *générateur* (charge Q , tension U ou encore intensité d'un courant I).

Définition 1.6: Capteur passif

Capteur dont le signal de sortie s est un *récepteur* (résistance R , inductance L ou encore capacité C).



Cette distinction se base donc sur le caractère passif ou actif des schémas électriques équivalents des capteurs, et implique une différence fondamentale sur les lois physiques qui les régissent :

- le capteur actif est une *générateur* qui délivre directement un signal électrique ;
- le capteur passif est un *récepteur* qui verra ses paramètres électriques mesurés qu’au travers les modifications qu’il entrainera dans un circuit alimenté par une source extérieure. Ce circuit électrique associé au capteur est prénommé *conditionneur* et c’est l’ensemble conditionneur et capteur passif qui formera la source du signal électrique s .

1.2.1 Capteurs actifs

Les capteurs actifs étant des *générateurs*, leur technologie est principalement basée sur un principe physique de conversion de l’énergie propre au mesurande (thermique, mécanique...) en énergie électrique. Le tableau suivant détaille les effets physiques généralement utilisés dans les technologies des capteurs actifs.

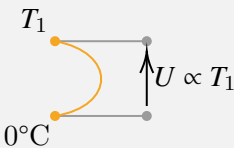
TAB. 1.1: Capteurs actifs principaux selon les effets physiques

Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Effet thermoélectrique	Tension
Flux de rayonnement optique	Effet pyroélectrique	Charge
	Effet photoémissif	Courant
	Effet photovoltaïque	Tension
	Effet photoélectromagnétique	Tension
Force	Effet piézoélectrique	Charge
Pression		
Accélération		
Vitesse	Effet d’induction électromagnétique	Tension
Position (aimant)	Effet Hall	Tension

1.2.1.1 Effet thermoélectrique

Un circuit électrique composé de deux conducteurs de composition chimique différente et dont les jonctions sont à des températures différentes T_1 et T_2 verra apparaître une *tension* U à ses bornes.

Exemple 1.1: Application de l’effet thermoélectrique



On peut déterminer U à partir d’une température lorsqu’on connaît précisément la mesure de U à la valeur $T_2 = 0^\circ\text{C}$.

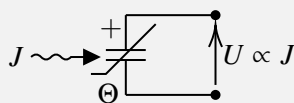
1.2.1.2 Effet pyroélectrique

Certains cristaux sont dits *pyroélectriques* (le sulfate de triglycine par exemple) et présentent donc la propriété de présenter une polarisation électrique spontanée dépendant de la température du cristal.



Ils comportent à leur surface des charges électriques Q sur leurs surfaces et $-Q$ sur les surfaces opposées, proportionnelles à cette polarisation.

Exemple 1.2: Application de l'effet pyroélectrique

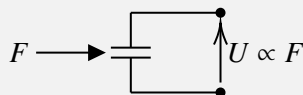


On peut déterminer U à partir d'un flux lumineux J absorbé par un cristal pyroélectrique. Cela va élever sa température, ce qui entraîne une modification de sa polarisation qui est mesurable par la variation de tension U aux bornes d'un condensateur associé.

1.2.1.3 Effet piézoélectrique

L'application d'une force ou d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézoélectriques (le quartz par exemple) va entraîner une déformation provoquant l'apparition de charges électriques Q sur leurs surfaces et $-Q$ sur leurs surfaces opposées.

Exemple 1.3: Application de l'effet piézoélectrique



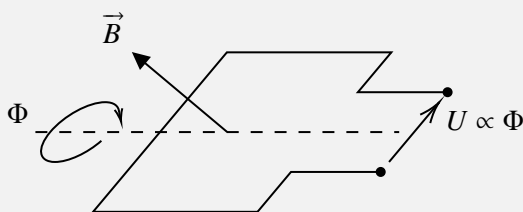
On peut déterminer U à partir d'une force F (ou toutes grandeurs physiques dérivées) subie par l'élément piézoélectrique. Cela va provoquer une déformation de l'élément, ce qui entraîne une modification de sa polarisation qui est mesurable par la variation de tension U aux bornes d'un condensateur associé.

1.2.1.4 Effet d'induction électromagnétique

Lorsqu'un conducteur se déplace dans un *champ magnétique* fixe \vec{B} , une *tension* U proportionnelle au *flux d'induction magnétique* Φ par unité de temps T , et donc proportionnelle à sa vitesse de déplacement dans le champ d'induction magnétique \vec{B} .

Aussi, lorsqu'un circuit fermé est soumis à un flux d'induction magnétique Φ variable de par de son déplacement ou de celui de la source de l'induction (aimant par exemple), la tension U dont il est le siège est égale au contraire de vitesse de variation du flux d'induction magnétique Φ .

Exemple 1.4: Application de l'effet d'induction électromagnétique



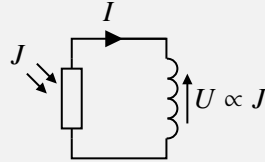
La mesure de tension U aux bornes du conducteur permet de déduire la vitesse de déplacement qui l'a induite.



1.2.1.5 Effets photoélectriques

Il existe plusieurs effets photoélectriques se distinguant par leurs manifestations mais ils ont tous comme point commun l'excitation de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux, dont la longueur d'onde est inférieure à une valeur seuil qui caractérise le matériau.

Exemple 1.5: Application de l'effet photoélectrique



Les effets photoélectriques permettent d'obtenir une tension U ou un courant I en fonction du rayonnement lumineux J du matériau. D'une part, ils constituent la base des méthodes de mesure des grandeurs photométriques, d'autre part, ils permettent la traduction en signal électriques des informations véhiculées par un rayonnement lumineux.

1.2.1.6 Effets photoémissif

Les électrons libérés sont émis hors d'une zone éclairée et, lors de l'application d'un champ électrique, forment un courant électrique.

1.2.1.7 Effets photovoltaïque

Des électrons et des trous pouvant recevoir des électrons sont libérés au voisinage de la jonction Positive Négative (PN) d'un semi-conducteur éclairée. Leur déplacement dans le champ électrique de la jonction PN module la tension aux bornes de cette jonction.

1.2.1.8 Effet photoélectromagnétique

L'application d'un champ magnétique perpendiculaire à un rayonnement lumineux va provoquer dans le matériaux éclairé l'apparition d'une tension électrique dans la direction *normale* au champ magnétique et au rayonnement.

1.2.1.9 Effet Hall

Un matériau, de préférence semi-conducteur et sous forme de plaquette, fait apparaître une tension v_H lorsqu'il est parcouru par un courant I et soumis à un champ magnétique \vec{B} d'un angle θ avec le courant I .

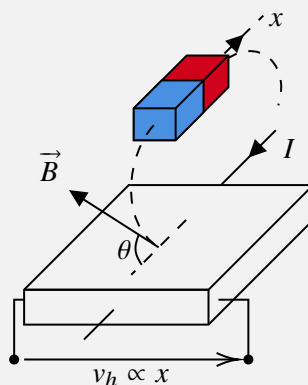
Formule 1.3: Effet Hall

$$v_H = K_H \times I \times B \times \sin \theta$$



Avec :

Grandeur dans l'ISQ	Unité SI de mesure	Description
K_H : coefficient	(/)	Facteur dépendant du matériau et de la dimension de la plaquette
I : intensité	ampère (A)	Source de courant fournissant l'énergie liée au signal de sortie
\vec{B} : champ magnétique	Tesla (T)	Champ magnétique soumis au matériau
$\sin \theta$: angle	radian (rad)	Angle formé par l'intensité I et le champ magnétique \vec{B}

Exemple 1.6: Application de l'effet Hall

Pour connaître la position de l'objet, on lui accouple un aimant qui va lui déterminer les valeurs de \vec{B} et θ au niveau de la plaquette. La tension v_h aux bornes de la plaquette est donc fonction de cet aimant et permet une conversion électrique d'une position x .

Il convient de classer les capteurs basés sur l'effet Hall parmi les capteurs actifs puisque l'information sortie est liée à une tension v_H , quand bien même il ne s'agit pas de *convertisseurs d'énergie* car c'est une source de courant I et non le mesurande qui va délivrer l'énergie liée au signal de sortie.

1.2.2 Capteurs passifs

Les capteurs passifs sont donc des *récepteurs* qui vont voir leurs grandeurs physiques être modulées par le mesurande sans pour autant convertir une énergie. On distingue dans les récepteurs plusieurs grandeurs physiques liées à :

- leur géométrie et leurs dimensions ;
- leurs propriétés électriques :
 - résistivité ρ ;
 - perméabilité magnétique μ ;
 - constante diélectrique ε .

Un mesurande module donc sur la variation du signal de sortie électrique du capteur passif :

- soit par les caractéristiques géométriques ou des dimensions ;
- soit par les propriétés électriques des matériaux ;
- soit plus rarement par les deux à la fois.



1.2.2.1 Paramètres géométrique et dimensionnel du capteur passif

Pour que les paramètres géométriques ou dimensionnels du capteur passif puissent varier, il faut que le capteur comporte des éléments mobiles ou déformables.

Position Le principe d'une majorité de capteurs de déplacement et de position se base sur un élément mobile du capteur qui présente des positions spécifiques pour des valeurs de sorties précises. La mesure de cette valeur de sortie permet de connaître la position de l'élément mobile (potentiomètre, condensateur à armature mobile, inductance à noyau mobile...).

Déformation La déformation est la résultante de forces – ou de grandeurs dérivées – qui est appliquée directement ou indirectement sur un capteur (armature d'un condensateur soumis à une pression différentielle, jauge d'extensométrie liée de manière rigide à une structure contrainte...). Cela entraîne une modification du signal de sortie s , qui sera corrélée à la valeur de la force appliquée sur le capteur.

Propriétés électriques des matériaux Les propriétés électriques des matériaux varient selon leur nature et sont également sensibles à diverses grandeurs physiques (température, pression, humidité, éclairage...).

Dans le cas où seule l'une de ces grandeurs est susceptible de modifier les propriétés électriques d'un matériau mais que les autres n'influencent pas ces mêmes propriétés, il s'établit alors une corrélation entre cette grandeur physique et le signal de sortie s .

TAB. 1.2: Capteurs passifs principaux selon les effets physiques

Mesurande	Caractéristique électrique sensible	Matériau utilisé
Température	Résistivité	– métaux (platine, cuivre, nickel) ; – semi-conducteurs.
Très basse température	Constante diélectrique	Verre
Flux de rayonnement optique	Résistivité	Semi-conducteurs
Déformation	Résistivité	– alliages de nickel ; – silicium dopé.
	Perméabilité magnétique	Alliages ferromagnétiques
Position (aimant)	Résistivité	Matériaux magnéto-résistants (bismuth, antimoine d'indium)
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium
	Constante diélectrique	Alumine, polymères
Niveau	Constante diélectrique	Liquides isolants

Dans le tableau ci-dessus, on remarque l'importance de la propriété de la *résistivité* ρ .

Le signal de sortie s des *capteurs passifs* n'est mesurable qu'en intégrant le capteur dans un circuit électrique alimenté, désigné comme étant son *conditionneur*. Ils en existe plusieurs sortes dont les principaux sont les suivants :

montage potentiométrique : association *en série* d'un capteur et d'une impédance pouvant être ou non du même type ;



pont d'impédances : équilibre électrique du pont permettant la détermination de l'impédance de sortie du capteur ou déséquilibre du pont permettant la mesure de la variation de cette impédance ;

circuit oscillant : circuit contenant l'impédance du capteur et faisant partie d'un circuit oscillateur dont il détermine la fréquence ;

amplificateur opérationnel : circuit dont l'impédance du capteur constitue l'un des éléments déterminant le gain de l'amplificateur.

Choisir un *conditionneur* est une étape primordiale dans la réalisation de mesures. L'association d'un capteur et de son conditionneur – dont sa constitution – déterminera le signal électrique et en découleront un bon nombre de performances de mesures :

- sensibilité ;
- linéarité ;
- insensibilité à certaines grandeurs d'influences.

1.3 Corps d'épreuves et capteurs composites

Pour certaines raisons (coût, facilité d'exploitation...), on peut utiliser des capteur sensible à l'un des effets du *mesurande* plutôt qu'au *mesurande* lui-même.

Définition 1.7: Corps d'épreuve

Dispositif de mesure qui, une fois soumis à un *mesurande* désigné *mesurande primaire* dont il faut connaître la grandeur, assure la traduction en une autre grandeur physique non-électrique désignée *mesurande secondaire*.

Définition 1.8: Capteur composite

Ensemble formé par le corps d'épreuve et un capteur passif ou actif nécessaire à la traduction du *mesurande secondaire* donnée par le corps d'épreuve.

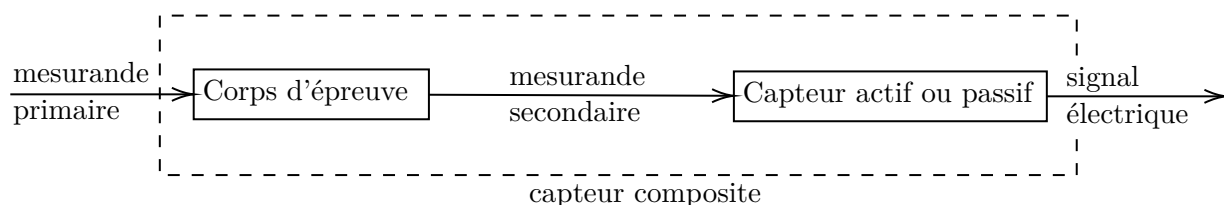


FIG. 1.3: Structure d'un capteur composite

Exemple 1.7: Application d'un capteur composite

Une force de traction F est appliquée sur un objet d'une section S et d'une longueur L , qui va subir un allongement de sa longueur $\frac{\Delta L}{L}$, entraînant de ce fait une variation de la résistance d'une jauge ① d'un facteur K placée sur l'objet $\frac{\Delta R}{R}$.

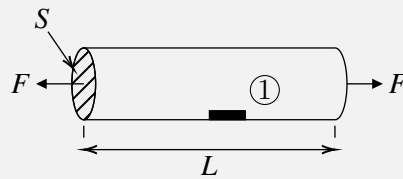


Formule: Module de Young

$$E = \frac{\varepsilon}{\sigma}$$

Avec :

Grandeur dans l'ISQ	Unité SI de mesure	Description
E : Pression	Pascal (Pa)	Module de Young (de traction) d'un matériau <i>élastique</i> et <i>isotope</i>
ε : Mètre	Mètre (m)	Allongement relatif (déformation) $\frac{\Delta L}{L}$
σ : Pression	Pascal (Pa)	contrainte sur le matériau



Dans l'exemple la relation entre le mesurande primaire, la traction F et le mesurande secondaire, la déformation $\frac{\Delta L}{L}$, est :

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{E} \times \frac{F}{S}$$

D'autre part, la relation entre la grandeur de sortie, la variation de la résistance de la jauge $\frac{\Delta R}{R}$ et le mesurande secondaire, la déformation $\frac{\Delta L}{L}$ est :

$$\frac{\Delta R}{R} = K \times \frac{\Delta L}{L}$$

La relation de la variation de la résistance de la jauge R et la traction :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{K}{E} \times \frac{F}{S}$$

Les corps d'épreuves sont très utilisés pour mesurer des grandeurs physiques en mécanique.

La relation entre le mesurande primaire et le mesurande secondaire est très souvent linéaire, en particulier dans le cas de déformations et déplacement résultants de contraintes mécaniques, dans les conditions limites de l'élasticité du corps d'épreuve. Les performances de l'association corps d'épreuve – capteur doivent être déterminées par un étalonnage tenant compte des éventuelles conséquences de leur liaison par rapport à leurs caractéristiques individuelles.

Si de l'électronique est intégrée au capteur, il s'agira d'un *capteur intégré*.

1.4 Grandeurs d'influence

Un capteur se situe dans un environnement qui le soumet à un mesurande mais également à d'autres grandeurs physiques susceptibles de biaiser la valeur de la grandeur de sortie, sans distinction d'origine du biais.

Définition 1.9: Grandeur d'influence

Grandeur physique « parasite » à laquelle la réponse d'un capteur peut être sensible.



On distingue par exemple :

- température pouvant faire varier la réponse d'un capteur optique ;
- champ magnétique pouvant faire varier la réponse d'un capteur thermométrique.

Les principales grandeurs d'influences sont :

température : modification des caractéristiques électriques, mécaniques et dimensionnelles des composants du capteur ;

pression, accélération, vibration : perturbations pouvant créer des déformations et des contraintes dans certains composants du capteur, altérant ainsi sa réponse ;

humidité : dégradation de l'isolation (capteur/environnement et composant du capteur) et perturbation de certaines propriétés électriques (constante diélectrique, résistivité...) ;

champs magnétiques variables et statiques : apparition potentielle de tension induite pouvant se superposer au signal utile en régime statique et modification des propriétés électriques en régime variable ;

tension d'alimentation (amplitude et fréquence) : grandeur de sortie du capteur dépendante de ces grandeurs de par le principe même du capteur.

Si l'on se réfère à la relation mesurande – grandeur de sortie (1.1 page 2) et qu'on comptabilise l'influence de $g_1, g_2 \dots$, cela donne :

Formule 1.4: Grandeurs d'influence

$$s = F(m, g_1, g_2 \dots)$$

Avec :

Grandeur dans l'ISQ	Unité SI de mesure	Description
s : grandeur électrique	(/)	Grandeur (réponse) de sortie de nature électrique (charge, tension, courant ou impédance) fonction du mesurande
m : grandeur physique	(/)	Grandeur physique d'entrée d'excitation autre qu'électrique
g_1 : grandeur physique	(/)	Grandeur physique d'influence 1
g_2 : grandeur physique	(/)	Grandeur physique d'influence 2

Pour déduire la valeur de s en fonction de m seul, il convient de :

- soit de réduire l'importance des grandeurs d'influence au niveau du capteur en le protégeant par un isolement adéquat (supports antivibratoires, blindages magnétiques...) ;
- soit de stabiliser ces grandeurs d'influences à des seuils précisément déterminés et d'étalonner le capteur dans ces conditions de fonctionnement (enceinte climatique, sources d'alimentation régulées...) ;
- soit d'utiliser un montage pouvant compenser l'influence des perturbations.

1.5 Chaîne de mesure

Définition 1.10: Chaîne de mesure

Ensemble des dispositifs, y compris le capteur, dont le but est de délivrer la détermination précise de la valeur d'un mesurande dans les meilleures conditions.

En entrée de chaîne, le capteur est soumis à l'action du mesurande m et injectera son signal de sortie s dans la chaîne. En fin de chaîne, le signal de sortie s est converti pour rendre la lecture de



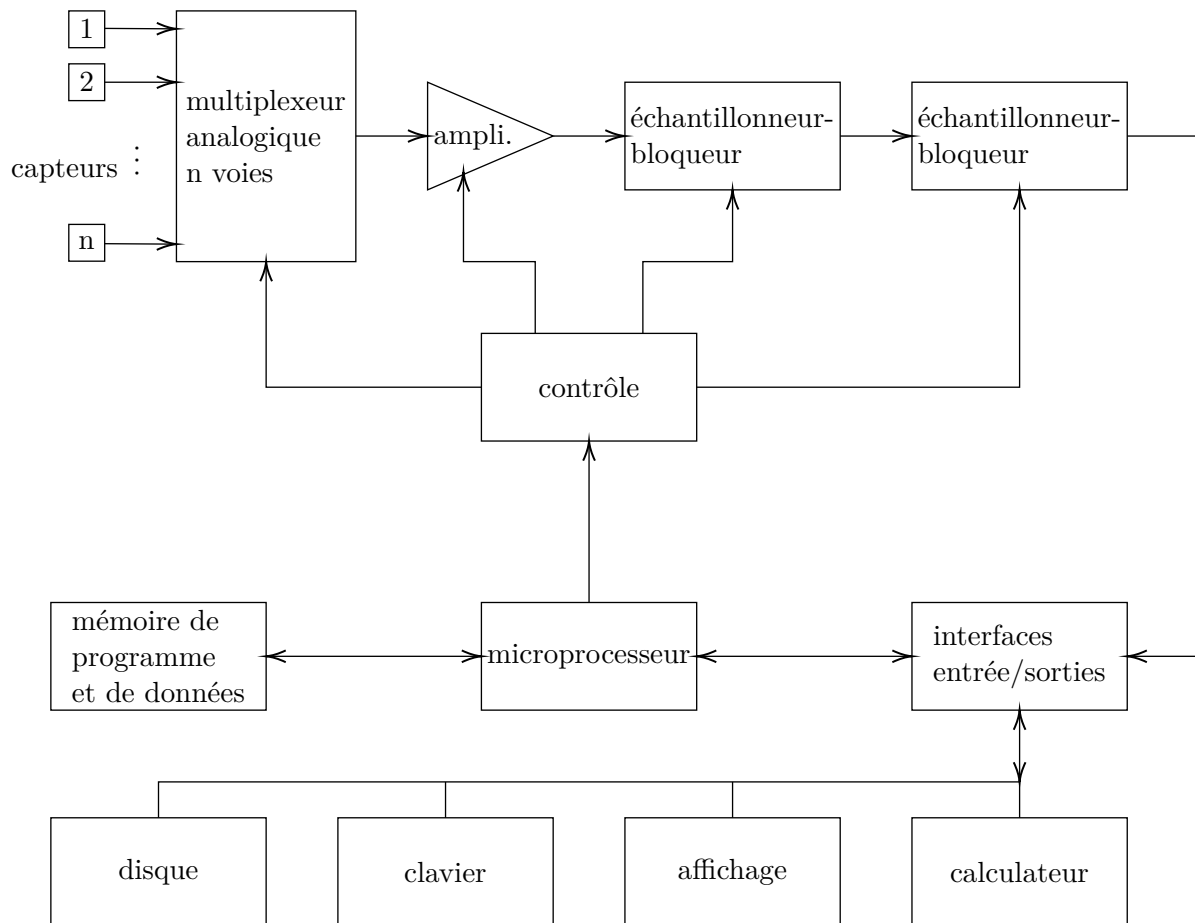


FIG. 1.4: Exemple d'une chaîne de mesure

la valeur du mesurande m possible. C'est l'étalonnage de la chaîne de mesure dans son ensemble qui déterminera au mieux la valeur de sortie s par rapport au mesurande m correspondant.

La chaîne de mesure comprend le capteur (avec son conditionneur s'il est passif) associé à un appareil de lecture dans sa forme la plus simple (thermocouple et voltmètre par exemple).

Toutefois, les exigences requises par les conditions d'exploitation et la recherche de performance amènent à l'introduction de nouveaux blocs fonctionnels dans la chaîne de mesure. Ceux-ci servent à optimiser l'acquisition et le traitement du signal de sortie s , en voici les principaux :

- circuit de linéarisation du signal pour obtenir des données proportionnelles à celles du mesurande m ;
- amplificateur d'instrumentation ou d'isolement pour la réduction des tensions parasites de mode commun ;
- multiplexeur, amplificateur d'instrumentation programmable, échantillonneur bloqueur, convertisseur analogique - numérique pour le traitement de l'information par calculateur (figure ?? page 12) ;
- convertisseur tension - courant ou tension - fréquence pour la transmission du signal à distance par câble ;
- modulateur de fréquence dans cas de télémessure par voie hertzienne.

Le calculateur associée à la chaîne de mesure des fonctions importantes dans la chaîne de mesure, elles sont regroupées dans deux catégories :

- gestion de l'acquisition ;
- traitement du signal requis par la précision et la nature de l'information cherchée.

Il gère la chaîne d'acquisition en délivrant des séquences de signaux de commande. Ceux-ci vont activer de façon ordonnée les dispositifs prévus pour obtenir la valeur du mesurande m :



1. sélection d'une voie d'entrée par envoi d'adresse au multiplexeur ;
2. fixation du gain de l'amplificateur programmable ;
3. échantillonnage puis blocage du signal ;
4. déclenchement de la conversion analogique-numérique ;
5. lecture de la donnée numérique à la réception du signal de fin de conversion délivré par le convertisseur analogique-numérique.

En aval de la chaîne d'acquisition, le calculateur gère également les périphériques d'entrée-sortie :

- clavier permettant l'introduction, pour prise en compte par la chaîne, d'ordres et de modifications de paramètres de mesure ;
- mémoire de masse pour l'archivage des mesures ;
- affichage du résultat de la mesure en cours.

Les calculateurs permettent aussi d'effectuer des opérations mathématiques sur le signal capté et numérisé :

- correction du signal reçu ;
 - correction des dérives de zéro et de sensibilité causées par les grandeurs d'influences (en particulier les températures) ;
 - correction de la *non-linéarité* des capteurs afin d'obtenir une donnée de sortie proportionnelle au mesurande ;
- analyse du signal corrigé.

