

CHAP. I : MÉTROLOGIE

Cours

2006-2007

Table des matières

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	5
1.4	Modélisation des relations entre unités physiques	5
1.4.1	Présentation	5
1.4.2	Schématisation	5
1.4.3	Relation de transitivité	6
1.4.4	Capteur 4-20 mA	6
1.4.5	Débit - Pression	6
1.5	Autres unités employées	7
2	Métrologie et qualité	7
2.1	Les problèmes de certification qualité	7
2.2	L'organisation d'une chaîne d'étalonnage	8
2.3	Rappels sur les normes qualités I.S.O. 9000	9
2.4	Les différentes erreurs possibles	9
2.5	Les types d'erreurs classiques	9
3	Chaîne de mesure : ses caractéristiques	10
3.1	Principe d'une chaîne de mesure	10
3.2	Gamme de mesure - Étendue de mesure	10
3.3	Rangeabilité	11
3.4	Courbe d'étalonnage	11
3.5	Sensibilité	11
3.6	Classe de précision	12
3.7	Résolution	12
3.8	Finesse	12
3.9	Rapidité, temps de réponse	12
3.10	Bande passante	13
3.11	Grandeur d'influence et compensation	13
3.12	Traitement statistique des mesures	13
3.13	Fidélité, justesse, précision	14
4	Propagation des erreurs	15
4.1	Les produits	15
4.2	Les quotients	15
4.3	Les sommes	15
4.4	Les différences	15

Exercices	16
1 Indicateur de pression	16
2 Une unité de pression : le PSI	16
3 Étalonnage d'un capteur de pression	16
4 Capteur de pression	16
5 Transmetteur de pression (cerabar PMC 133)	17
6 Mesure de débit	17
7 Goutte à Goutte	17
8 Multimètre	17
9 Liaison 4-20 mA	17
10 Pince de courant	18
11 Réponse indicielle	18
12 Capteur de débit	18
 Évaluation - Année précédente	 20
Mesures de débits dans un réservoir	20
Transmetteur de pression différentielle	21
Transmetteur de pression (cerabar PMC 133)	21
Étalonnage	21
Réponse indicielle	22
 Table des figures	
1 Relation entre grandeurs physiques	6
2 Relation de transmittivité	6
3 Relation entre pression et courant d'un transmetteur de pression	6
4 Relation débit pression	7
5 Structure d'une chaîne de mesure	11
6 Echelle sur mesure	11
7 Réponse indicielle	12
8 Bande passante	13
9 Distribution de Gauss	14
10 Appareil fidèle	15
11 Appareil juste	15
12 Appareil précis	15

1 Généralités sur la mesure

1.1 Définitions

La grandeur physique (X) : Paramètre qui doit être contrôlé lors de l'élaboration d'un produit ou de son transfert. Exemple : pression, température, niveau.

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

La mesure (x) : C'est l'évaluation d'une grandeur par comparaison avec une autre grandeur de même nature prise pour unité. Exemple : Une longueur de 2 mètres, une masse de 400 grammes, un temps de 6 secondes.

Remarque : On ne peut pas mesurer une masse avec des mètres, ce n'est pas **homogène**.

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 : $3 \text{ cm} \pm 10\%$, ou $5m \pm 1cm$.

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

- $e = x - X$.

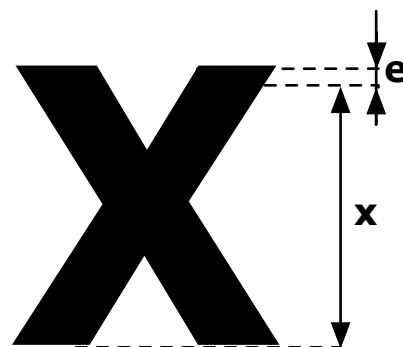
Exemple : Une erreur de 10 cm sur une mesure de distance.

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

- $er = e/X$;

- $er\% = 100 \times er$;

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

Tableau 1 – Unités de base

Grandeur		Unité	
Nom	Symbole	Nom	Symbole
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

Tableau 2 – Unités dérivées

Grandeur		Unité	
Nom	Symbole	Nom	Symbole
Aire ou superficie	S	mètre carré	m^2
Volume	V	mètre cube	m^3
Fréquence	f	hertz	Hz
Vitesse	v	mètre par seconde	m/s
Force	f	newton	N
Moment d'une force	M	Newton mètre	Nm
Viscosité dynamique	η	Poiseuille	Pi
Tension	U	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 carrée	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

Tableau 3 – Multiples et sous multiples

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	ν
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 : $Y = a \times X + b$;
- 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 (figure 1). L'unité de chaque grandeur est précisée en bord d'échelle. On précisera le type de relation sur la partie de l'échelle correspondante.

D'une manière générale, on respectera les notations du tableau 4.

Tableau 4 – Représentations des type de relations

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

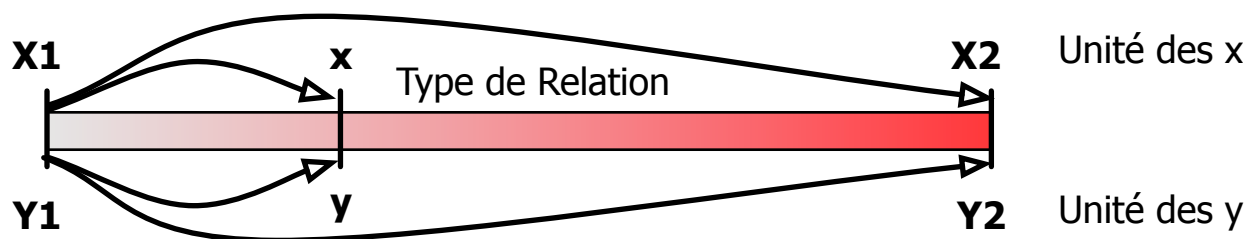


Figure 1 – Relation entre grandeurs physiques

On peut alors écrire la relation :

$$\frac{y - Y1}{Y2 - Y1} = \text{Relation}\left(\frac{x - X1}{X2 - X1}\right) \quad (1)$$

1.4.3 Relation de transitivité

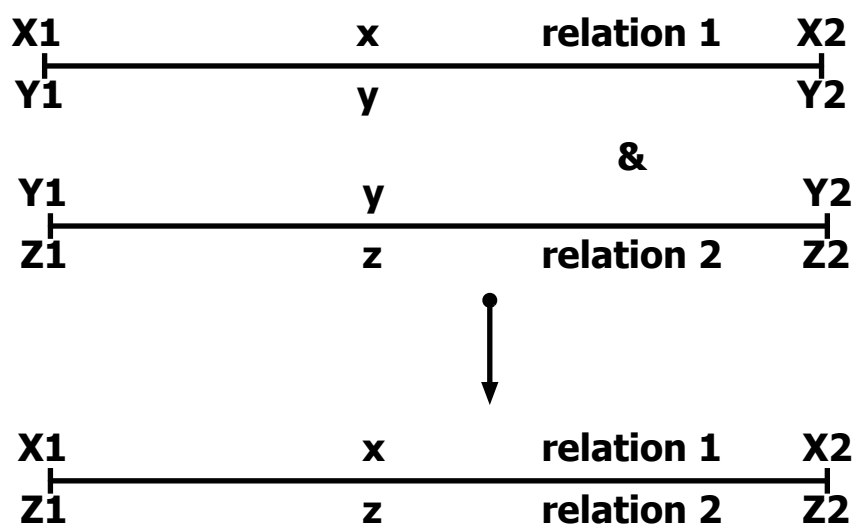


Figure 2 – Relation de transitivité

1.4.4 Capteur 4-20 mA

Un transmetteur de pression 4-20 mA avec une gamme de mesure de 0 à 5 bar fourni la relation représentée figure 3.

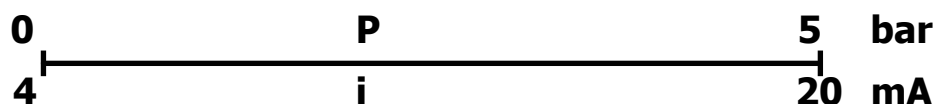


Figure 3 – Relation entre pression et courant d'un transmetteur de pression

1.4.5 Débit - Pression

Dans les capteurs de débit utilisant un organe déprimogène, le débit Q est proportionnel à la racine carrée de la différence de pression ΔP . On peut alors représenter la relation entre le débit et la différence de pression mesurée par la figure 4.

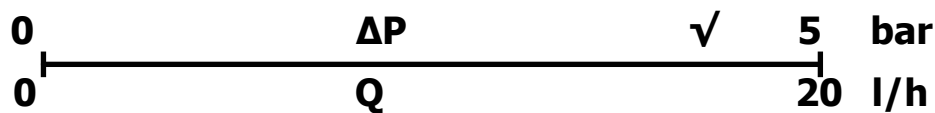


Figure 4 – Relation débit pression

1.5 Autres unités employées

Distances :

- pouce (inch) : 1 in = 2,54 cm
- pied (foot) : 1 ft = 12 in = 30,48 cm
- mile (miles) = 5280 ft = 1,609 km
- mille nautique (mn) = 1,852 km

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
- $1 m^3 = 1000 l$;
- $1 dm^3 = 1 l$;

Masse :

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

Puissance :

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

Divers :

- 1 ha = 10 000 m^2
- 1 h = 3600 s
- 1 nœud (kt) = 1,852 km/h

2 Métrologie et qualité

2.1 Les problèmes de certification qualité

L'un des points délicats de l'assurance de la qualité en métrologie est le choix de la traçabilité de la chaîne d'étalonnage, autrement dit, du raccordement du moyen de mesure à la chaîne d'étalonnage nationale. Le système national d'étalonnage mis en place pour assurer le raccordement des références et des instruments de mesure aux étalons nationaux est fondé sur des laboratoires officiellement accrédités par le COFRAC-Section Étalonnage.

Notes :

- La notion de raccordement recouvre l'étalonnage ou la vérification ; bien souvent il y a confusion entre ces deux mots. Or, ils ne couvrent pas la même notion et en pratique il est, le plus souvent, effectué une vérification.
- En pratique, le choix des modalités de raccordement est toujours délicat car la gamme des coûts induits est très étendue.

2.2 L'organisation d'une chaîne d'étalonnage

On définit plusieurs types d'étalons :

- **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.
- **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.
- **Étalon de transfert** : Étalon utilisé comme intermédiaire pour comparer entre eux des étalons.
- **Étalon de travail** : Étalon qui est utilisé couramment pour étalonner ou contrôler des mesures matérialisées, des appareils de mesure ou des matériaux de référence.

Remarque :

- 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.

Tableau 5 – Chaîne d'étalonnage

Conservation et amélioration des étalons		
Étalon national	Laboratoire National de métrologie	BUREAU NATIONAL DE MÉTROLOGIE (BNM) • Conservation et améliorations des étalons nationaux • Étalonnage des références des centres d'étalonnage agréés • Tutelle technique de la chaîne d'étalonnage
Étalon de transfert		
Diffusion de la métrologie		
Étalon de référence	Centre d'Étalonnage Agréer (CETA)	Laboratoire ou organisme public délivrant des certificats officiels d'étalonnage : • Raccordement des références 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 : • Étalonnage des étalons de référence, • 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		

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 :

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 ;

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

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 ;

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 ;

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

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.

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

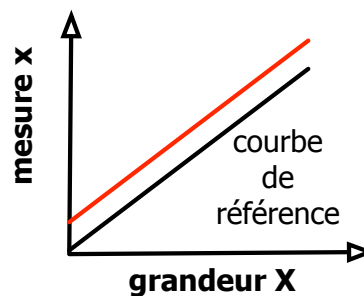
Les erreurs accidentelles : Elles résultent d'une fausse manoeuvre, d'un mauvais emploi ou de dysfonctionnement de l'appareil. Elles ne sont généralement pas prises en compte dans la détermination de la mesure.

2.5 Les types d'erreurs classiques

L'erreur de zéro (offset)

C'est une erreur qui ne dépend pas de la valeur de la grandeur mesurée

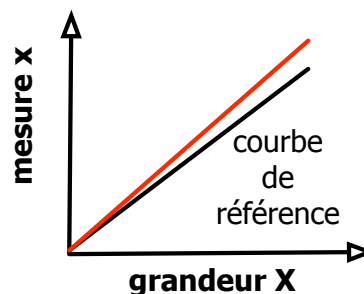
Erreur de zéro = Valeur de x quand $X = 0$



L'erreur d'échelle (gain)

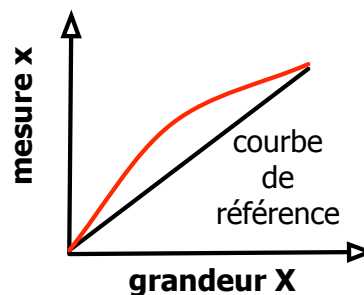
C'est une erreur qui dépend de façon linéaire de la valeur de la grandeur mesurée.

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



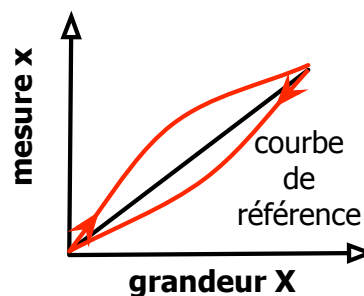
L'erreur de linéarité

La caractéristique n'est pas une droite.



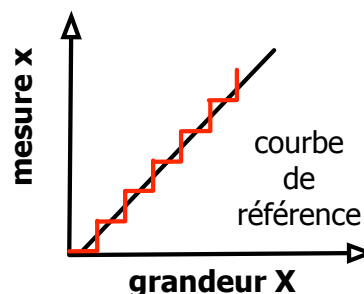
L'erreur due au phénomène d'hystérésis

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



L'erreur de mobilité

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



3 Chaîne de mesure : ses caractéristiques

3.1 Principe d'une 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 une autre grandeur physique.
- 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.
- 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**.

Remarque : lorsqu'un appareil indicateur possède un cadran gradué en unités de la grandeur à mesurer,

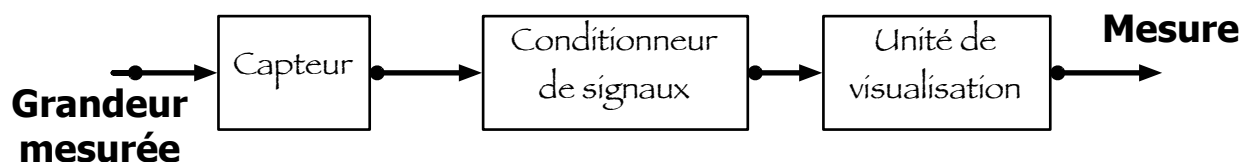


Figure 5 – Structure d'une chaîne de mesure

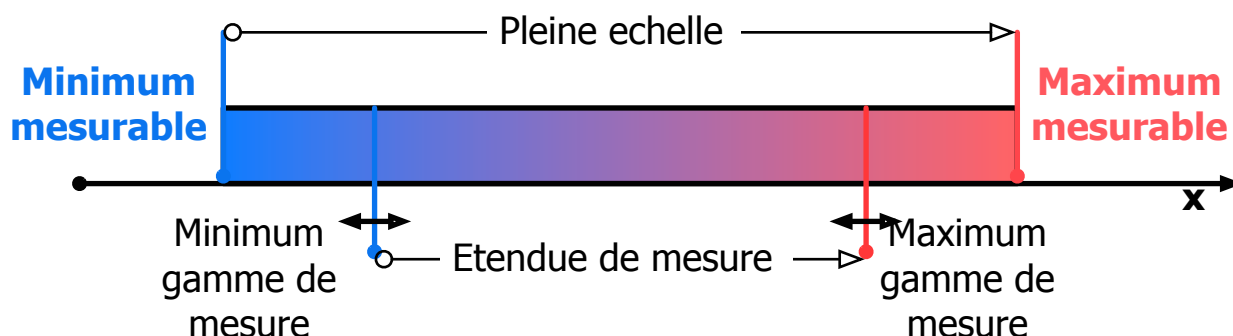


Figure 6 – Echelle sur mesure

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, 2 kg).

3.3 Rangeabilité

On définit la rangeabilité par le rapport minimum entre l'étendue de mesure et la 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 et x le signal fourni par l'appareil de mesure. À toutes valeurs de X , appartenant à l'étendue de mesure, correspond une valeur de x .

$$x = f(X) \quad (2)$$

La sensibilité autour d'une valeur de X est le quotient m :

$$m = \frac{dx}{dX} \quad (3)$$

Si la fonction est linéaire, la sensibilité de l'appareil est constante :

$$m = \frac{\Delta x}{\Delta X} \quad (4)$$

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

$$\text{gain}(dB) = 20 \times \log(m) \quad (5)$$

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.

$$\text{Classe} = 100 \times \frac{\text{La plus grande erreur possible}}{\text{Etendue de mesure}} \quad (6)$$

3.7 Résolution

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

$$\text{Resolution} = \frac{\text{Etendue de mesure}}{\text{Nombre de points de mesure}} \quad (7)$$

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.

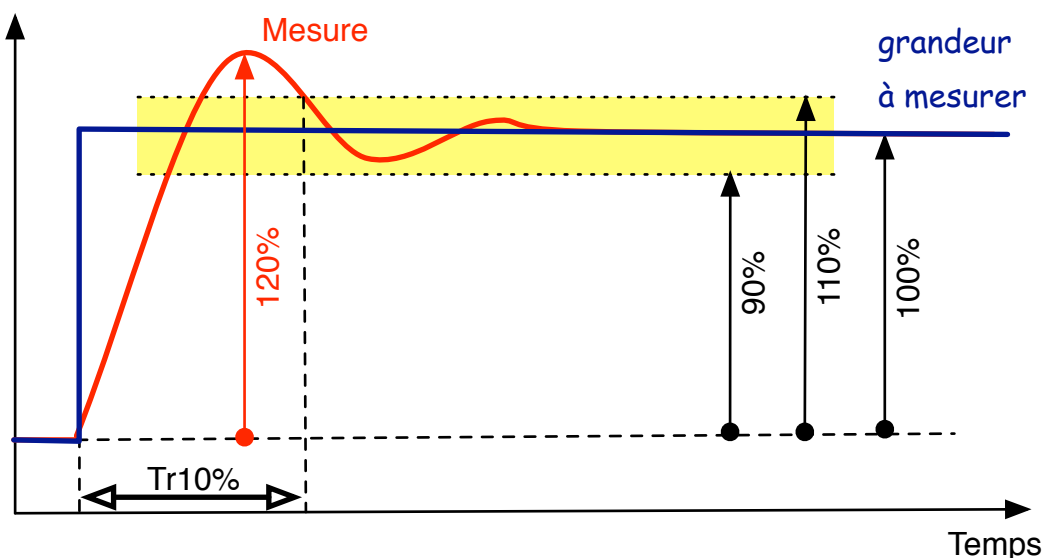


Figure 7 – Réponse indicielle

3.10 Bande passante

La bande passante est la bande de fréquence pour laquelle le gain du capteur est compris entre deux valeurs (fig. 8). 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-dessous on peut estimer le temps de réponse par la formule : $T = 0,16/F_{max}$ avec $F_{max} = 0,1 Hz$.

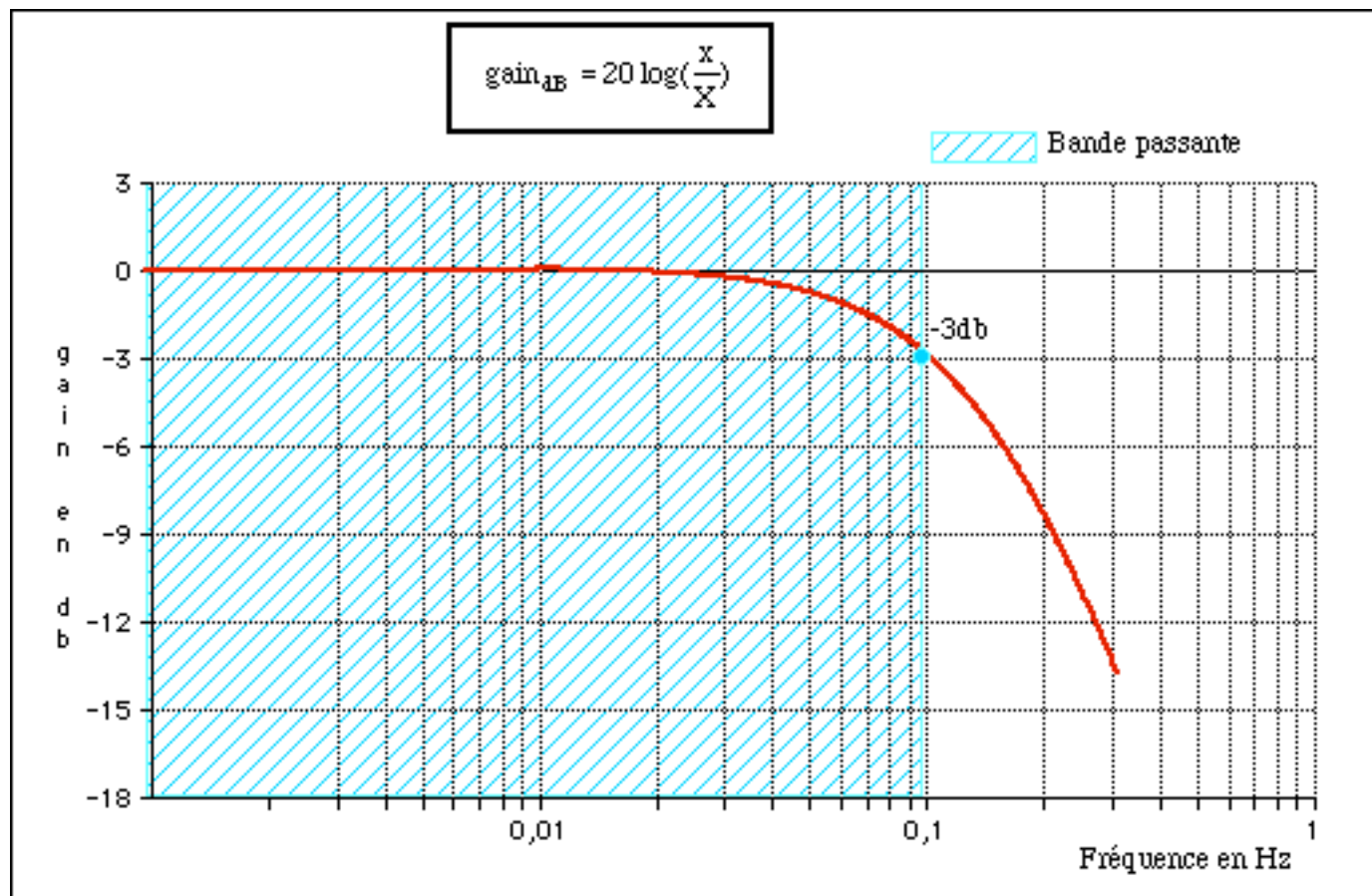


Figure 8 – Bande passante

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 :

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (8)$$

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

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (9)$$

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 :

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (10)$$

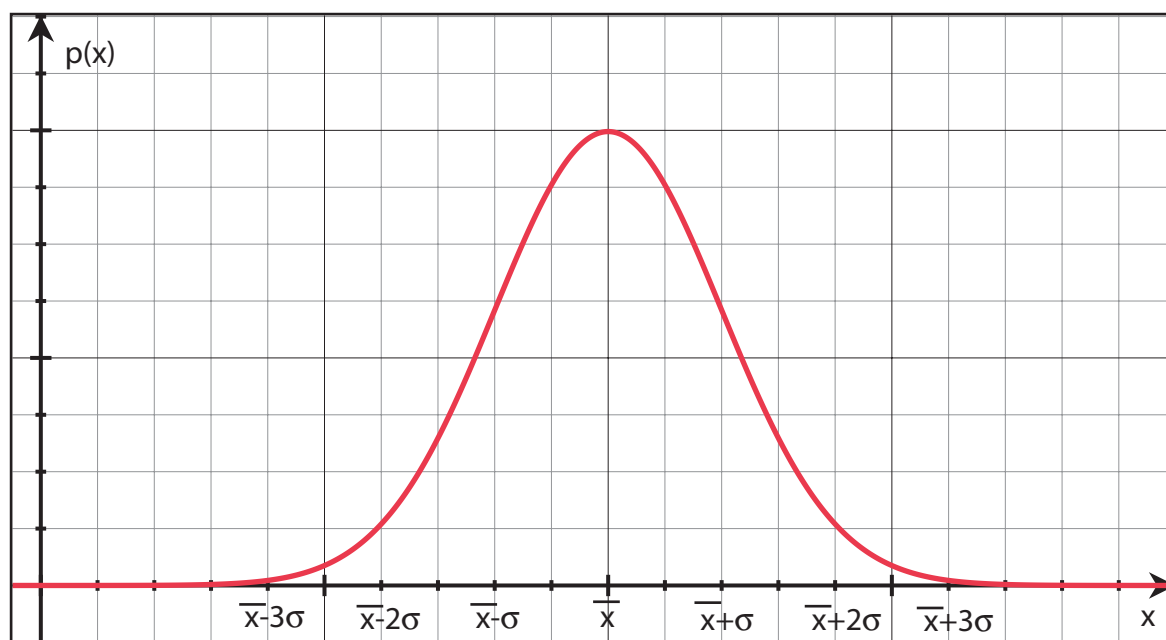


Figure 9 – Distribution de Gauss

Dans ce cas :

- 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 (fig. 10). L'écart-type est souvent considéré comme l'erreur de fidélité. Un instrument est d'autant plus fidèle que son écart type est faible.

Un instrument est d'autant plus **juste** que la valeur moyenne est proche de la valeur vraie (fig. 11).

Un appareil **précis** est à la fois fidèle et juste (fig. 12).

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.

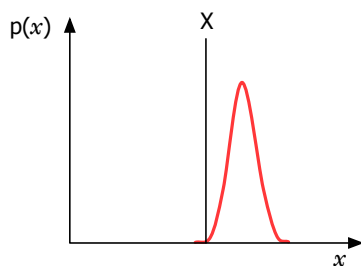


Figure 10 – Appareil fidèle

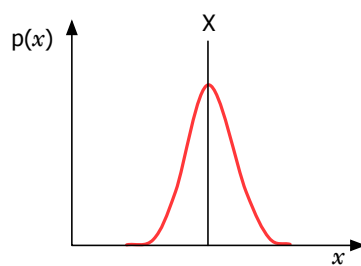


Figure 11 – Appareil juste

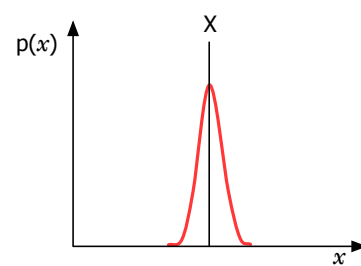


Figure 12 – Appareil précis

4 Propagation des erreurs

4.1 Les produits

La grandeur X s'obtient par la mesure de Y et Z . On a $X = Y \times Z$. 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.

4.2 Les quotients

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

4.3 Les sommes

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

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

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

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

4.4 Les différences

De la même manière, on démontre que dans le cas d'une différence, les erreurs absolues s'ajoutent.

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