

# MT4

## Métrologie

# 2nde partie : la métrologie industrielle

Cette partie traitera les points suivants :

- les notions de bases de la métrologie,
- les normes qui traitent de la métrologie,
- la structuration et l'optimisation d'un processus de mesure,
- les bases de la gestion d'un parc d'instruments,
- une introduction aux méthodes d'estimation des incertitudes.

# Le rôle de la métrologie

La métrologie au sens étymologique du terme se traduit par « science de la mesure ».

Mesurer une grandeur physique consiste à lui attribuer une valeur quantitative en prenant pour référence une grandeur de même unité.

Mesurer c'est comparer : comparer par rapport à des attendus, des abaques, des résultats d'équations

Les résultats des mesures servent à prendre des décisions dans de nombreux domaines, tels que:

- acceptation d'un produit (mesure de caractéristiques, de performances, conformité à une exigence),
- réglage d'un instrument de mesure, validation d'un procédé de mesure ou de réglage,
- réglage d'un paramètre dans le cadre d'un contrôle d'un procédé de fabrication
- validation d'une hypothèse scientifique,
- protection de l'environnement,
- définition des conditions de sécurité d'un produit ou d'un système.

# Le vocabulaire

Dans le vocabulaire officiel des normes de métrologie, cette opération communément appelée mesure est appelée mesurage (en anglais measurement).

De même, la grandeur physique soumise à l'opération de mesurage est appelée mesurande (en anglais measurand).

Attention aux faux amis, l'opération d'étalonnage (en anglais calibration) doit être distinguée de celle appelée calibrage (en anglais gauging).

Il ne faut pas utiliser le terme précision mais le terme incertitude (en anglais uncertainty).

# Quelques unités de base

Pour la longueur, l'unité de base est le mètre :

Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de  $1/299792458$  de seconde ( $3 \cdot 10^{-9}$  secondes = 3ns) → Voir musée du CNAM

Historiquement, la première définition officielle et pratique du mètre (1791) était basée sur la circonférence de la terre, et valait  $1/40000000$  d'un méridien.

Auparavant, le mètre en tant que proposition d'unité décimale de mesure universelle était défini comme la longueur d'un pendule qui oscille avec une demi-période d'une seconde.

# Quelques unités de base

Pour la masse, l'unité de base est le kilogramme :

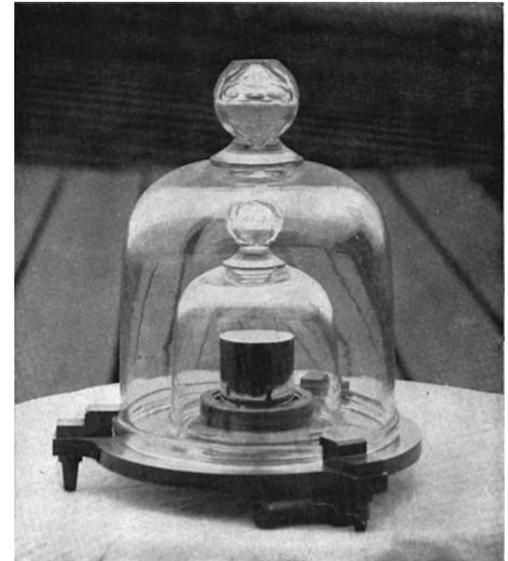
Le kilogramme est la masse du prototype international du kilogramme.

Ce dernier, composé d'un alliage de platine et d'iridium (90%-10%), est conservé au Bureau international des poids et mesures à Sèvres, en France. Historiquement, la définition du kilogramme était la masse d'un décimètre cube d'eau (un litre).

Depuis la conférence générale des poids et mesures de 2018, le kilogramme est défini par la constante de Planck : une constante physique utilisée dans la théorie quantique.

Voici donc la formule élaborée par Max Planck :  $E = h \cdot f$ , avec :

- E = énergie de la fréquence;
- h = constante de Planck ( $h=6,63 \cdot 10^{-34}$  joules.seconde);
- f = fréquence de l'onde.



# Quelques unités de base

Pour la temps, l'unité de base est la seconde :

La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux de l'état fondamental de l'atome de césium 133 à la température de 0 kelvin.

La seconde était à l'origine basée sur la durée du jour terrestre, divisé en 24 heures de 60 minutes, chacune d'entre elles durant 60 secondes (soit 86 400 secondes pour une journée)

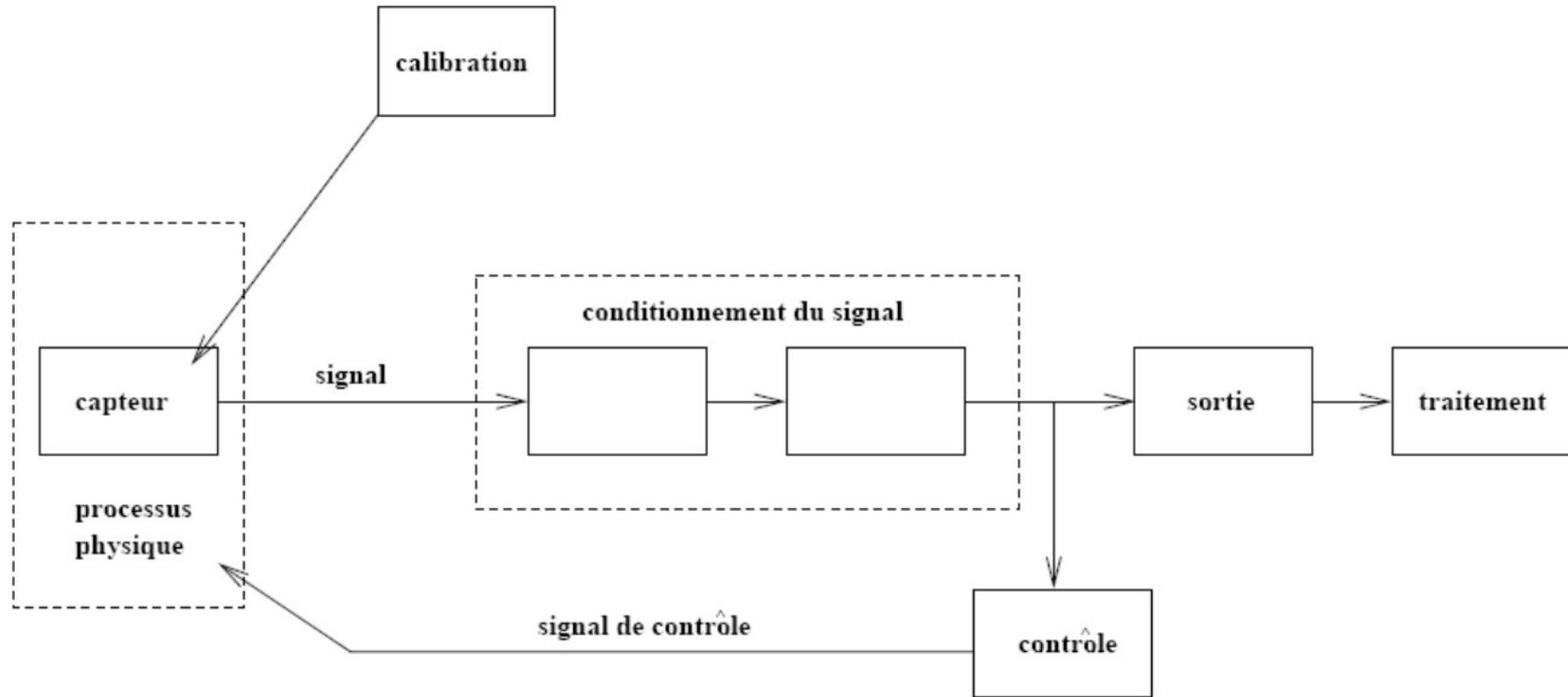
# Quelques unités supplémentaires

A côté de ces unités de base et des unités dérivées, il existe des unités supplémentaires, au nombre de deux:

- l'unité d'angle plan: le radian (symbole: rad) ; le radian est l'angle plan compris entre deux rayons qui, sur la circonférence d'un cercle, interceptent un arc de longueur égale à celle du rayon,
- l'unité d'angle solide: le stéradian (symbole: sr) ; le stéradian est l'angle solide qui, ayant son sommet au centre d'une sphère, découpe sur la surface de cette sphère une aire égale à celle d'un carré ayant pour côté le rayon de la sphère.

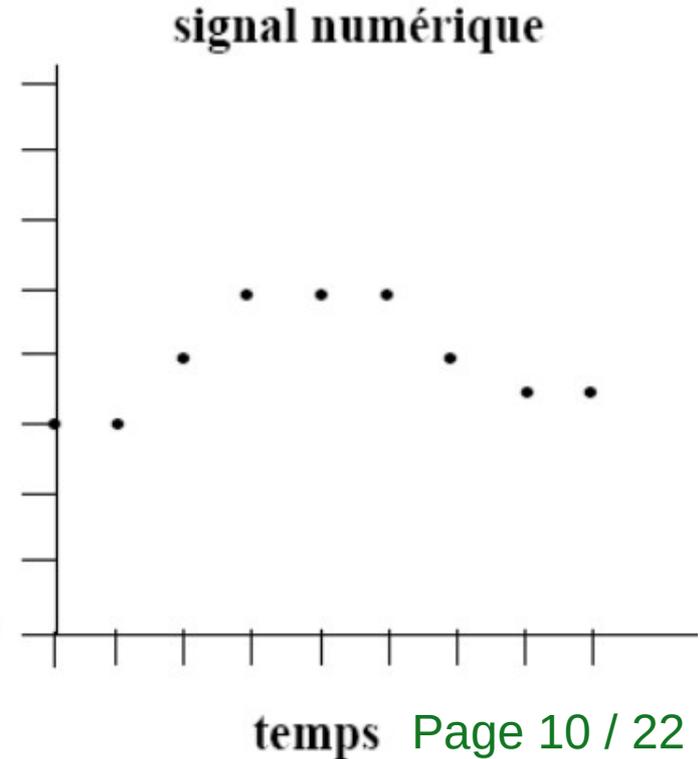
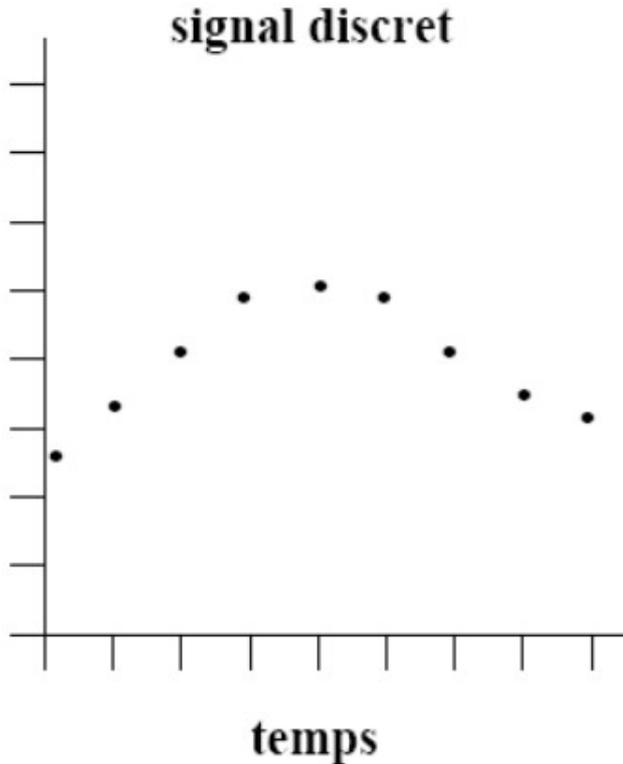
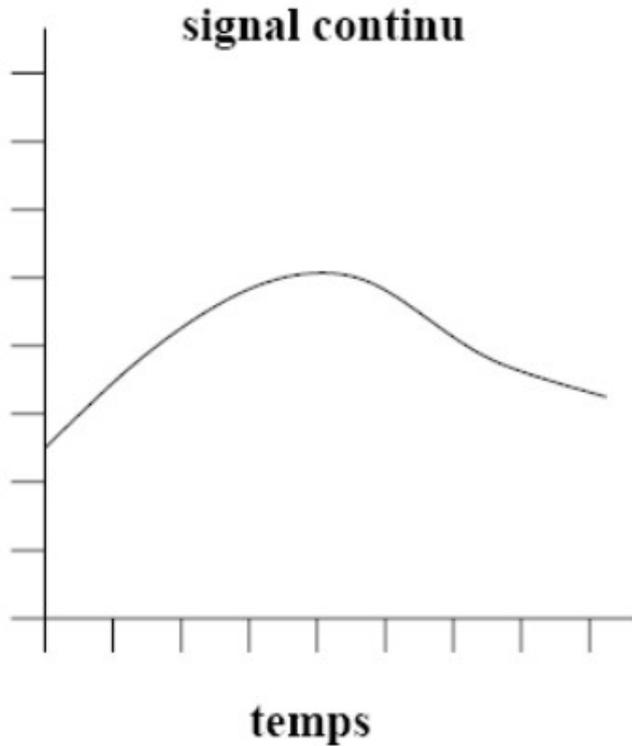
Les grandeurs «angle plan» et «angle solide» doivent être considérées comme des unités sans dimension qui peuvent être utilisées ou non dans les expressions des unités dérivées.

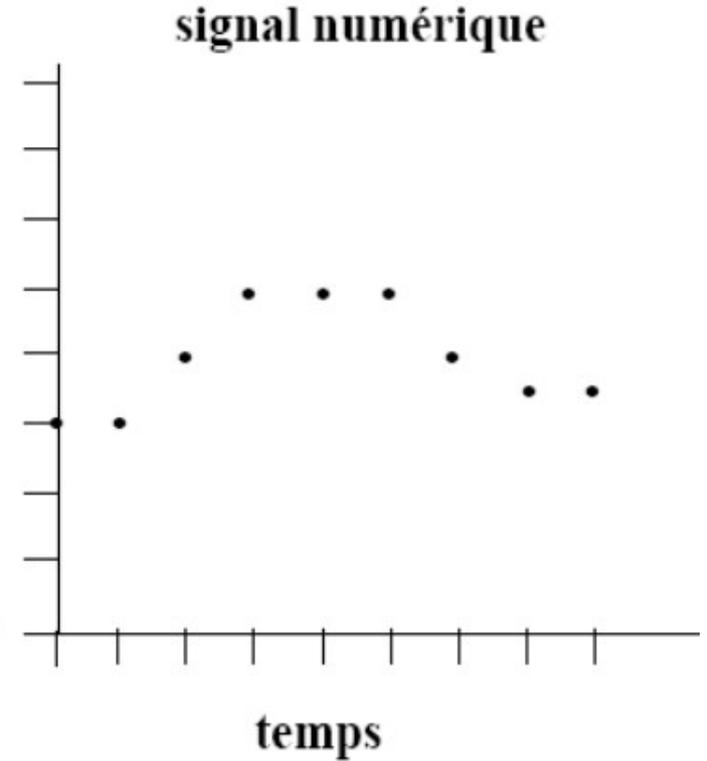
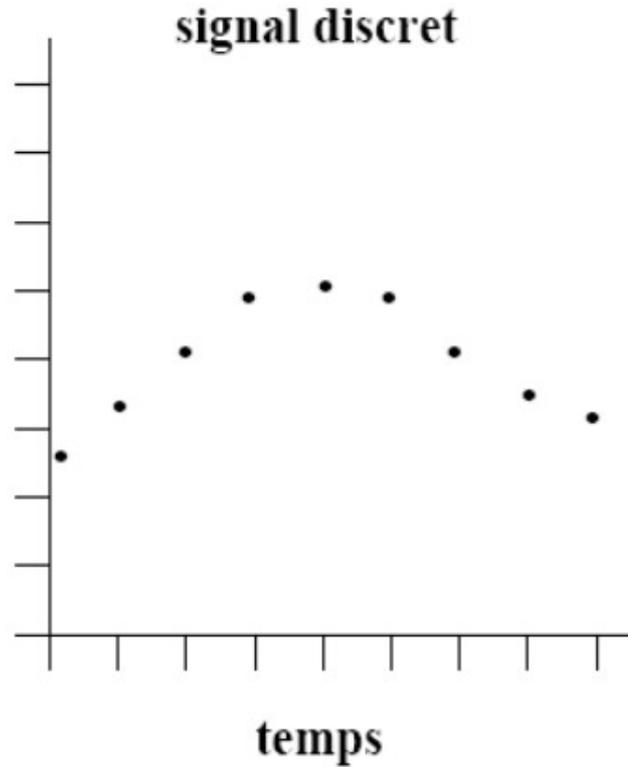
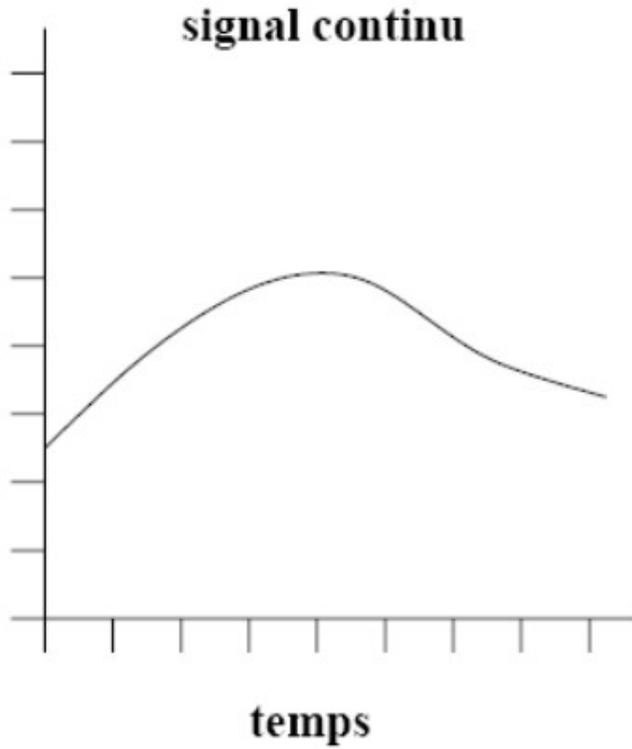
# Le système de mesure



# Les signaux

Dans une chaîne de mesures, il est possible de rencontrer des signaux continus (ou analogiques), des signaux discrets ou des signaux numériques

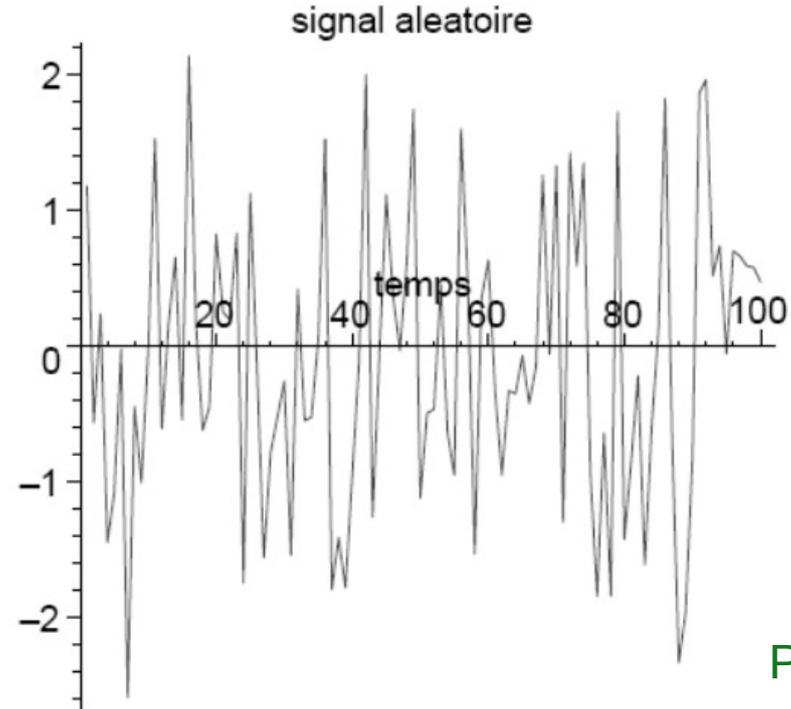
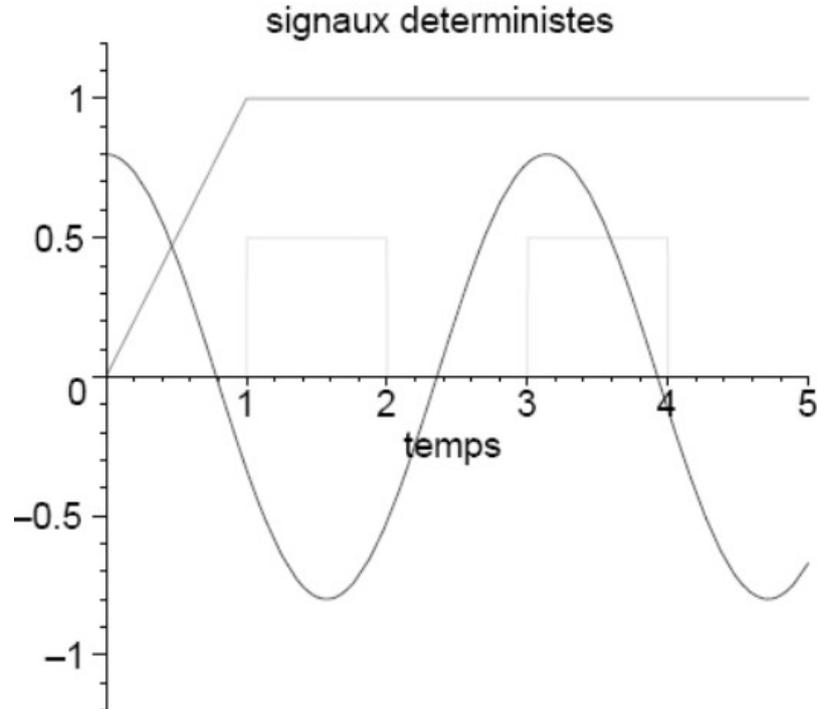




- Un signal continu est défini pour toutes les valeurs du temps et peut prendre n'importe quelle valeur en amplitude.
- Un signal discret est en général un signal continu qui est mesuré à certains instants seulement.
- Un signal numérique est un signal discret qui a été quantifié et qui par conséquent ne peut prendre qu'un ensemble discret de valeurs en amplitude.

# Les signaux déterministes vs aléatoires

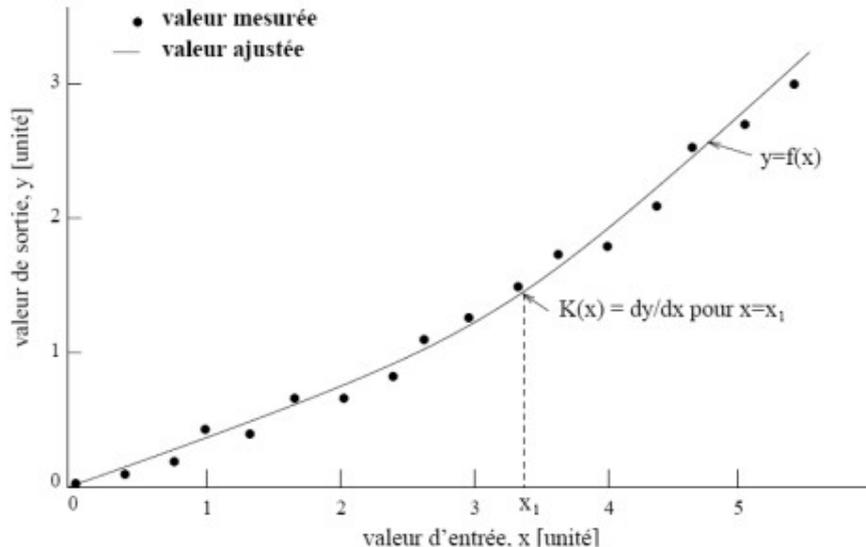
il faut aussi distinguer les signaux déterministes en fonction du temps pour lesquels les valeurs futures peuvent être prédites, des signaux aléatoires qui ne sont pas prédictibles et qui nécessiteront des traitements spécifiques.



# L'étalonnage des capteurs et sondes

Pour les capteurs et les instruments de mesure, l'étalonnage est un réglage ou une caractérisation de la réponse de l'appareil. Pour cela, généralement on utilise des grandeurs de référence ou étalons.

L'étalonnage d'un instrument consiste à appliquer une valeur connue en entrée du système de mesure afin de vérifier que la sortie correspond bien à la valeur attendue. En entrant différentes valeurs connues on peut obtenir en sortie la courbe d'étalonnage



C'est particulièrement utile lorsque la réponse de l'instrument est non linéaire.

# L'étalonnage des capteurs et sondes

La méthode générale consiste à utiliser l'appareil de mesure sur un étalon, et à vérifier que la mesure produite correspond bien à la valeur attendue ; si ce n'est pas le cas, on corrige le réglage de l'appareil. Par exemple, on pèse une masse étalon, et on corrige la position de l'aiguille pour que celle-ci indique la valeur correcte. C'est l'étalonnage dit à un point.

Cependant, cela ne suffit pas toujours. L'appareil peut présenter :

- Une dérive systématique: il indique systématiquement une valeur supérieure ou inférieure d'une quantité fixe ;
- Une dérive de sensibilité: il indique systématiquement une valeur supérieure ou inférieure d'une proportion (d'un pourcentage) donné.

Chaque mesure étant entachée d'erreur, y compris la mesure des étalons, on effectue en général plusieurs mesure du même étalon, ou bien on utilise plus d'étalons que nécessaire et l'on détermine la courbe d'étalonnage par régression (méthode des moindres carrés).

L'étalonnage est généralement effectué par le fabricant de l'appareil de mesure. De manière générale, un appareil de mesure transforme un paramètre physique en une donnée analogique (lecture sur un cadran, tracé d'un feutre sur un papier) ou un signal électrique, qui peut ensuite être converti en données numériques.

# L'étalonnage des capteurs et sondes

La méthode générale consiste à utiliser l'appareil de mesure sur un étalon, et à vérifier que la mesure produite correspond bien à la valeur attendue ; si ce n'est pas le cas, on corrige le réglage de l'appareil. Par exemple, on pèse une masse étalon, et on corrige la position de l'aiguille pour que celle-ci indique la valeur correcte. C'est l'étalonnage dit à un point.

Cependant, cela ne suffit pas toujours. L'appareil peut présenter :

- Une dérive systématique: il indique systématiquement une valeur supérieure ou inférieure d'une quantité fixe ;
- Une dérive de sensibilité: il indique systématiquement une valeur supérieure ou inférieure d'une proportion (d'un pourcentage) donné.

Chaque mesure étant entachée d'erreur, y compris la mesure des étalons, on effectue en général plusieurs mesure du même étalon, ou bien on utilise plus d'étalons que nécessaire et l'on détermine la courbe d'étalonnage par régression (méthode des moindres carrés).

L'étalonnage est généralement effectué par le fabricant de l'appareil de mesure (correction du capteur ou du  $\mu\text{C}$ ).

# L'étalonnage des capteurs et sondes

La justesse de l'instrument de mesure est l'aptitude de l'instrument à fournir la vraie valeur de la grandeur physique.

Lorsque le mesurage d'une même valeur (inconnue) du mesurande a été répété  $n$  fois, donnant les résultats :  $m_1$  ,  $m_2$  ...  $m_n$  , la valeur moyenne (ou  $\langle m \rangle$ ) est par définition :

$$\langle m \rangle = \bar{m} = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{n}$$

Une indication de la dispersion de ces résultats est donnée par l'écart type  $\sigma$  (*sigma*) :

$$\sigma = \sqrt{\frac{(m_1 - \bar{m})^2 + (m_2 - \bar{m})^2 + \dots + (m_n - \bar{m})^2}{n - 1}}$$

La justesse est l'écart entre la valeur moyenne et la valeur vraie :

$$J = \langle m \rangle - m_{\text{vrai}}$$

Ou encore, en pourcentage, obtenue par la relation :

$$e_{\%} = \left[ 1 - \frac{|valeur\ vraie - valeur\ mesurée|}{|valeur\ vraie|} \right] \times 100$$

# Sensibilité en régime statique

La définition générale de la sensibilité conduit à définir la sensibilité en régime statique, en un point de fonctionnement  $Q_i$ , comme le rapport de l'incrément  $\Delta s$  (sensibilité) à l'incrément  $\Delta m$  (mesurande) qui le provoque : la sensibilité en régime statique est donc égale à la pente de la caractéristique statique au point de fonctionnement ; lorsque cette caractéristique n'est pas une droite, la sensibilité dépend du point de fonctionnement.

Ainsi par exemple, pour une résistance de platine de  $100 \Omega$  à  $0^\circ\text{C}$ , la variation en fonction de  $T$  est approximativement linéaire pour  $T$  compris entre  $0^\circ\text{C}$  et  $150^\circ\text{C}$  et l'on a :

– à  $0^\circ\text{C}$  :  $S = 0,39 \Omega/^\circ\text{C}$  et à  $130^\circ\text{C}$  :  $S = 0,38 \Omega/^\circ\text{C}$ .

alors que pour une thermistance 35J3 (fabricant OMEGA) de  $5\,000 \Omega$  à  $25^\circ\text{C}$  dont la variation thermique est fortement non linéaire on a :

– à  $0^\circ\text{C}$  :  $S = 835 \Omega/^\circ\text{C}$  et à  $130^\circ\text{C}$  :  $S = 3,8 \Omega/^\circ\text{C}$ .

Le rapport de la valeur  $s_i$  de la sortie à celle,  $m_i$  du mesurande correspondant est défini comme le rapport de transfert statique  $r_i$  :

$$r_i = \left( \frac{s}{m} \right)_{Q_i}$$

Exemple : Le capteur de température LM35 a une sensibilité de  $10\text{mV} / ^\circ\text{C}$ .

# La fidélité

La **fidélité** est la qualité d'un appareillage de mesure dont les erreurs accidentelles sont faibles : elle se traduit par des résultats de mesurage groupés autour de leur valeur moyenne.

L'écart type dont l'importance reflète la dispersion des résultats est souvent considéré comme l'erreur de fidélité : il permet ainsi une appréciation quantitative de la fidélité.

La valeur du mesurande la plus probable telle qu'elle résulte d'un ensemble de mesures peut être connue avec une faible marge d'incertitude tout en étant éloignée de la valeur vraie du mesurande si des erreurs systématiques importantes se sont superposées aux erreurs accidentelles.

Exemple : des mesures répétées à l'aide d'un voltmètre donnent :

$$U_{\max} = 100,2\text{V} \text{ et } U_{\min} = 99,7\text{V}$$

$$\rightarrow F = \pm \frac{100,2 - 99,7}{2} = \pm \frac{0,5}{2} = \pm 0,25 \text{ V}$$

Un appareil est exact s'il est à la fois juste et fidèle.

# La justesse et la fidélité



haute fidélité  
basse justesse



haute justesse  
basse fidélité



haute exactitude

Un appareil est exact s'il est à la fois juste et fidèle.

# La précision

La précision d'une mesure est l'accord (ou la différence) entre le résultat d'une mesure et la vraie valeur du mesurande (la valeur du mesurande n'est en général pas exactement connue).

# La répétabilité

Une mesure est répétable lorsque l'on vérifie la proximité de l'accord entre les résultats des mesures successives du même mesurande, effectuées dans les mêmes conditions de mesure:

- même procédé de mesure,
- même observateur,
- même instrument de mesure, utilisé dans les mêmes conditions
- même emplacement,
- répétition sur une courte période de temps.

La dispersion des résultats permet de quantifier la répétabilité.

# Exercices

## Exercice 1 :

On donne les relations suivantes :

$$A = \frac{(d\Phi/dt)}{I} \quad B = 0,5 \cdot \varepsilon \cdot E^2 \cdot S \cdot L \quad C = f \cdot v \cdot \cos \alpha$$

$\Phi$  est le flux magnétique ;  $I$  est l'intensité de courant électrique,  $d/dt$  est la dérivée par rapport au temps.

$E$  est le le champ électrique ;  $S$  est la surface ;  $L$  est la longueur et  $\varepsilon$  est la permittivité

$f$  est la force ;  $v$  est la vitesse ;  $\alpha$  est l'angle entre les vecteur  $f$  et  $v$

=> Déterminez la dimension (exprimer en fonctions des dimensions fondamentales) et l'unité de A, B et C. De quelles grandeurs s'agit-il ? Justifiez vos réponses

## Exercice 2 :

- À combien de Joule correspond une énergie d'un électron-volt (eV) ?
- À combien de kg/m<sup>3</sup> correspond une concentration de 20g/l ?
- À quelle variation de pression correspond une augmentation de 3dB d'une puissance sonore ?
- À quelle variation de tension électrique aux bornes d'une résistance correspond une augmentation de 2dB d'une puissance électrique dissipée par effet Joule ?

## Exercice 3 :

Un étudiant a obtenu les notes suivantes : 13/20, 12/20, 11/20, 12/20 et en robotique, 5/20

Calculez sa moyenne et son écart-type.

# Exercices

## Exercice 4 : Sensibilité d'un capteur Pt100

Un capteur à résistance de platine Pt100 est branché aux bornes d'un voltmètre. La mesure de résistance permet de déterminer la température du milieu dans lequel on insère le capteur. La relation entre la résistance et la température du capteur est la suivante :

$$T = 2,597R - 259,7$$

- 1) Citer les unités de chaque terme de l'équation.
- 2) Exprimer la température  $T_1$  pour une résistance  $R_1$  puis la température  $T_2$  pour une résistance  $R_2$ .
- 3) En déduire l'expression de  $\Delta T = T_2 - T_1$  en fonction de  $\Delta R = R_2 - R_1$ .
- 4) Déterminer la sensibilité du capteur correspondant à la variation de résistance  $\Delta R$  varie de  $1^\circ\text{C}$  et déterminer une relation simple entre la sensibilité et le coefficient directeur.