

Capteurs

Laura Binacchi

2019 – 2020

Contents

1 Définition	2
2 La mesure	2
2.1 Les grandeurs physiques de base	2
2.2 Définition des étalons	2
2.2.1 Constantes de base	2
2.2.2 Grandeur dérivées	4
3 Dimension d'une grandeur dérivée	4
3.1 Équations aux dimensions	4
3.2 Système SI	5
3.3 Radian et stéradian	5
3.4 Le Kelvin	6
3.5 La pression	6
3.6 Pression hydrostatique	7
3.7 Débit volumique	7
3.8 Masse volumique d'une substance	7
3.9 Diagramme de phase	8
3.10 Les ondes	8
3.10.1 Classification des ondes électromagnétiques	9
3.10.2 Optoélectronique	9
3.10.3 La lumière	9
3.10.4 Le lumen	10
3.10.5 Les ondes sonores	10
4 Caractéristiques d'un capteur	11
4.1 Fidélité	11
4.2 Justesse	11
4.2.1 Fidélité vs justesse	11
4.3 Précision	12
4.4 Sensibilité	12
4.5 Linéarité	12
4.5.1 Erreur de linéarité	13
4.5.2 Erreur de réversibilité	13
4.6 Résolution	13
4.7 Plage de mesure	14
4.8 Temps de réponse	14
4.9 Grandeurs d'influence	14
5 Étalonnage des capteurs	15
5.1 Étalonnage à l'aide d'Excel	15

6 Capteurs passifs	16
6.1 La résistivité	16
6.2 La permittivité (diélectrique)	17
6.3 La perméabilité magnétique	17
6.3.1 Magnétisme	18
6.3.2 Champ magnétique	18
6.4 Effets physiques mesurés par les capteurs passifs	19
6.5 Capteurs à résistance variable	19
6.5.1 Capteurs potentiométriques	19
6.5.2 Capteurs à jauge de déformation	20
6.5.3 Capteurs magnéto-résistifs	20
6.5.4 Capteurs de température résistifs	20
6.6 Capteurs capacitifs	21
7 Capteurs actifs	22
7.1 Effets physiques mesurés par les capteurs actifs	22
7.2 Thermocouples	22
7.2.1 Choix pour la mesure de la température	23
8 Capteurs intégrés	24
9 Capteurs intelligents	25
10 Conditionnement du signal	26
10.1 Raccordement	26
10.1.1 Raccordement direct (2 fils)	26
10.1.2 Interface à 3 fils	26
10.1.3 Interface à 4 fils	27
10.2 Pont de Wheatstone	27
11 Chaîne de mesure	30
11.1 Chaîne de mesure analogique	30
11.2 Chaîne de mesure numérique	30
11.2.1 Capteur	31
11.2.2 Convertisseur CAN	32
11.2.3 Calculateur numérique	36
11.2.4 Afficheur numérique	37
11.2.5 Erreurs d'une chaîne de mesure	37

1 Définition

Un capteur est un élément qui transforme l'état d'une grandeur physique (mesurande) en une grandeur exploitable. C'est le premier élément d'une chaîne de mesure.

Il existe deux types de capteurs : actifs et passifs.

2 La mesure

La mesure est l'attribution d'une valeur numérique à une grandeur physique.

Une grandeur physique est la propriété d'un phénomène ou d'un corps que l'on peut quantifier.

Mesurer une grandeur c'est la comparer à une autre de grandeur de même espèce choisie comme unité de mesure.

Une unité de mesure est une grandeur particulière choisie comme grandeur de référence.

2.1 Les grandeurs physiques de base

Par le système international d'unités (SI). On distingue les unités de base et les unités dérivées.

Table 1: Les grandeurs physiques de base du SI.

	Unité de base	Symbole de l'unité	Symbole de la dimension
Longueur	mètre	m	L
Masse	kilogramme	kg	M
Temps	seconde	s	T
Intensité électrique	ampère	A	I
Température	kelvin	K	Θ
Quantité de matière	mole	mol	N
Intensité lumineuse	candela	cd	J

2.2 Définition des étalons

Depuis le 20 mai 2019, le système d'unités est établi à partir de constantes universelles afin de rendre le système d'unités le plus invariable et le plus universel possible.

2.2.1 Constantes de base

Notre SI compte sept unités de bases définies par sept constantes :

- La fréquence de transition entre deux niveaux de l'état fondamental de l'atome de césum 133 (notée Cs).

- La vitesse de la lumière dans le vide (notée c).
- La constante de Planck (notée h) introduite par la mécanique quantique.
- La charge élémentaire (notée e) de l'électromagnétisme.
- La constante de Boltzmann (notée k) introduite en thermodynamique.
- La constante d'Avogadro (notée N_A) particulièrement utilisée en chimie.
- Le rendement lumineux (noté K_{cd}) utilisé en photométrie.

Constante	Symbol	Valeur numérique exacte	Définition de l'unité du SI
Fréquence de transition entre les deux niveaux de l'atome de césum	$\Delta\nu_{Cs}$	9 192 631 770 Hz (avec $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$)	La seconde (s) est définie en fixant la valeur de $\Delta\nu_{Cs}$ exprimée en s^{-1}
Vitesse de la lumière dans le vide	c	299 792 458 m/s	A partir de la seconde, le mètre (m) est défini en fixant la valeur de c exprimée en m s^{-1}
Constante de Planck	h	$6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$ (avec $\text{J} = \text{m}^2 \text{ kg s}^{-2}$)	A partir de la seconde et du mètre, le kilogramme (kg) est défini en fixant la valeur de h exprimée en $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$
Charge élémentaire	e	$1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$ (avec $\text{C} = \text{A s}$)	A partir de la seconde, l'ampère (A) est défini en fixant la valeur de e exprimée en A s
Constante de Boltzmann	k	$1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ (avec $\text{J} = \text{m}^2 \text{ kg s}^{-2}$)	A partir de la seconde, du mètre et du kilogramme, le kelvin (K) est défini en fixant la valeur de k exprimée en $\text{K}^{-1} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$
Constante d'Avogadro	N_A	$6,022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	La mole (mol) est définie en fixant la valeur de N_A exprimée en mol^{-1}
Rendement lumineux d'une radiation monochromatique de fréquence 540. 10^{12} Hz	K_{cd}	683 lm/W (avec $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{ m}^{-2}$ = cd sr et $\text{W} = \text{m}^2 \text{ kg s}^{-3}$)	A partir de la seconde, du mètre et du kilogramme, la candela (Cd) est définie en fixant la valeur de K_{cd} exprimée en $\text{cd sr kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3$

Figure 1: Les constantes de base du SI.

2.2.2 Grandeur dérivées

Table 2: Les grandeurs physiques dérivées du SI.

Grandeur	Nom	Unité Symbole	Expression
fréquence	hertz	Hz	1 s^{-1}
force	newton	N	1 kg m s^{-2}
pression	pascal	Pa	1 N m^{-2}
énergie, travail, quantité de chaleur	joule	J	1 N m
puissance, flux énergétique	watt	W	1 J s^{-1}
charge électrique, quantité d'électricité	coulomb	C	1 A s
potentiel électrique, différence de potentiel, tension, force électromotrice	volt	V	1 W A^{-1}
capacité électrique	farad	F	1 C V^{-1}
résistance électrique	ohm	Ω	1 V A^{-1}
conducante électrique	siemens	S	$1 \Omega^{-1}$
flux d'induction magnétique	weber	Wb	1 V s
induction magnétique	tesla	T	1 Wb m^{-2}
inductance	henry	H	1 Wb A^{-1}
température Celsius	degré Celsius	$^{\circ}\text{C}$	1 K
flux lumineux	lumen	lm	1 cd sr^{-1}
éclairement	lux	lx	1 lm m^{-2}

3 Dimension d'une grandeur dérivée

La dimension exprime la relation existant entre une grandeur dérivée et les grandeurs de base dont elle dépend.

$$\dim G = [G] = L^\alpha M^\beta T^\gamma I^\delta \Theta^\epsilon N^\mu J^\nu$$

NB

- Si $G = 1$, la grandeur est dite sans dimension mais elle peut avoir une unité (e.g. les angles, rapport de deux grandeurs).
- Les dimensions des grandeurs sont indépendantes du système d'unité choisi.
- La dimension peut être utilisée pour vérifier des formules ou prédire le résultat d'une opération.

3.1 Équations aux dimensions

Les équations doivent toujours être homogènes, i.e. que chaque membre d'une équation doit avoir la même dimension physique.

Exemples

- L'équation aux dimensions de la force est

$$F = MLT^{-2}$$

puisque $F = m \cdot a$ et l'unité SI est le kg m s^{-2} ou Newton.

- Pour l'énergie, l'équation aux dimensions est

$$F = ML^2T^{-2}$$

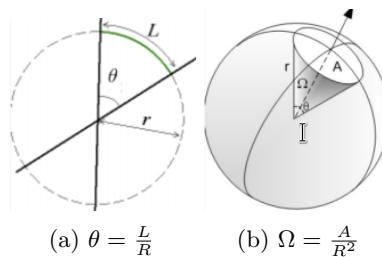
puisque $W = \frac{1}{2}m \cdot v^2$ et l'unité SI est le $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$ ou Joule.

3.2 Système SI

Préfixe	Symbol	Puissance de 10 de l'unité
exa	E	10^{18}
peta	P	10^{15}
tera	T	10^{12}
giga	G	10^9
mega	M	10^6
kilo	k	10^3
hecto	h	10^2
deca	da	10^1
		$10^0 = 1$
deci	d	10^{-1}
centi	c	10^{-2}
milli	m	10^{-3}
micro	μ	10^{-6}
nano	n	10^{-9}
pico	p	10^{-12}
femto	f	10^{-15}
atto	a	10^{-18}

3.3 Radian et stéradian

La radian est l'unité qui mesure les angles plan. Le stéradian est l'unité qui mesure les angles solides.



θ : angle exprimé en radian [rad]
L : longueur de la section du cercle [m]
R : rayon du cercle [m]

Ω : angle solide en stéradian [sr]
A : surface de la section de sphère [m²]
R : rayon de la sphère au carré [m]

3.4 Le Kelvin

L'échelle des températures Celsius est, par définition, la température absolue décalée en origine de 273.15 K.

$$T_K = T_C + 273,15$$

On en déduit que :

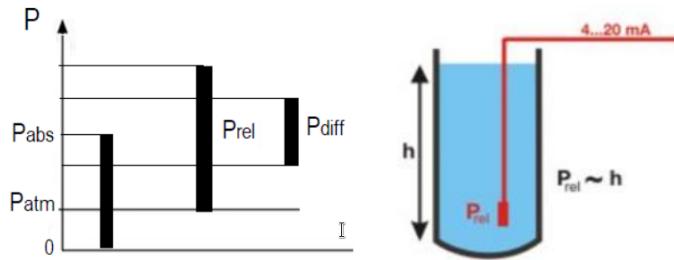
- Le zéro absolu est situé à -273.15°C .
- Les températures en kelvin ne sont jamais négatives.
- Les intervalles de l'échelle du degré Celsius sont identiques à ceux du Kelvin.

3.5 La pression

$$P = \frac{F}{S}$$

- P : pression en Pascal [Pa]
- F : force en Newton [N]
- S : surface [m²]

On a 1 bar = 10^5Pa et 1 atm = 1.013 bar. L'eau de ville est entre 2 et 5 bar, les pneus de voiture entre 1,5 et 2,5 bar, etc.



La pression absolue (P_{abs}) est la pression mesurée en référence à une pression nulle (vide absolu).

La pression manométrique ou relative (Pressure Gauge) donne la différence entre la pression d'un fluide et la pression atmosphérique (P_{atm}).

$$P_{abs} = P_{gauge} + P_{atm}$$

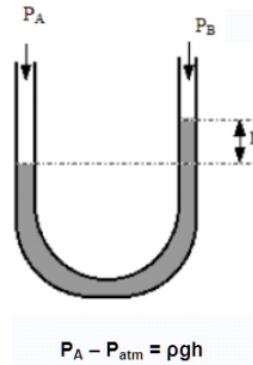
3.6 Pression hydrostatique

L'hydrostatique est l'étude des fluides immobiles.

Théorème Dans un liquide en équilibre de masse volumique uniforme, la différence de pression entre deux points 1 et 2, situés respectivement à une profondeur h_1 et h_2 est donnée par :

$$P_2 - P_1 = \rho.g.\Delta h$$

- P : pression [Pa]
- ρ : masse volumique du liquide [kg/m^3]
- g : accélération de la pesanteur [m/s^2]



3.7 Débit volumique

C'est la grandeur physique qui caractérise le volume d'un fluide qui traverse une surface donnée par unité de temps. C'est aussi le produit de la vitesse du fluide u par sa section S de passage (écoulement uniforme).

$$Q_v = \frac{V}{t} = u.S$$

- Q : débit en mètre cube par seconde [m^3/s]

NB La masse volumique est l'inverse du volume massique.

3.8 Masse volumique d'une substance

C'est une grandeur physique qui caractérise la masse d'une substance par unité de volume.

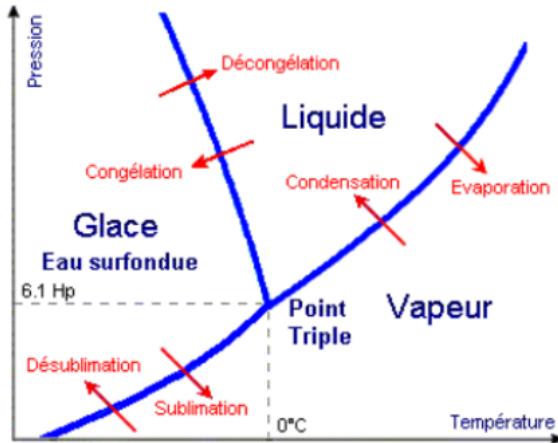
$$\rho = \frac{m}{V}$$

- ρ : masse volumique [m^3/kg]
- m : masse de la substance homogène [kg]
- V : volume occupé [m^3]

3.9 Diagramme de phase

Ce diagramme permet de représenter les changements d'état d'un système en fonction de variables : température, pression, volume.

Exemple de l'eau



NB Point triple de l'eau (611 Pa ; 0 °C) ou (6.11 mbar ; 273.2 K)

3.10 Les ondes

Une onde est une vibration qui se propage sans transport de matière. Les vitesses de propagation (on parle de célérité de l'onde) d'une onde dépendent du milieu matériel de propagation et du type de l'onde. Une onde peut être absorbée, réfractée et/ou réfléchie.

La distance d parcourue par une onde est $d = c.t$. La longueur d'onde λ est la distance parcourue pendant un période T

$$\lambda = c.T = \frac{c}{f}$$

c = vitesse de la lumière = 3.10^8 m s^{-1}

On distingue

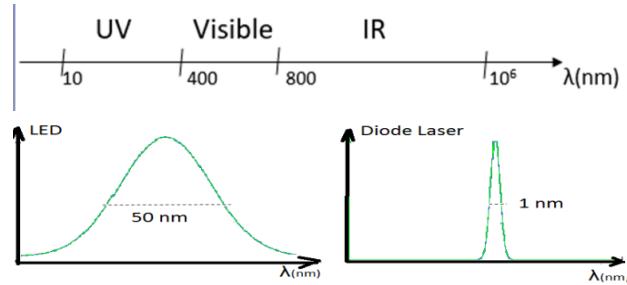
Les ondes mécaniques qui se propagent à travers une matière physique dont la substance se déforme.
E.g. ondes sonores.

Les ondes électromagnétiques qui ne nécessitent pas de support physique : oscillations périodiques de champs électriques et magnétiques générés à l'origine par des particules chargées.

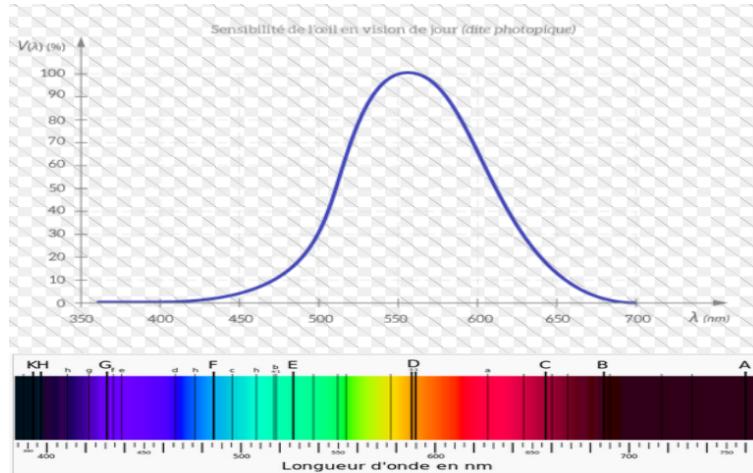
3.10.1 Classification des ondes électromagnétiques

Longueur d'onde (dans le vide)	Domaine	Fréquence
$\lambda > 30 \text{ cm}$	radio	$f < 1 \text{ GHz}$
$30 \text{ cm} > \lambda > 3 \text{ mm}$	micro-ondes (Wi-Fi, téléphone portable, radar, etc.)	$1 \text{ GHz} < f < 100 \text{ GHz}$
$3 \text{ mm} > \lambda > 700 \text{ nm}$	infrarouge	$100 \text{ GHz} < f < 430 \text{ THz}$
$700 \text{ nm} > \lambda > 400 \text{ nm}$	lumière visible	$430 \text{ THz} < f < 750 \text{ THz}$
$400 \text{ nm} > \lambda > 10 \text{ nm}$	ultraviolet	$750 \text{ THz} < f < 30 \text{ PHz}$
$10 \text{ nm} > \lambda > 10 \text{ pm}$	rayon X	$30 \text{ PHz} < f < 30 \text{ EHz}$
$10 \text{ pm} > \lambda$	rayon γ	$30 \text{ EHz} < f$

3.10.2 Optoélectronique



3.10.3 La lumière

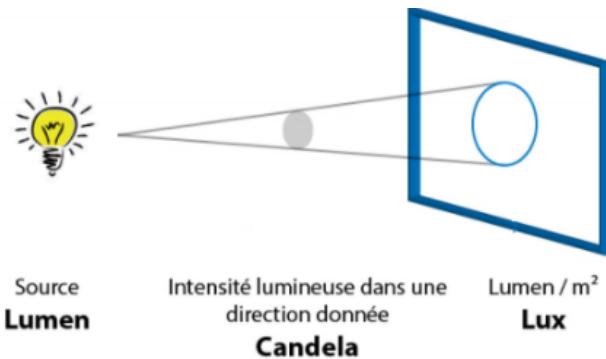


La lumière est l'ensemble des ondes électromagnétiques visibles par l'œil humain.

3.10.4 Le lumen

Le lumen (lm) est l'unité de flux lumineux. Il indique la quantité totale de lumière émise par seconde. C'est une unité de puissance comme le Watt.

Type de lampe	200-300lm	300-500lm	500-700lm
Ampoules à incandescence	25-30W	40W	60W
Ampoules halogènes	18-25W	35W	50W
Ampoules CLF	5-6W	8W	11W
Ampoules LED	2-4W	3-5W	5-7W



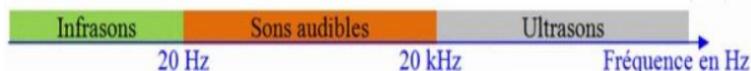
Le lumen (lm) est l'unité de flux lumineux. Il indique la quantité totale de lumière émise par seconde.

Le candela (cd) est l'unité d'intensité lumineuse : $1\text{ cd} = 1\text{ lm sr}^{-1}$. Un candela correspond à la luminosité d'une bougie.

Le lux (lx) est l'unité d'éclairement : $1\text{ lx} = 1\text{ lm m}^{-2}$.

3.10.5 Les ondes sonores

L'onde sonore est une variation de la pression de l'air. La propagation des ondes sonores nécessite un support matériel. C'est une onde mécanique.



Vitesse de propagation d'une onde sonore :

- $v \approx 340\text{ m s}^{-1}$ dans l'air;
- $v = 1500\text{ m s}^{-1}$ dans l'eau;
- $v = 5000\text{ m s}^{-1}$ dans l'acier.

4 Caractéristiques d'un capteur

4.1 Fidélité

La fidélité désigne l'étroitesse de l'accord entre les mesures répétées du même objet dans certaines conditions (voire répétabilité et reproductibilité). On a une bonne fidélité de mesure si la dispersion est faible.

Écart-type ou variance.

Répétabilité Mesures effectuées dans des conditions identiques : même laboratoire, même opérateur, même système de mesure, intervalle très court.

Reproductibilité Les conditions de mesure sont différentes : moments différents, etc.

4.2 Justesse

La justesse est l'étroitesse de l'accord entre la moyenne des mesures et une valeur de référence. La justesse est bonne quand l'erreur systématique est faible.

Biais Le biais de mesure ou erreur de justesse est l'estimation de l'erreur systématique :

$$Biais = \langle Y \rangle - Y_{ref}$$

4.2.1 Fidélité vs justesse

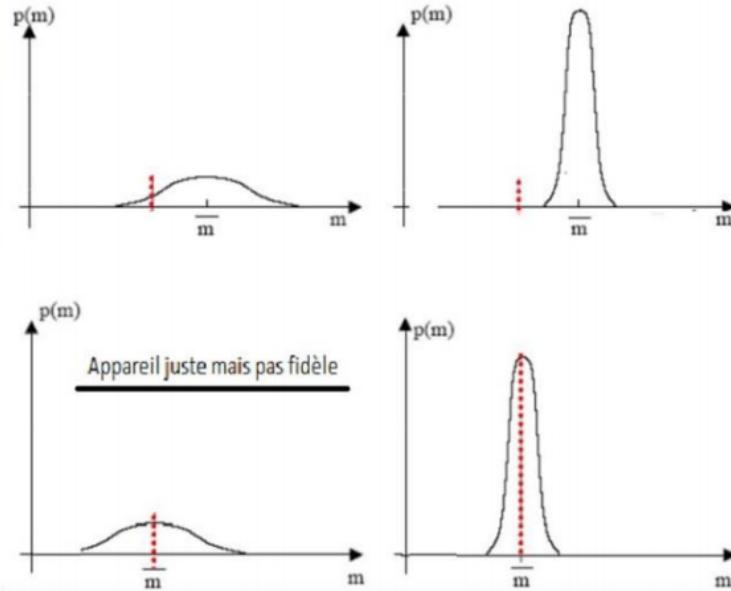
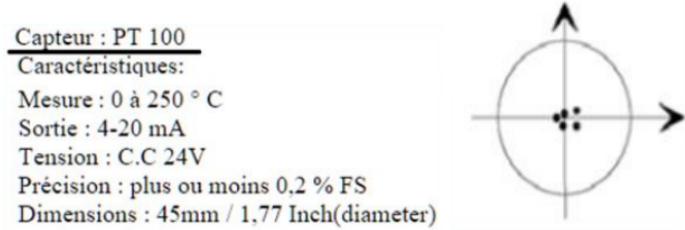


Figure 5: Fidélité vs justesse

4.3 Précision

La précision est définie par l'écart en pourcentage que l'on peut obtenir entre la valeur réelle et la valeur obtenue en sortie du capteur. La précision est souvent donnée en pourcentage de l'étendue de mesure. Un capteur précis est juste et fidèle.

Exemple L'erreur maximum commise par ce capteur est de $\pm 0.5^\circ C$ (cf dossier).



4.4 Sensibilité

La sensibilité est le coefficient qui lie la grandeur physique d'entrée à mesurer à la grandeur électrique de sortie. Plus un capteur est sensible, plus la mesure pourra être précise.

Exemple Pour un capteur de pression :

$$V_{(p)} = a.p + V_0 \Rightarrow S_c = \frac{dV}{dp} = a$$

Prenons une sensibilité $a = 10 \text{ mV/hPa} \Rightarrow V_{(p)} = 10p + V_0$.

4.5 Linéarité

Un capteur est linéaire si sa sensibilité est constante.

Exercice Ces capteur sont-ils linéaires ?

- PT 100 : $R_{(T)} = R_0 (1 + aT)$
- Thermistance : $R_{(T)} = a.e^{\frac{b}{T}}$

4.5.1 Erreur de linéarité

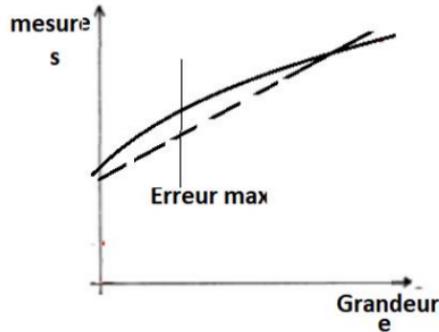


Figure 7: Erreur de linéarité

L'erreur de linéarité est la valeur absolue de l'écart maximum entre la courbe caractéristique du capteur (par valeurs montantes) et la droite de référence. Pour déterminer l'erreur de linéarité, une série de mesures est prise par valeurs montantes jusqu'à la valeur nominale.

4.5.2 Erreur de réversibilité

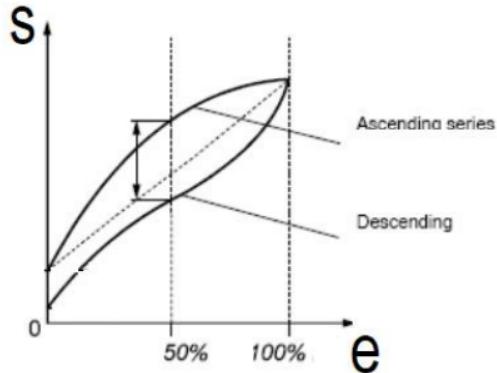


Figure 8: Erreur de réversibilité

C'est une mesure d'hystérésis : une mesure de la différence entre les courbes caractéristiques déterminées au couple croissant et décroissant.

4.6 Résolution

La résolution est la plus petite variation de grandeur mesurable par le capteur. Plus elle est faible, meilleure est cette résolution.

Exemple Pour un pH-mètre dont l'intervalle de mesure est de 0 à 14 (acide à base), la résolution est de 0.01 : le nombre récolté varie par pas de 0.01.

4.7 Plage de mesure

La plage de mesure d'un capteur est l'étendue des valeurs d'entrée qu'il peut traiter sans dégrader son fonctionnement.

Exemple Pour un intervalle de -5 V à 5 V , l'étendue de mesure est de 10 V .

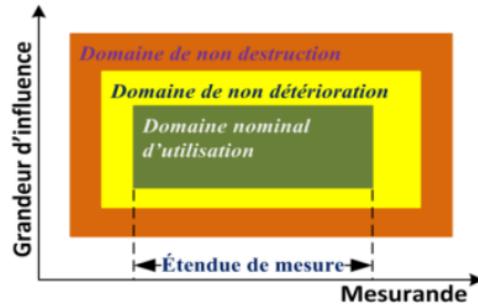


Figure 9: Étendue de mesure

4.8 Temps de réponse

La rapidité d'un capteur est le temps de réaction entre la variation de la grandeur physique qu'il mesure et l'instant où l'information est prise en compte par la partie commande.

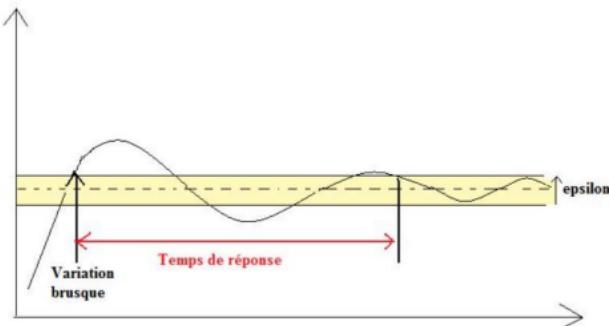


Figure 10: Rapidité

4.9 Grandeur d'influence

Les grandeurs d'influence sont des grandeurs physiques autres que le mesurande dont la variation peut modifier la réponse du capteur (température, pression, humidité, etc). Il est nécessaire de les réduire, de les stabiliser et/ou de les compenser.

5 Étalonnage des capteurs

L'étalonnage d'un capteur consiste à établir la relation qui existe entre la grandeur à mesurer et la grandeur électrique de sortie. Si cette relation est graphique, elle est représentée par une courbe d'étalonnage et si cette relation est algébrique, elle l'est par l'équation caractéristique du capteur.

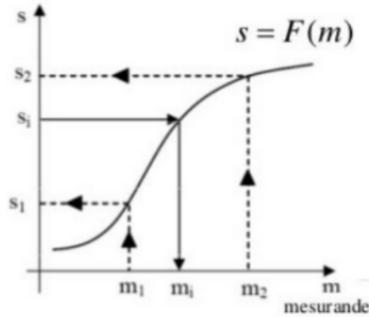


Figure 11: Étalonnage

5.1 Étalonnage à l'aide d'Excel

A partir des points de mesure, le logiciel Excel va nous permettre de tracer la courbe de tendance et de donner son équation. A partir de celle-ci, on pourra par la suite connaître une température quelconque de la CTN par la mesure de sa résistance.

Pour étalonner correctement un capteur, il est parfois nécessaire de comparer les valeurs lues aux valeurs correctes attendues afin de corriger les erreurs : c'est le calibrage de l'appareil.

L'étalonnage simple consiste à fixer tous les paramètres d'influence et ne faire varier que la seule grandeur à mesurer.

L'étalonnage multiple tient compte de toutes les grandeurs d'influence, il s'agit d'un ensemble d'étalonnages successifs qui détermine la dépendance de la grandeur principale vis-à-vis des grandeurs d'influence.

L'étalonnage absolu consiste à fournir les valeurs de la grandeur à mesurer par des étalons ou par des éléments de référence de très grande précision.

L'étalonnage relatif est l'utilisation d'un capteur dont on connaît la courbe d'étalonnage et dont la stabilité est assez grande. Le capteur à étalonner et le capteur étalonné sont soumis tous les deux aux mêmes contraintes et dans les mêmes conditions. C'est alors par comparaison qu'on établit la courbe d'étalonnage du capteur.

6 Capteurs passifs

Impédance ou résistance dont la valeur varie avec la grandeur physique. Nécessite une alimentation.

L'impédance varie par :

- la variation des dimensions du capteur
- la modification de propriétés électriques des matériaux

6.1 La résistivité

La résistivité d'un matériau, notée ρ , est égale à la résistance d'un tronçon de matériau d'un mètre de longueur et d'un mètre carré de section. Elle s'exprime en $[\Omega \text{ m}]$:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

La résistivité représente la capacité du matériau à s'opposer à la circulation du courant électrique.

Exemples de résistivités d'isolants :

Eau pure	$1,8 \cdot 10^5 \Omega \text{ m}$
Verre	$10^{17} \Omega \text{ m}$
Air	variable
Polystyrène	$10^{20} \Omega \text{ m}$

Exemples de résistivités de métaux :

Argent	$16 \cdot 10^{-9} \Omega \text{ m}$
Cuivre	$17 \cdot 10^{-9} \Omega \text{ m}$
Fer	$100 \cdot 10^{-9} \Omega \text{ m}$
Plomb	$208 \cdot 10^{-9} \Omega \text{ m}$

La résistivité évolue avec la température :

- Dans le cas des métaux (PT100), elle croît linéairement avec la température : $\rho = \rho_0 (1 + \alpha_0 (\theta - \theta_0))$
- Dans le cas des semi-conducteurs, elle décroît avec la température. Elle peut aussi dépendre de la quantité de rayonnement absorbé par le composant.

Exemples de coefficients de température de métaux pour $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$:

Métal	$\alpha[10^{-3}\text{K}^{-1}]$
Argent	3,85
Cuivre	3,93
Aluminium	4,03
Plomb	4,2
Tungstène	4,5
Nickel	5,37
Fer	6,5

6.2 La permittivité (diélectrique)

La permittivité (diélectrique) ou constante diélectrique, notée ϵ , est une propriété électrique d'un milieu. Elle caractérise la réponse d'un milieu donné à un champ électrique appliqué :

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{F m}^{-1}$$

Permittivités relatives typiques isolants :

Matériau	Permittivité relative ϵ_r
vide	1
air sec	1,0006
papier	2,3
verre standard	5
eau	78,5

6.3 La perméabilité magnétique

La perméabilité caractérise la faculté d'un matériau à modifier un champ magnétique :

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

- μ = la perméabilité magnétique du matériau [H m^{-1}]
- μ_0 = la perméabilité du vide = $4\pi \cdot 10^{-7}$ [H m^{-1}]
- μ_r = la perméabilité relative

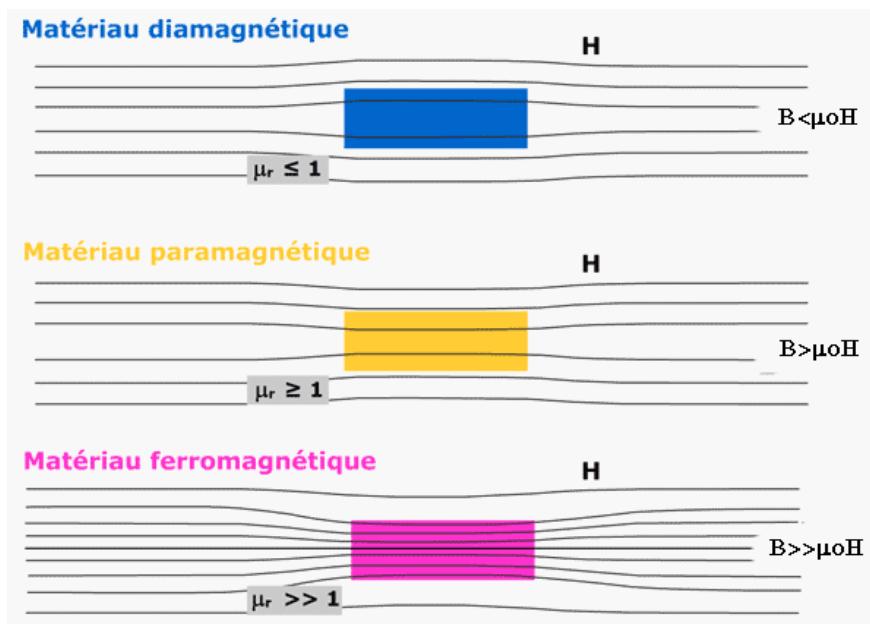


Figure 12: Perméabilité magnétique

6.3.1 Magnétisme

Les matériaux diamagnétiques s'aimantent faiblement dans le sens opposé au champ magnétisant (cet effet cesse dès que le champ magnétique est supprimé).

Les matériaux paramagnétiques s'aimantent faiblement dans le même sens que le champ magnétisant (cet effet cesse dès que le champ magnétique est supprimé).

Les matériaux ferromagnétiques peuvent être facilement magnétisés.

6.3.2 Champ magnétique

Si le régime du matériau est dit linéaire, la champ magnétique

$$B = \mu \cdot H$$

- B = champ (d'induction) magnétique [T] (1 Gauss [G] = 10^{-4} T)
- H = champ d'excitation magnétique

Exemples :

- Terrestre : 0,5G
- Petit aimant : 2kG à 4kG
- Petit aimant néodyme : 13kG

Perméabilité magnétique relative de matériaux ferromagnétiques à 20 °C :

Matériaux ferromagnétiques	μ_r (valeur max)
Cobalt	250
Fer	5000
Mu-métal	100 000
Nickel	600

6.4 Effets physiques mesurés par les capteurs passifs

Mesurande	Caractéristiques électriques sensibles	Types de matériaux utilisés
Température	Résistivité	Métaux : platine, nickel, cuivre
Très basse température	Constante diélectrique	Verres
Flux lumineux	Résistivité	Semi-conducteur
Déformation	Résistivité Perméabilité magnétique	Alliages de nickel, silicium dopé Alliages ferromagnétiques
Position	Résistivité	Matériaux magnéto-résistants : bismuth, antimoine d'indium
Humidité	Résistivité Constante diélectrique	Chlorure de lithium Alumine, polymères
Niveau	Constante diélectrique	Liquides isolants

6.5 Capteurs à résistance variable

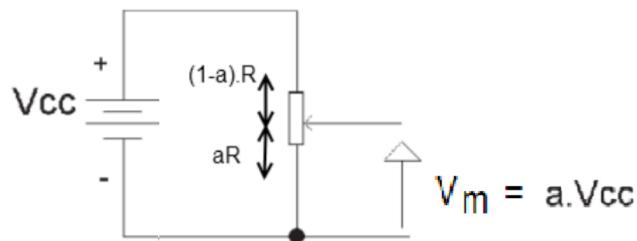
La résistance d'un conducteur :

$$R = \rho \frac{l}{S} = \rho_0(1 + \alpha\theta) \frac{l}{S}$$

Si α est constant, alors $R = f(l, \Theta)$.

6.5.1 Capteurs potentiométriques

Le déplacement est donné par la position du curseur.



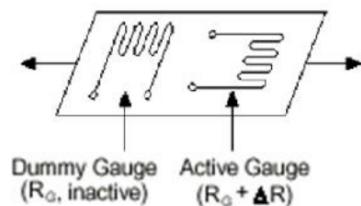
Inconvénients : usure mécanique (durée de vie $\pm 50 000$ manœuvres). On les remplace par des capteurs magnéto-résistifs plus résistants et plus précis.

6.5.2 Capteurs à jauge de déformation

Ce capteur est collé sur la pièce et permet de traduire la déformation de celle-ci en variation de résistance électrique :

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

- K = facteur de jauge

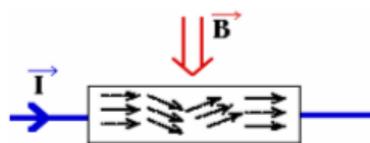


La jauge de contrainte peut être utilisée avec des fréquences élevées (< 50 kHz). Son élongation maximale est de 3 à 5%.

Ces capteurs permettent de mesurer des forces, des pressions, etc.

6.5.3 Capteurs magnéto-résistifs

La résistance électrique (la résistivité) du matériau varie en fonction de la direction du champ magnétique appliqué.



Ces capteurs permettent de détecter le mouvement de matières ferromagnétiques : mesure de vitesse, détection de roues dentées, contrôle de rotation.

Exemples : 2SSM13, SM351LT, SM353LT.

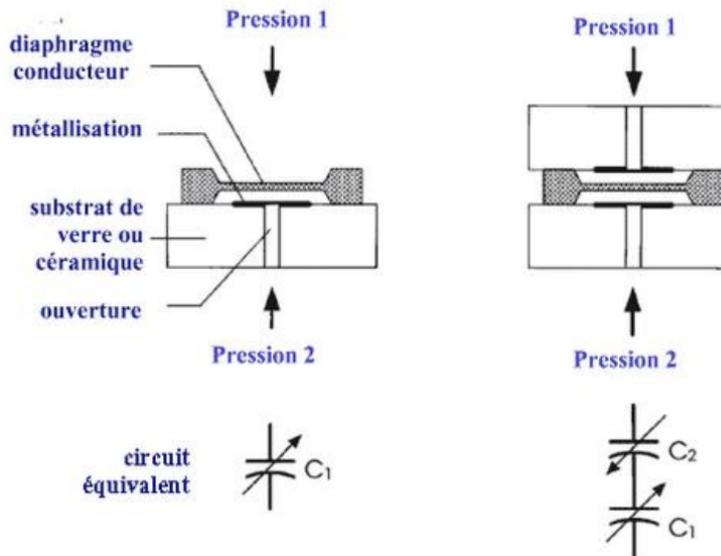
6.5.4 Capteurs de température résistifs

Les thermo-résistances fonctionnent par variation de la résistivité de certains matériaux (argent, cuivre, nickel, or, platine, etc.) selon la température. La résistance augmente de manière sensiblement linéaire avec la température.

Exemple : PT 100

6.6 Capteurs capacitifs

Principe :



Exemple : capteur de niveau Serie 90 - KAS-90-...-P-... de Rechner Sensors.

7 Capteurs actifs

Les capteurs actifs génèrent directement une tension, un courant ou une charge à partir de la grandeur physique. Ils utilisent un principe physique qui convertit directement l'énergie fournie par le mesurande en énergie électrique.

7.1 Effets physiques mesurés par les capteurs actifs

Mesurande	Énergie propre du mesurande	Principe physique	Grandeur de sortie
Température	Énergie thermique	Effet thermoélectrique Effet pyroélectrique	Tension Charge
Flux lumineux	Énergie électromagnétique	Effet photo-émissif Effet photovoltaïque Effet photoélectrique	Courant Tension Tension
Force			
Pression		Effet piézoélectrique	Charge
Accélération	Énergie mécanique	Effet d'induction électromagnétique	Tension
Vitesse		Effet Hall	Tension
Position			

7.2 Thermocouples

Un thermocouple est créé dès lors que deux métaux différents entrent en contact, ce qui produit une faible tension en circuit ouvert au point de contact, qui varie en fonction de la température. Cette tension thermo-électrique est connue sous le nom de tension de Seebeck.

$$E = S(\theta_1 - \theta_2)$$

- E = fém obtenue
- θ_1 = température soudure chaude
- θ_2 = température soudure froide
- S = coefficient de Seebeck

Les câbles d'extension sont des conducteurs de même nature que les fils du thermocouple. Les câbles de compensation sont des conducteurs de nature différente que les fils du thermocouple.

7.2.1 Choix pour la mesure de la température

Critères	Thermocouple	RTD	Thermistance
Échelle des temp.	-267 °C à 2316 °C	-240 °C à 649 °C	-100 °C à 500 °C
Précision	Bonne	Optimale	Bonne
Linéarité	Meilleure	Optimale	Bonne
Sensibilité	Bonne	Meilleure	Optimale
Coût	Optimal	Bon	Meilleur

Les thermocouples sont robustes et à des prix abordables. Ils ont un temps de réponse rapide mais sont moins précis et les moins stables et sensibles des capteurs. En outre, ils lisent uniquement les différences relatives de températures entre l'extrémité et les conducteurs alors que les RTD et les thermistances lisent la température absolue.

Les RTD sont le choix privilégié pour la répétabilité. Ils sont aussi plus stables et précis. Cependant, leur temps de réponse est lent et comme ils requièrent une source de courant ils ont une quantité faible d'auto-échauffement.

Les thermistances ont un temps de réponse rapide et sont relativement peu onéreuses, mais elles sont fragiles et ont une gamme de mesure limitée. Elles requièrent aussi une source de courant et ont un taux d'auto-échauffement plus important que les RTD. En outre, elles sont non-linéaires.

8 Capteurs intégrés

On intègre sur le même substrat de silicium le capteur et le conditionnement du signal. Cela permet de réduire l'encombrement de la chaîne de mesure, de faciliter la mise en œuvre du capteur et de favoriser la normalisation des capteurs.

Exemple : LM35

9 Capteurs intelligents

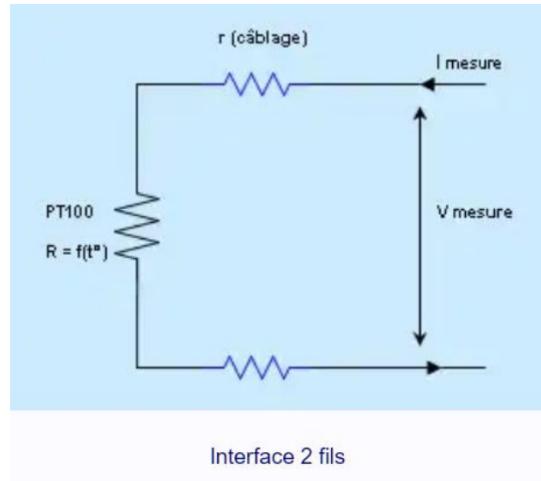
On intègre sur la même puce le capteur et les circuits associés pour le traitement et la transmission de l'information. Cela permet de commander à distance le capteur, de gérer plusieurs capteurs, de gérer différentes mesures et de les corriger.

10 Conditionnement du signal

10.1 Raccordement

10.1.1 Raccordement direct (2 fils)

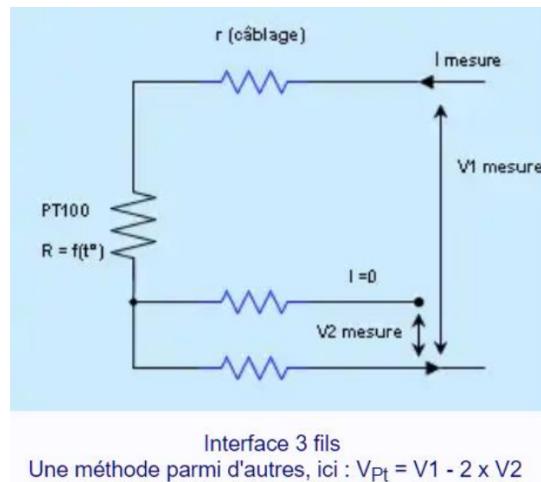
Mesurer une résistance faible requiert de s'affranchir des résistances de contact et des conducteurs.



Une résistance se mesure par le rapport $\frac{U}{I}$.

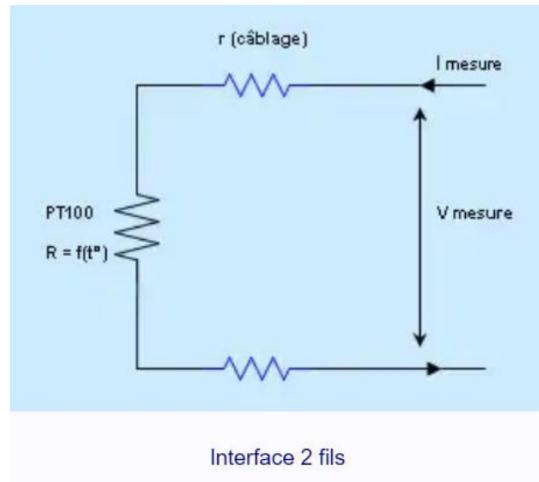
10.1.2 Interface à 3 fils

Le principe du 3 fils consiste à mesurer la chute de tension dans un des deux fils, la doubler (ce qui implique des fils identiques) et la soustraire.



10.1.3 Interface à 4 fils

Deux sont utilisés pour alimenter la sonde, les deux autres sont raccordés à la mesure. Les résistances des fils n'interviennent plus.

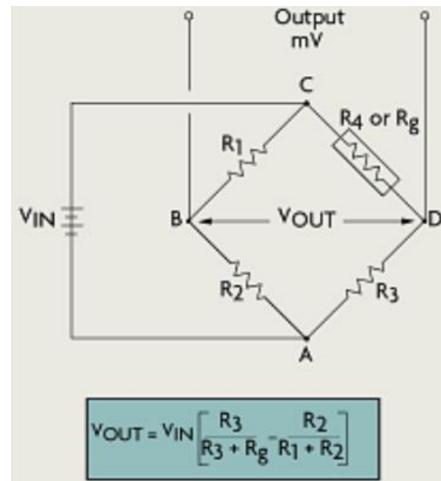


Remarque : pas raccordable sur automate, réservé à l'étalonnage.

10.2 Pont de Wheatstone

Le pont de Wheatstone est utilisé pour mesurer les petites variations de résistance électrique (e.g. pour une jauge de contrainte). Si la tension de sortie est nulle, on a :

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} = r$$

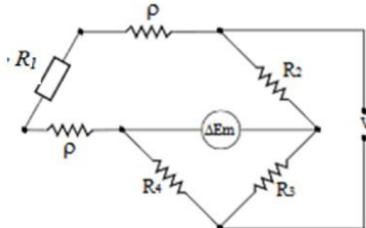


Système à deux fils, ¼ de pont

Bras 1 du pont $\Rightarrow R_1 + 2\rho$

Bras 4 du pont $\Rightarrow R_4$

$$\text{-Déséquilibre initial} \Rightarrow \frac{R_1 + 2\rho}{R_4} \neq \frac{R_2}{R_3}$$



$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} = r$$

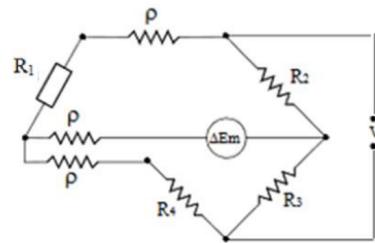
Système trois fils, ¼ de pont

Bras 1 du pont $\Rightarrow R_1 + \rho$

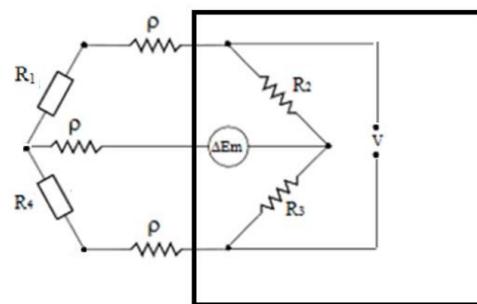
Bras 4 du pont $\Rightarrow R_4 + \rho$

Trois fils identiques de même ρ

$$\text{Équilibre initial: } \frac{R_1 + \rho}{R_4 + \rho} = \frac{R_2}{R_3} \quad (\text{si } r = 1)$$



Système trois fils, ½ de pont



Deux jauge actives : R1 et R4. Le demi-pont est relié à l'amplificateur par trois fils : deux pour l'alimentation, et le troisième pour la mesure.

Dans ce montage, le câblage n'a pas d'influence sur l'équilibre du pont. L'effet thermique est également compensé, mais pas les pertes en ligne.

11 Chaîne de mesure

Une chaîne de mesure est la suite des éléments d'un système de mesure qui constitue un seul chemin du signal depuis le capteur jusqu'à l'élément de mesure.

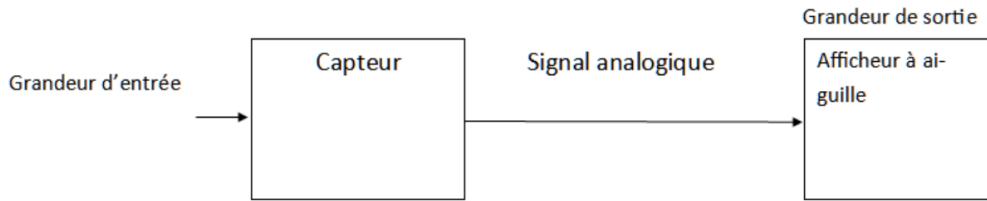
Elle comprend :

- un capteur,
- un signal qui suit un chemin dans la succession des éléments,
- un élément de sortie qui rend une indication sous forme analogique ou numérique.

Un appareil de mesure est un chaîne de mesure.

11.1 Chaîne de mesure analogique

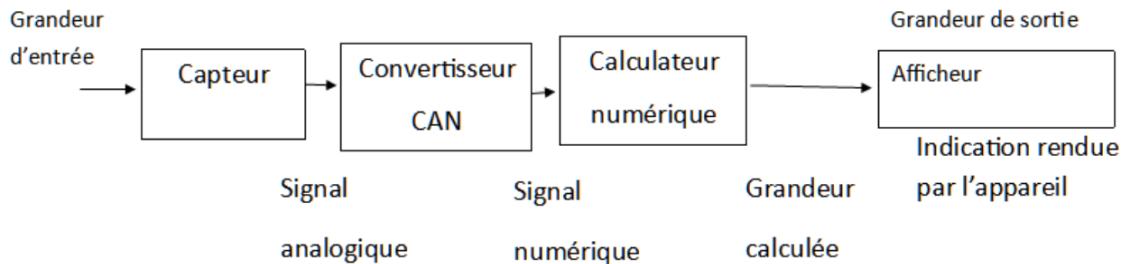
Un signal analogique est basé sur une grandeur physique qui varie de façon continue et dont la valeur varie de façon analogue à la grandeur d'entrée.



La graduation du cadran est effectuée lors de l'étalonnage de la chaîne de mesure.

11.2 Chaîne de mesure numérique

Un signal numérique est un signal restitué sous la forme d'un nombre à partir d'un signal analogique.

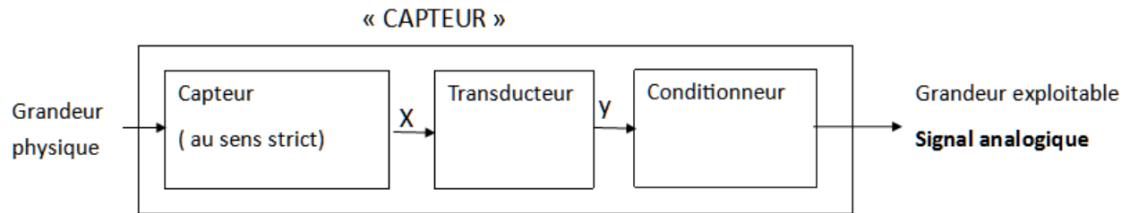


Elle se décompose comme suit :

- Capteur
- Convertisseur CAN

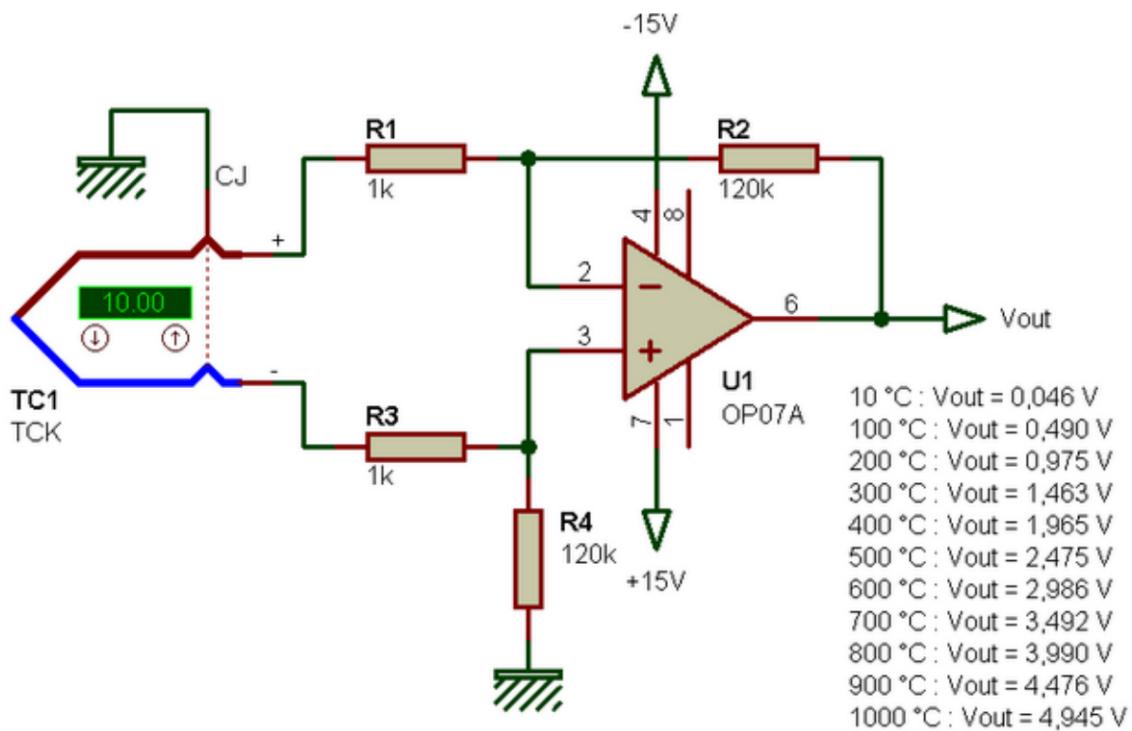
- Calculateur numérique
- Afficheur numérique

11.2.1 Capteur



- **L'élément capteur** : soumis à l'action de la grandeur d'entrée
- **Transducteur** : élément faisant correspondre à la grandeur d'entrée une autre grandeur de sortie
- **Conditionneur** : élément qui fournit une grandeur exploitable

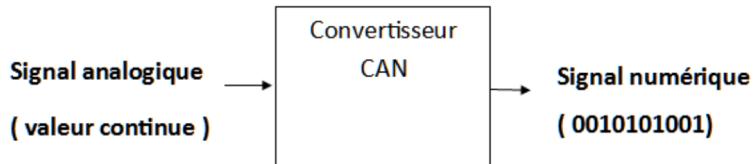
Exemple :



Mais aussi : conditionneur de balance, ex 2 conditionneur, pont de Wheatstone, etc.

11.2.2 Convertisseur CAN

A partie d'un signal analogique (tension ou courant), le convertisseur restitue un signal numérique utilisable par un calculateur.



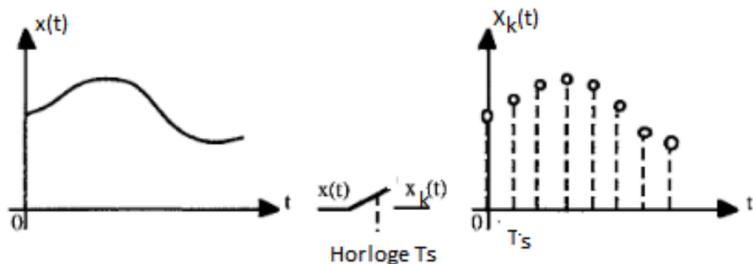
Signal numérique

La numérisation d'un signal ou le passage de l'analogique au numérique repose sur trois étapes successives : l'**échantillonnage**, la **quantification** et le **codage**.

Un signal numérique est une suite discrète de valeurs numériques (en général des entiers).

Échantillonnage

L'échantillonnage consiste à relever à intervalle régulier la valeur d'une grandeur physique. La fréquence d'échantillonnage est le nombre d'échantillons par unité de temps. Le signal analogique de départ est continu en temps et en amplitude.



En pratique, on utilise le théorème de Shannon pour déterminer la fréquence d'échantillonnage :

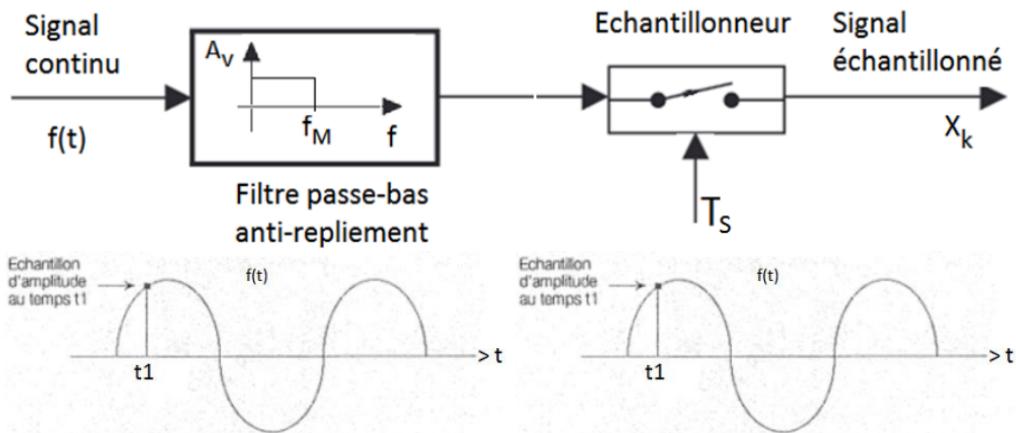
$$f_S \geq 2f_M$$

ou

$$T_S \leq \frac{1}{2f_M}$$

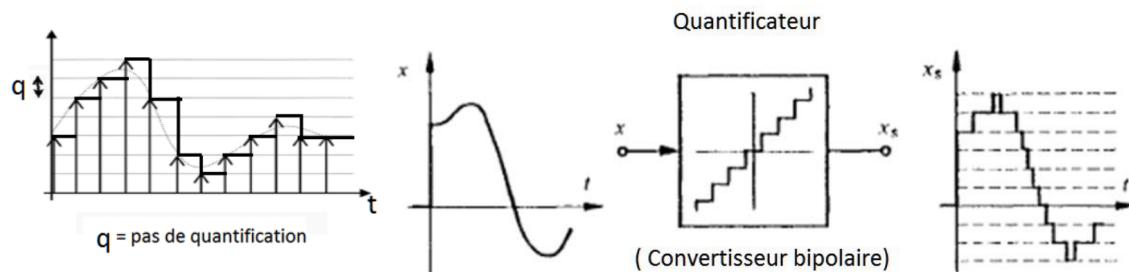
- f_M = fréquence maximale d'un signal continu
- $\frac{1}{2f_M}$ = période d'échantillonnage critique

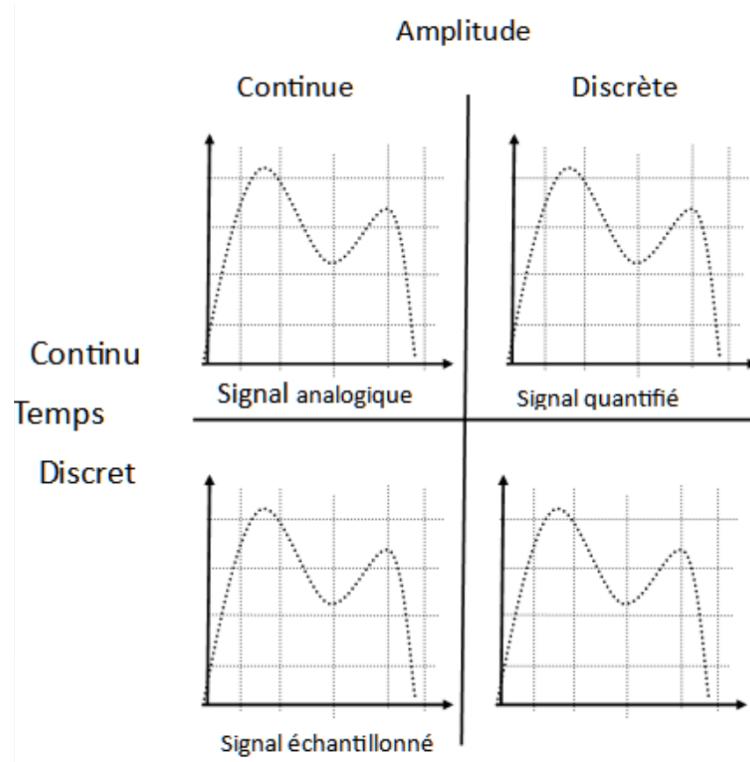
Transformation d'un signal continu en un signal discret :



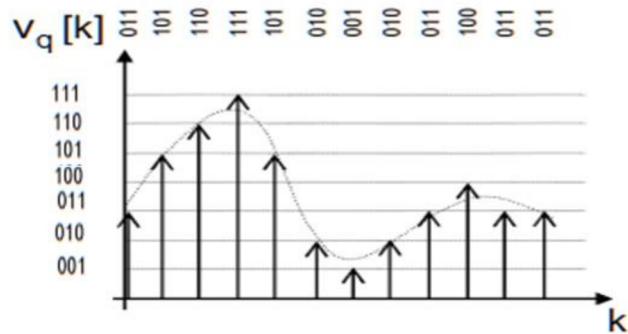
Quantification

Un signal analogique dont l'amplitude ne peut prendre que des valeurs entières précises est dit quantifié.





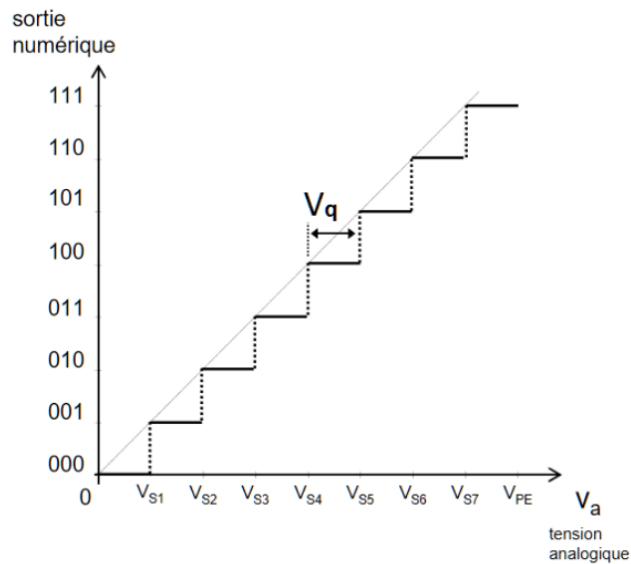
Codage



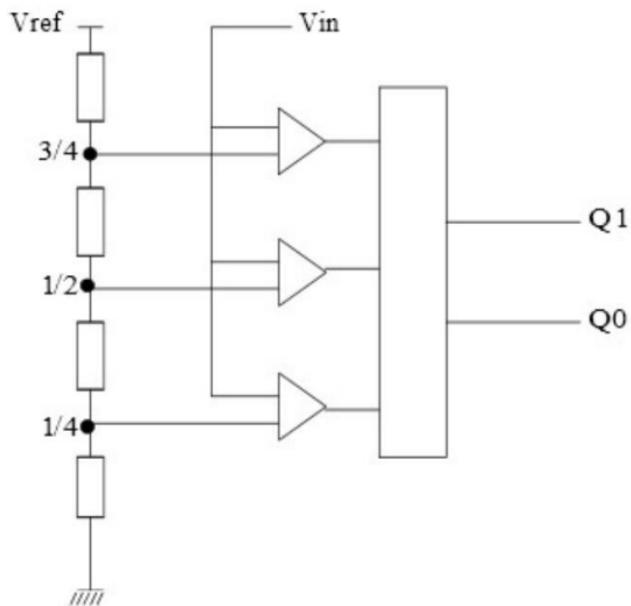
Convertisseur CAN (ou ADC)

Un convertisseur analogique/numérique (CAN) est un dispositif électronique permettant la conversion d'un signal analogique en un signal numérique.

Exemple : CAN unipolaire 3 bits = 8 niveaux



Exemple : Convertisseur flash



Comparaison de convertisseurs CAN :

Type de CV	Fréquence	Résolution	Surface Analogique	Surface Numérique	Consommation
Compteur	100Khz	14-16 bits	300 transistors	500 portes	10 mWatts
Simple rampe	100Khz	10-12 bits	100 transistors	100 portes	10 mWatts
Double rampe	100Khz	>16 bits	150 transistors	150 portes	10 mWatts
Approx. Successives	1Mhz	14-16 bits	300 transistors	500 portes	10 mWatts
Algorithmique	1Mhz	14-16 bits	100 transistors	100 portes	1 mWatt
Flash	>100Mhz	12-14 bits	2500 transistors	5000 portes	1 Watt
Sub-ranging	50Mhz	12-14 bits	600 transistors	500 portes	100 mWatts
Pipeline	100Mhz	10-12 bits	800 transistors	200 portes	100 mWatts
Sigma-delta	1Mhz	>20 bits	1000 transistors	5000 portes	100 mWatts

Exemple : AD7896 Convertisseur analogique-numérique 12bits à sortie série


**ANALOG
DEVICES**

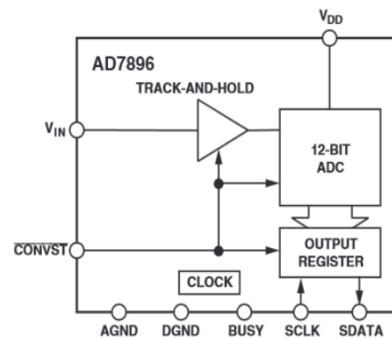
**2.7 V to 5.5 V, 12-Bit, 8 μ s
ADC in 8-Lead SOIC/PDIP**

AD7896

FEATURES

- 100 kHz Throughput Rate
- Fast 12-Bit Sampling ADC with 8 μ s Conversion Time
- 8-Lead PDIP and SOIC
- Single 2.7 V to 5.5 V Supply Operation
- High Speed, Easy-to-Use Serial Interface
- On-Chip Track-and-Hold Amplifier
- Analog Input Range Is 0 V to Supply
- High Input Impedance
- Low Power: 9 mW Typ

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



11.2.3 Calculateur numérique

Le calculateur numérique permet de transformer le signal numérique provenant du CAN en une indication correspondant à la grandeur d'entrée (masse, force, température, etc).

Pour réaliser cette fonction, il doit être étalonné. L'étalonnage est initialement réalisé par le constructeur à l'aide d'étalons. Il établit la relation entre les valeurs numériques du CAN et les valeurs des étalons.

Lors d'une mesure, le calculateur utilise une relation d'étalonnage pour rendre une indication : c'est le mesurage.

11.2.4 Afficheur numérique

11.2.5 Erreurs d'une chaîne de mesure

La valeur d'un mesurage ne peut être évaluée que par la chaîne de mesurage.

L'erreur de mesure est l'écart entre la valeur mesurée et la valeur de référence. Elle est donnée par la somme de l'erreur systématique et de l'erreur aléatoire.

L'erreur systématique se détermine comme un décalage constant entre la valeur du mesurande et la valeur de référence.

L'erreur aléatoire ou erreur accidentelle sont les écarts non constants entre la valeur de référence et la valeur mesurée pour une même valeur de mesurande.