

Métrologie

1. Généralités sur la mesure	3
1.1. Définitions.....	3
1.2. Le système d'unités internationales et ses symboles.....	3
1.3. Formation des multiples et sous multiples des unités.....	6
1.4. Modélisation des relations entre unités physiques.....	7
1.4.1. Présentation.....	7
1.4.2. Schématisation.....	7
1.4.3. Relation de transitivité.....	7
1.4.4. Exemples.....	8
a. Capteur 4-20 mA.....	8
b. Débit - Pression.....	8
1.5. Autres unités employées.....	8
a. Distances :.....	8
b. Volume :.....	8
c. Masse :.....	8
d. Puissance :.....	8
e. Divers.....	9
2. Métrologie et qualité	9
2.1. Les problèmes de certification qualité.....	9
2.2. L'organisation d'une chaîne d'étalonnage.....	9
a. Étalon primaire :.....	10
b. Étalon de référence :.....	10
c. Étalon de transfert :.....	10
d. Étalon de travail :.....	10
2.3. Rappels sur les normes qualités I.S.O. 9000.....	11
a. l'ISO-9000.....	11
b. l'ISO-9001.....	11
c. l'ISO-9002.....	11
d. l'ISO-9003.....	11
e. l'ISO-9004.....	11
2.4. Les différentes erreurs possibles.....	11
a. Les erreurs systématiques :.....	11
b. Les erreurs aléatoires :.....	11
c. Les erreurs accidentelles :.....	11
2.5. Les types d'erreurs classiques.....	12
a. L'erreur de zéro (offset).....	12
b. L'erreur d'échelle (gain).....	12
c. L'erreur de linéarité.....	12
d. L'erreur due au phénomène d'hystérésis.....	13
e. L'erreur de mobilité.....	13
3. Chaîne de mesure : ses caractéristiques	13
3.1. Principe d'une chaîne de mesure.....	13
a. Un capteur.....	13
b. Un conditionneur.....	13

c. Une unité de visualisation.....	14
3.2. Gamme de mesure - Étendue de mesure.....	14
3.3. Rangeabilité.....	14
3.4. Courbe d'étalonnage.....	14
3.5. Sensibilité.....	15
3.6. Classe de précision.....	15
3.7. Résolution.....	15
3.8. Finesse.....	15
3.9. Rapidité, temps de réponse.....	15
3.10. Bande passante.....	16
3.11. Grandeur d'influence et compensation.....	16
3.12. Traitement statistique des mesures.....	16
3.13. Fidélité, justesse, précision.....	18
3.14. Propagation des erreurs.....	19
a. Les produits	19
b. Les quotients	19
c. Les sommes.....	19
d. Les soustractions	19
Figure 1: Mesure (x) et erreur (e).....	3
Figure 2: Relation entre grandeurs physiques.....	7
Figure 3: Relation courant-pression d'un transmetteur de pression 4-20 mA.....	8
Figure 4: Relation Pression - Débit.....	8
Figure 5: Erreur de zéro.....	12
Figure 6: Erreur d'échelle.....	12
Figure 7: Erreur de linéarité.....	12
Figure 8: Erreur d'hystérésis.....	13
Figure 9: Erreur de mobilité.....	13
Figure 10: Chaîne de mesure.....	13
Figure 11: Gamme et étendue de mesure.....	14
Figure 12: Temps de réponse.....	15
Figure 13: Gaussienne.....	17
Figure 14: Fidélité.....	18
Figure 15: Justesse.....	18
Figure 16: Précision.....	18

1. Généralités sur la mesure

1.1. Définitions

Le mesurage : C'est l'ensemble des opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur physique.

La mesurande : La grandeur physique particulière soumise à mesurage.

La mesure (x) : C'est l'évaluation d'une grandeur par comparaison avec une autre grandeur de même nature prise pour unité.

- Exemple : 2 mètres, 400 grammes, 6 secondes.

Remarque : On ne peut pas mesurer des grammes avec des mètres, ce n'est pas **Homogène**.

La grandeur (X) : Paramètre qui doit être contrôlé lors de l'élaboration d'un produit ou de son transfert.

- Exemple : pression, température, niveau.

L'incertitude (dx) : Le résultat de la mesure (x) d'une grandeur (X) n'est pas complètement défini par un seul nombre. Il faut au moins la caractériser par un couple (x, dx) et une unité de mesure. dx est l'incertitude sur x. Les incertitudes proviennent des différentes erreurs liées à la mesure.

- Ainsi, on a : $x-dx < X < x+dx$
- Exemple : 3 cm \pm 10%, ou 5 m \pm 1 cm.

Erreur absolue (e) : C'est le résultat d'un mesurage moins valeur vraie du mesurande. Une erreur absolue s'exprime dans l'unité de la mesure.

- $e = x - X$;
- Exemple : Une erreur de 10 cm sur une mesure de distance.



Figure 1 : Mesure (x) et erreur (e).

Erreur relative (er) : C'est le rapport de l'erreur de mesure à la valeur vraie de mesurande. Une erreur relative s'exprime généralement en pourcentage de la grandeur mesurée.

- $er = e/X$;
- $er\% = 100 er$.

Exemple : Une erreur de 10 % sur une mesure de distance (10 % de la distance réelle).

1.2. Le système d'unités internationales et ses symboles

Grandeur		Unité	
Nom	Symbole	Nom	Symbole
Unités de base			
Longueur	l	mètre	m
Masse	m	kilogramme	kg
Temps	t	seconde	s
Courant électrique	i	ampère	A
Température	T	kelvin	K
Quantité de matière		mole	mol
Intensité lumineuse	I	candela	cd
Unités de complémentaires			
Angle plan		radian	rad
Angle solide		stéradian	Sr
Unités dérivées			
Aire ou superficie	A, S	mètre carré	m ²
Volume	V	mètre cube	m ³
Fréquence	f	hertz	Hz
Vitesse	v	metre par seconde	m/s
Force	F	newton	N
Moment d'une force	M	Newton mètre	Nm
Viscosité dynamique	η	Poiseuille	Pi
Tension - ddp	U	Volt	V
Force électromotrice	E	Volt	V
Résistance électrique	R	Ohm	Ω
Capacité	C	Farad	F
Permittivité	ϵ	Farad par mètre	F/m
Perméabilité	μ	Henry par mètre	H/m

Champs électrique	E	Volt par mètre	V/m
Flux lumineux	Φ	Lumen	lm
Eclairement	E	Lux	lx
Longueur d'onde	λ	mètre	m
Quant. de rayonnement		roentgen	R
Vitesse angulaire	ω	radian par seconde	rad/s
Accélération	g	mètre par seconde ²	m/s ²
Accélération angulaire	α	radian par seconde	rad/s ²
Energie - Travail	W	Joule	J
Puissance	P	Watt	W
Pression - Contrainte	P	Pascal	Pa
Quantité de chaleur	Q	Joule	J
Quantité d'électricité	Q	Coulomb	C
Energie	W	Joule	J
Puissance active	P	Watt	W
Puissance apparente	W	Joule	J
Puissance réactive	Q	Volt Ampère Réactif	VAR
Inductance	L	Henry	H
Champ magnétique	H	Ampère par mètre	A/m
Induction magnétique	B	Tesla	T
Flux d'induction	Φ	weber	Wb
Luminence	L	Candela par m ²	Cd/m ²
Transmission		Décibel	dB
Activité nucléaire	A	Curie	Bq

1.3. Formation des multiples et sous multiples des unités

10^{24}	Yotta	Y
10^{21}	Zetta	Z
10^{18}	Exa	E
10^{15}	Peta	P
10^{12}	Tera	T
10^9	Giga	G
10^6	Mega	M
10^3	Kilo	K
10^2	hecto	h
10	deca	da
10^{-1}	déci	d
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	milli	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p
10^{-15}	femto	f
10^{-18}	atto	a
10^{-21}	zepto	z
10^{-24}	yocto	y

1.4. Modélisation des relations entre unités physiques

1.4.1. Présentation

On se propose de représenter de manière graphique les relations entre deux unités physiques. Cette représentation s'applique aux relations :

- De type affine : $Y = aX+b$;
- De type racine : $Y = k\sqrt{X}$;
- De type puissance : $Y = X^n$.

1.4.2. Schématisation

Sur la même échelle, on représente de chaque coté, les valeurs des grandeurs physiques qui sont liées. L'unité de chaque grandeur est précisée en bord d'échelle. On précisera le type de relation sur la partie de l'échelle correspondante.

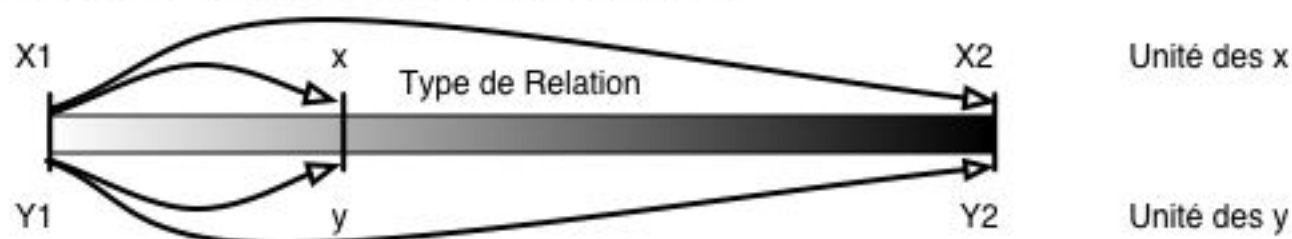


Figure 2 : Relation entre grandeurs physiques

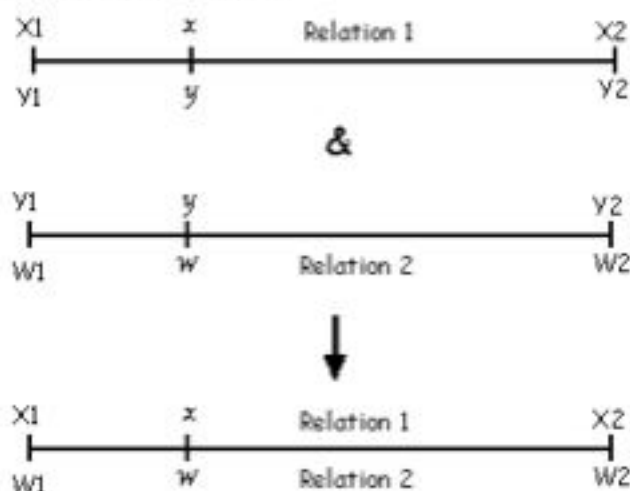
D'une manière générale, on respectera les notations suivantes :

Type de relation	Représentation
Linéaire	Aucune
Racine	$\sqrt{\quad}$
Puissance	$\hat{\quad}^n$

On peut écrire la relation :

$$\frac{y - Y1}{Y2 - Y1} = \text{Relation}\left(\frac{x - X1}{X2 - X1}\right)$$

1.4.3. Relation de transitivité



1.4.4. Exemples

a. Capteur 4-20 mA

Un transmetteur de pression 4-20 mA avec une étendue de mesure égale à P_{\max} et un décalage de zéro nul.

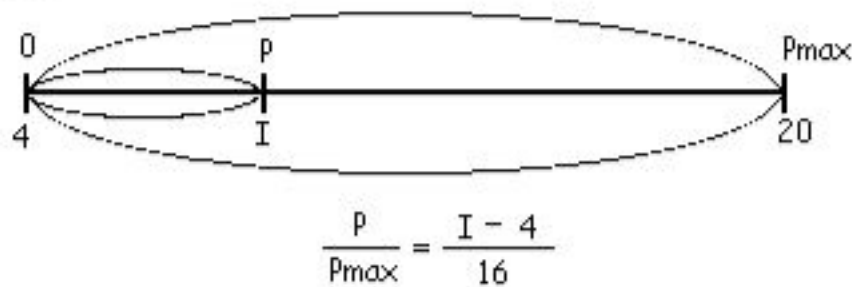


Figure 3 : Relation courant-pression d'un transmetteur de pression 4-20 mA

b. Débit - Pression

Souvent, le débit Q est proportionnelle à la racine carrée d'une pression P .

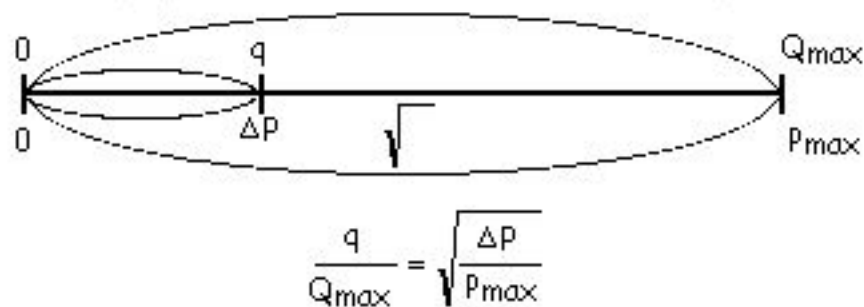


Figure 4 : Relation Pression - Débit

1.5. Autres unités employées

a. Distances :

- pouce (inch) : 1 in = 2,54 cm
- pied (foot) : 1 ft = 12 in = 30,48 cm
- mile (miles) = 5280 ft = 1,609 km

b. Volume :



- pinte (pint) = 0,94 l
- gallon (US gallon) : 1 USgal = 4 pintes = 3,786 l
- baril (US barrel) : 1 bbi = 42 USgal = 159 l
- 1 m³ = 1000 l ;

c. Masse :

- once (ounce) : 1 oz = 28,35 g
- livre (pound) : 1 lb = 0,454 kg

d. Puissance :

- cheval vapeur (horsepower) : 1 hp = 0,736 kW = 1 CV

Diffusion de la métrologie		
Étalon de référence	Centre d'Étalonnage agréé (CETA)	Laboratoire ou organisme public délivrant des certificats officiels d'étalonnage : <ul style="list-style-type: none"> • Raccordement des références des utilisateurs aux étalons nationaux, • Conseil, formation et assistance technique.
Étalon de transfert		
Étalon de référence	Services de Métrologie Habilités (SMH)	Laboratoire d'une société ou d'un organisme dont le potentiel technique est reconnu officiellement par le COFRAC Section Étalonnage : <ul style="list-style-type: none"> • Étalonnage des étalons de référence et des instruments de mesure, • Conseil, formation et assistance technique.
Étalon de transfert		
Étalon de référence	Entreprise ou service	Chaîne d'étalonnage dans l'entreprise ou le service (si l'entreprise est elle-même SMH, la chaîne est simplifiée).
Étalon de travail		

On définit plusieurs types d'étalons :

- a. **Étalon primaire** : Étalon qui est désigné ou largement reconnu comme présentant les plus hautes qualités métrologiques et dont la valeur est établie sans se référer à d'autres étalons de la même grandeur.
- b. **Étalon de référence** : Étalon, en général de la plus haute qualité métrologique disponible en un lieu donné ou dans une organisation donnée, dont dérivent les mesurages qui y sont faits.
- c. **Étalon de transfert** : Étalon utilisé comme intermédiaire pour comparer entre eux des étalons.
- d. **Étalon de travail** : Étalon qui est utilisé couramment pour étalonner ou contrôler des mesures matérialisées, des appareils de mesure ou des matériaux de référence.

Note :

- Le terme dispositif de transfert doit être utilisé lorsque l'intermédiaire n'est pas un étalon.
- Un étalon de travail est habituellement étalonné par rapport à un étalon de référence.
- Un étalon de travail utilisé couramment pour s'assurer que les mesures sont effectuées correctement est appelé étalon de contrôle.

2.3. Rappels sur les normes qualités I.S.O. 9000

Dans le domaine de la gestion intégrale de la qualité, on distingue 5 normes ISO différentes :

a. **L'ISO-9000** n'est pas une norme au sens strict du terme; elle définit, en fait, un cadre général et donne les lignes directrices pour la sélection et l'utilisation des autres normes dont elle fournit une brève description :

b. **L'ISO-9001** présente un modèle d'assurance-qualité en conception, développement, production, installation et prestations associées. Cette norme est la plus poussée des norme ISO-9000 et fournit un modèle total :

c. **L'ISO-9002** régit la production, l'installation et les prestations associées ; cette certification est visée surtout par les entreprises qui ne développent pas de produits et de service à la clientèle :

d. **L'ISO-9003** offre un modèle d'assurance-qualité en contrôle et essais finals ; cette certification fournit la preuve officielle que le contrôle final et les essais finals ont été correctement effectués :

e. **L'ISO-9004** fournit aux entreprises des directives pour mettre en place un système de gestion de la qualité; cette norme correspond en fait à un manuel détaillé.

En résumé, trois normes contiennent des modèles d'application (9001, 9002 et 9003) tandis que les normes 9000 et 9004 servent plutôt de guide à l'application des trois autres normes. Elles offrent une bonne base pour se faire une idée de la gestion intégrale de la qualité.

2.4. Les différentes erreurs possibles

a. **Les erreurs systématiques** : Ce sont des erreurs reproductibles reliées à leur cause par une loi physique, donc susceptible d'être éliminées par des corrections convenables.

b. **Les erreurs aléatoires** : Ce sont des erreurs, non reproductibles, qui obéissent à des lois statistiques.

c. **Les erreurs accidentelles** : Elles résultent d'une fausse manoeuvre, d'un mauvais emploi ou de dysfonctionnement de l'appareil. Elles ne sont généralement pas prises en compte dans la détermination de la mesure.

2.5. Les types d'erreurs classiques

a. L'erreur de zéro (offset)

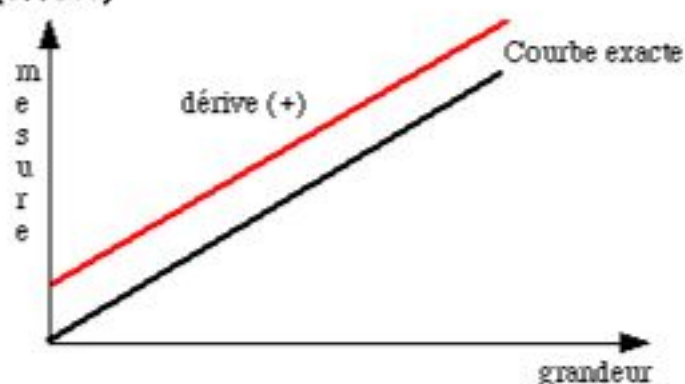


Figure 5 : Erreur de zéro

Erreur de zéro = Valeur de x quand X = 0.

b. L'erreur d'échelle (gain)

C'est une erreur qui dépend de façon linéaire de la grandeur mesurée.

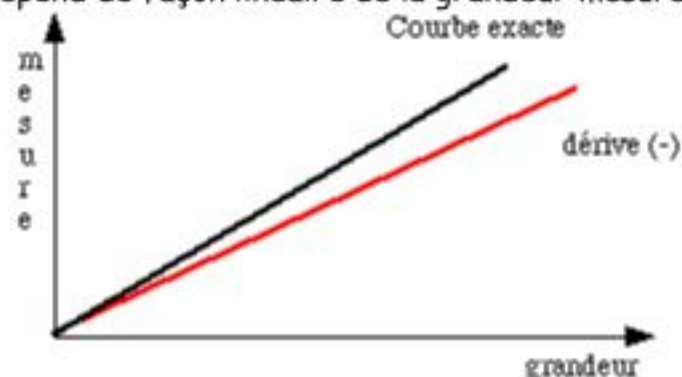


Figure 6 : Erreur d'échelle

Erreur de gain (dB) = $20 \log(\Delta x / \Delta X)$

c. L'erreur de linéarité

La caractéristique n'est pas une droite.

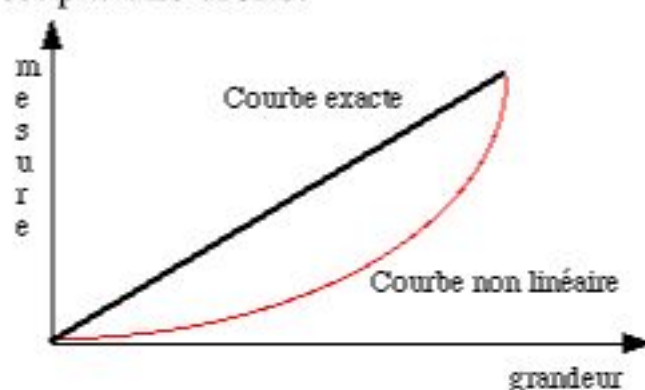


Figure 7 : Erreur de linéarité

d. L'erreur due au phénomène d'hystérésis

Il y a phénomène d'hystérésis lorsque le résultat de la mesure dépend de la précédente mesure.

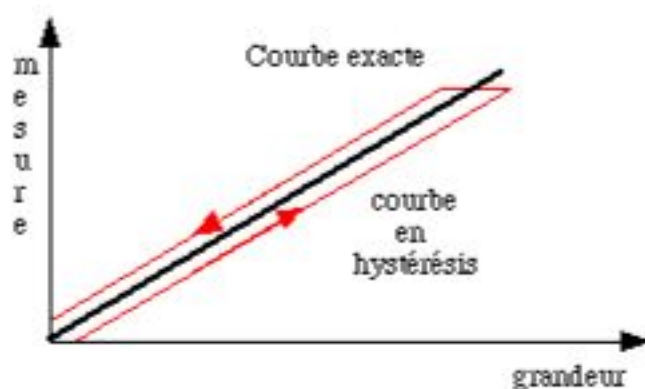


Figure 8 : Erreur d'hystérésis

e. L'erreur de mobilité

La caractéristique est en escalier, cette erreur est souvent due à une numérisation du signal.



Figure 9 : Erreur de mobilité

3. Chaîne de mesure : ses caractéristiques

3.1. Principe d'une chaîne de mesure



Figure 10 : Chaîne de mesure

La structure de base d'une chaîne de mesure comprend au minimum trois étages :

- Un capteur** sensible aux variations d'une grandeur physique et qui, à partir de ces variations, délivre un signal.
- Un conditionneur** de signaux dont le rôle principal est l'amplification du signal délivré par le capteur pour lui donner un niveau compatible avec l'unité de visualisation ou d'utilisation ; cet étage peut parfois intégrer un filtre qui réduit les perturbations présentes sur le signal.

c. **Une unité de visualisation** et/ou d'utilisation qui permet de lire la valeur de la grandeur et/ou de l'exploiter dans le cas d'un asservissement, par exemple.

Cette structure de base se rencontre dans toutes les chaînes de mesure et ce, quelle que soit leur complexité et leur nature.

De nos jours, compte tenu des possibilités offertes par l'électronique et l'informatique, les capteurs délivrent un signal électrique et la quasi-totalité des chaînes de mesure sont des chaînes électroniques.

3.2. Gamme de mesure - Étendue de mesure

La gamme de mesure, c'est l'ensemble des valeurs du mesurande pour lesquelles un instrument de mesure est supposée fournir une mesure correcte.

L'étendue de mesure correspond à la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale de la gamme de mesure.

Pour les appareils à gamme de mesure réglable, la valeur maximale de l'étendue de mesure est appelée pleine échelle.

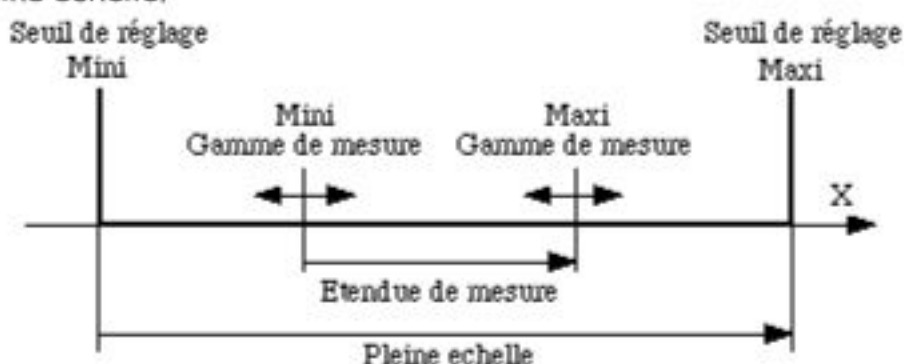


Figure 11 : Gamme et étendue de mesure

Remarque : lorsqu'un appareil indicateur possède un cadran gradué en unités de la grandeur à mesurer, son étendue de mesure n'est pas toujours confondue avec l'étendue de graduation.

Exemple : Appareil de pesage, étendu de la graduation (0, 2 kg), étendu de la mesure (150 g, 2000 g).

3.3. Rangeabilité

On définit la rangeabilité par le rapport minimum entre l'étendue de mesure et la pleine échelle.

$$\text{Rangeabilité} = \frac{\text{Étendue de mesure minimale}}{\text{Pleine échelle}}$$

3.4. Courbe d'étalonnage

Elle est propre à chaque appareil. Elle permet de transformer la mesure brute en mesure corrigée. Elle est obtenue en soumettant l'instrument à une valeur vraie de la grandeur à mesurer, fournie par un appareil étalon, et en lisant avec précision la mesure brute qu'il donne.

3.5. Sensibilité

Soit X la grandeur à mesurer, x l'indication ou le signal fourni par l'appareil. À toutes valeurs de X , appartenant à l'étendue de mesure, correspond une valeur de x .

$$x = f(X)$$

La sensibilité autour d'une valeur de X est le quotient m : $m = dx/dX$

Si la fonction est linéaire, la sensibilité de l'appareil est constante ; $m = \Delta x/\Delta X$

Lorsque x et X sont de même nature, m qui est alors sans dimension peut être appelé gain. Il s'exprime généralement en dB.

$$\text{gain (en dB)} = 20 \log (m)$$

3.6. Classe de précision

La classe d'un appareil de mesure correspond à la valeur en % du rapport entre la plus grande erreur possible sur l'étendue de mesure.

$$\text{Classe} = 100 \times (\text{La plus grande erreur possible}) / (\text{Etendue de mesure})$$

3.7. Résolution

Lorsque l'appareil de mesure est un appareil numérique, on définit la résolution par la formule suivante :

$$\text{Résolution} = (\text{Etendue de mesure}) / (\text{Nombre de points de mesure})$$

3.8. Finesse

Elle qualifie l'incidence de l'instrument de mesure sur le phénomène mesuré. Elle est grande lorsque l'appareil perturbe très peu la grandeur à mesurer.

3.9. Rapidité, temps de réponse

C'est l'aptitude d'un instrument à suivre les variations de la grandeur à mesurer. Dans le cas d'un échelon de la grandeur entraînant la croissance de la mesure on définit :

Le temps de réponse à $\pm 10\%$, c'est le temps nécessaire pour que la mesure croisse, à partir de sa valeur initiale jusqu'à rester entre 90 % et 110 % de sa variation totale.

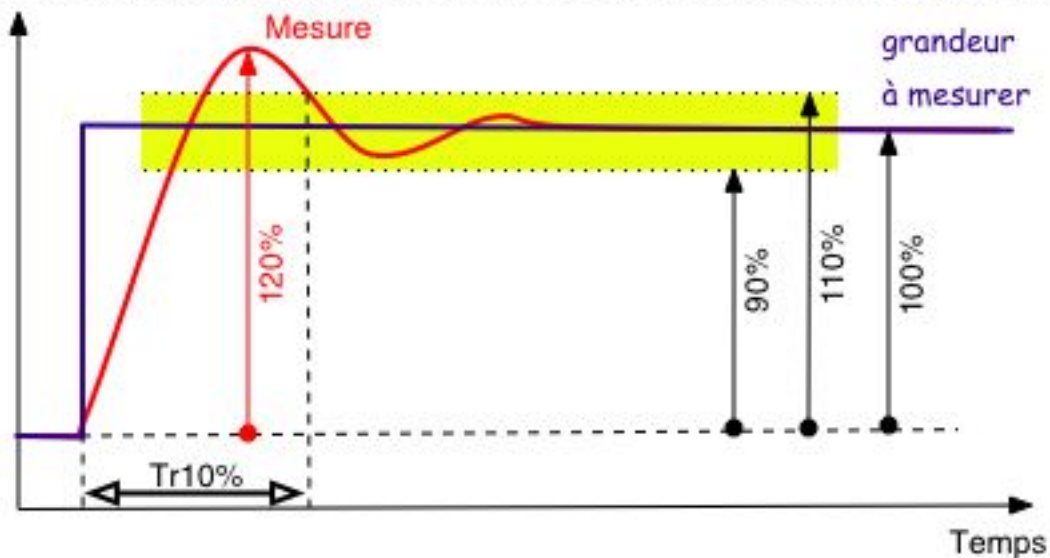
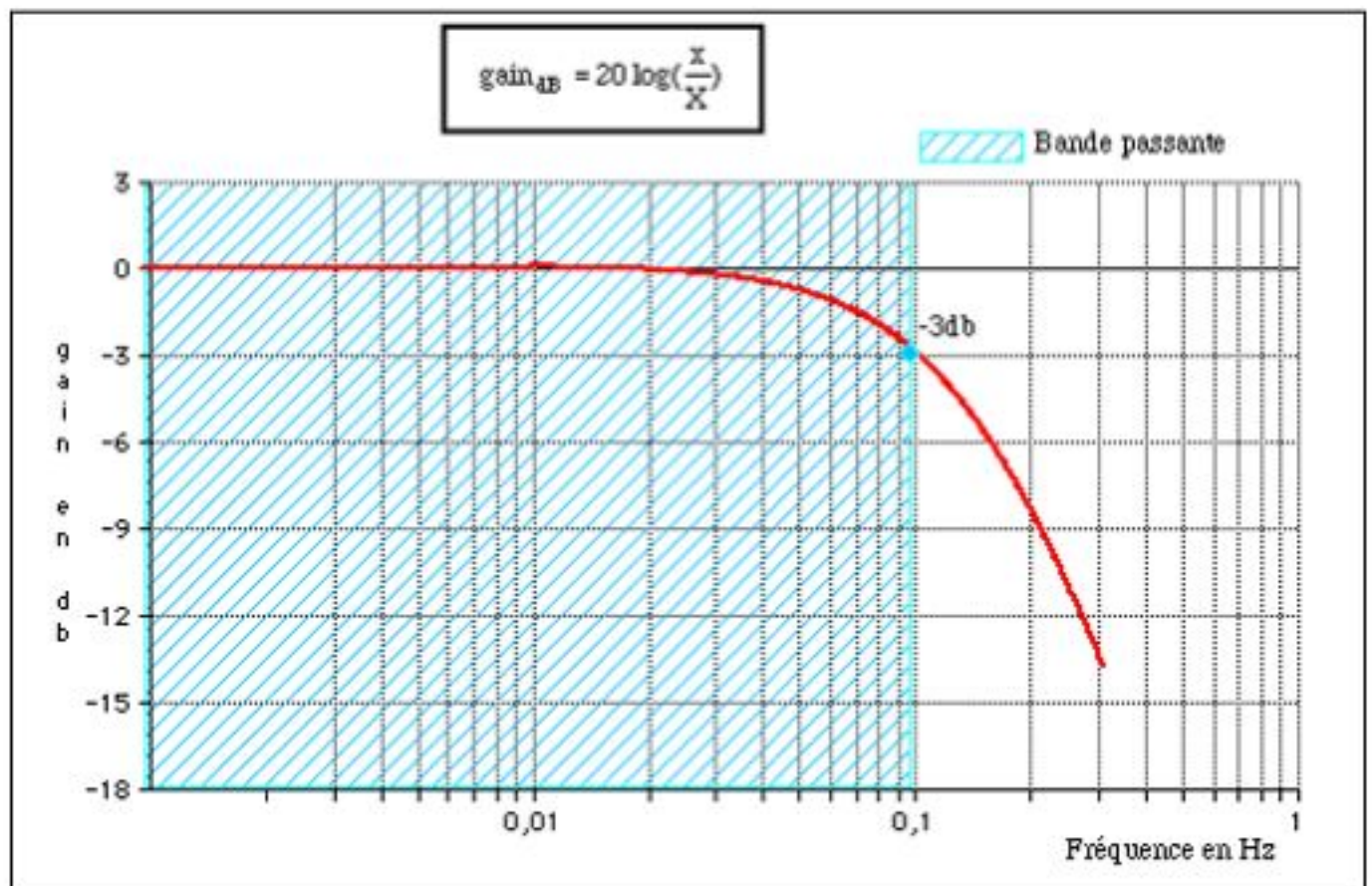


Figure 12 : Temps de réponse

3.10. Bande passante

La bande passante est la bande de fréquence pour laquelle le gain du capteur est compris entre deux valeurs. Le gain du capteur est le rapport x/X généralement exprimé en dB.



Remarques :

- Par convention, le signal continu a une fréquence nulle.
- Dans le cas ci-dessus on peut estimer le temps de réponse par la formule : $T = 0,16/F_{max}$, avec $F_{max} = 0,1$ Hz.

3.11. Grandeur d'influence et compensation

On appelle grandeur d'influence, toutes les grandeurs physiques autres que la grandeur à mesurer, susceptibles de perturber la mesure. Généralement les capteurs industriels sont compensés, un dispositif interne au capteur limite l'influence des grandeurs perturbatrices.

La température est la grandeur d'influence qui est le plus souvent rencontrée.

3.12. Traitement statistique des mesures

Les erreurs entraînent une dispersion des résultats lors de mesures répétées. Leur traitement statistique permet :

- de connaître la valeur la plus probable de la grandeur mesurée,
- de fixer les limites de l'incertitude.

Lorsque la mesure d'une même grandeur X a été répétée n fois, donnant les résultats : x_1, x_2, \dots, x_n , la valeur moyenne est définie par :

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Une indication de la dispersion de ces résultats est donnée par l'écart-type :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Lorsque les erreurs accidentelles affectant les différentes mesures sont indépendantes, la probabilité d'apparition des différents résultats satisfait habituellement à la loi normale dite encore loi de Gauss :

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma^2}\right)$$

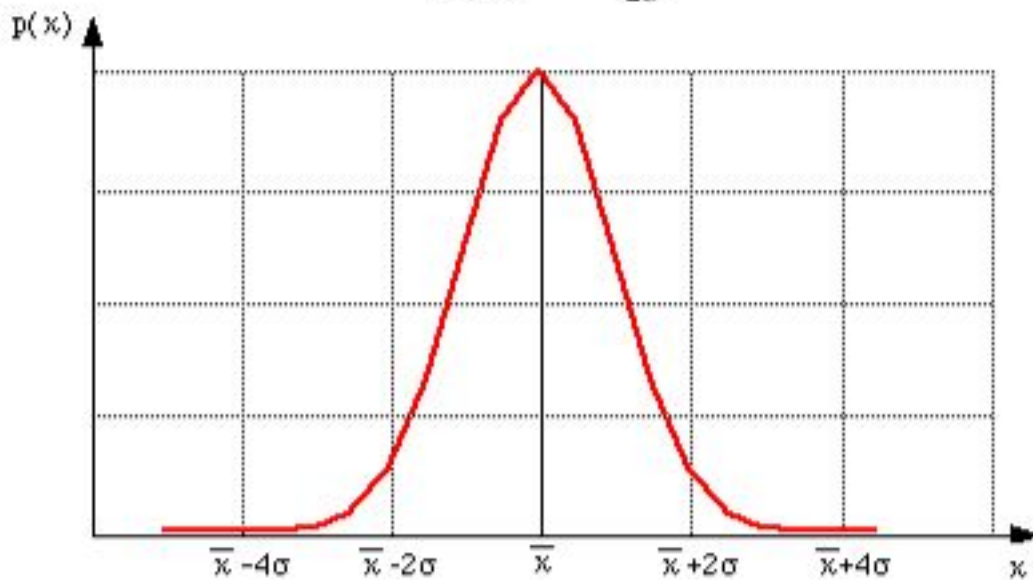


Figure 13 : Gaussienne

- La valeur la plus probable est la valeur moyenne des mesures.
- En général on prend une incertitude égale à 3 fois l'écart-type.

3.13. Fidélité, justesse, précision

La fidélité est la qualité d'un appareillage de mesure dont les erreurs sont faibles. L'écart-type est souvent considéré comme l'erreur de fidélité.

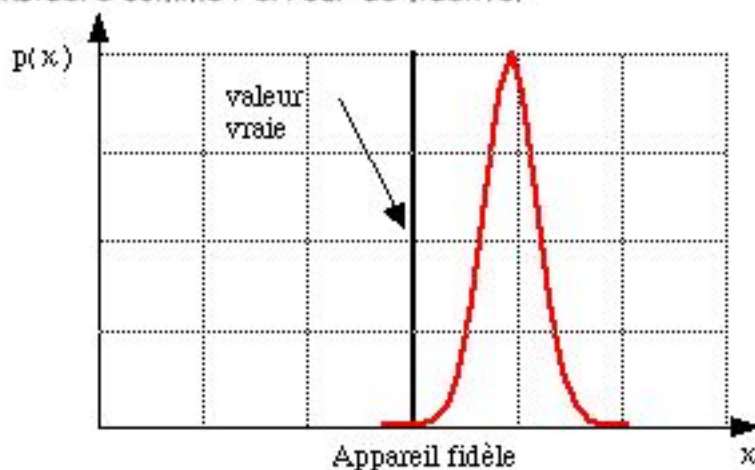


Figure 14 : Fidélité

Un instrument est d'autant plus juste que la valeur moyenne est proche de la valeur vraie.

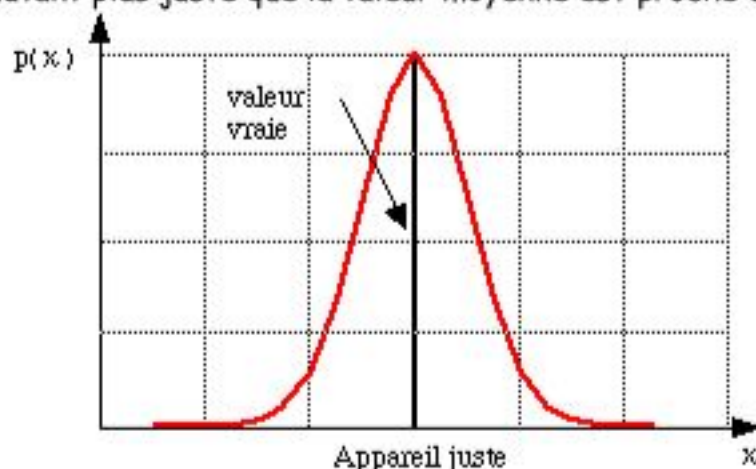


Figure 15 : Justesse

Un appareil précis est à la fois fidèle et juste.

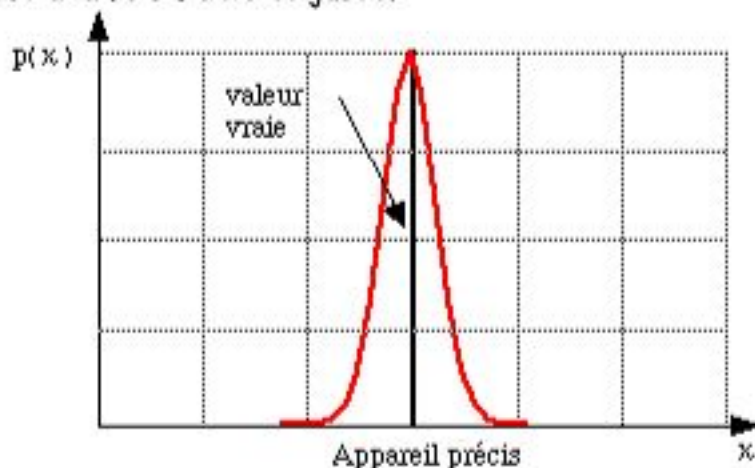


Figure 16 : Précision

En pratique, la précision est une donnée qui fixe globalement l'erreur maximum (en + ou en -) pouvant être commise lors d'une mesure. Elle est généralement exprimée en % de l'étendue de mesure.

Remarque : C'est aux valeurs maximales de l'échelle que l'appareil est le plus précis en valeur relative.

3.14. Propagation des erreurs

a. Les produits

La grandeur X s'obtient par la mesure de Y et Z. On a $X = YZ$. Y et Z sont des nombres positifs. La mesure de Y donne $y \pm dy$, la mesure de Z donne $z \pm dz$.

Ainsi, $(y-dy)(z-dz) < X < (y+dy)(z+dz)$.

$$(y-dy)(z-dz) = yz - ydz - zdy + dzdy = yz (1 - (dz/z + dy/y - dzdy/Yz))$$

$$(y+dy)(z+dz) = yz + ydz + zdy + dzdy = yz (1 + (dz/z + dy/y + dzdy/Yz))$$

Si l'on néglige les erreurs d'ordre 2 on a : $X = yz \pm yz (dz/z + dy/y) \Rightarrow dx/x = dz/z + dy/y$

Dans le cas d'un produit, les erreurs relatives s'ajoutent.

b. Les quotients

De la même manière, on démontre que dans le cas d'un quotient, les erreurs relatives s'ajoutent.

c. Les sommes

La grandeur X s'obtient par la mesure de Y et Z. On a $X = Y + Z$. X et Y sont des nombres positifs. La mesure de y donne $y \pm dy$, la mesure de Z donne $z \pm dz$.

Ainsi, $y-dy+z-dz < X < y+dy+z+dz$.

$$\text{On a } x = (y + z) \pm (dy+dz) \Rightarrow dx = dy + dz$$

Dans le cas d'une somme, les erreurs absolues s'ajoutent.

d. Les soustractions

De la même manière, on démontre que :

Dans le cas d'une soustraction, les erreurs absolues s'ajoutent.

Attention : Il faut éviter de soustraire des nombres de même ordre de grandeur.