

PREMIERE PARTIE :METROLOGIE DES CAPTEURS

CHAPITRE 1 :

INTRODUCTION A LA METROLOGIE

1.1 NOTIONS DE BASE

1.1.1 Quelques définitions

1.1.2 Le système d'unités internationales (SI) et ses symboles

1.1.3 Les multiples et les sous-multiples des unités

1.1.4 Liens entre les unités SI et les unités anglo-saxonnes

1.2 CLASSIFICATION DES CAPTEURS

1.2.1 Les capteurs actifs

1.2.2 Les capteurs passifs

1.2.3 Les grandeurs d'influence

1.3 LA CHAINE DE MESURE

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION A LA METROLOGIE

1.1 NOTIONS DE BASE

1.1.1 Quelques définitions

La métrologie :

C'est la science de la mesure.

Le mesurage :

C'est l'ensemble des opérations expérimentales dont le but est de déterminer la valeur numérique d'une grandeur.

Le mesurande :

C'est la grandeur physique particulière qui fait l'objet du mesurage.

L'incertitude :

Le résultat de la mesure x d'une grandeur X ne peut pas être entièrement défini par un seul nombre. Il faut le caractériser par un couple (x, dx) où dx représente l'incertitude sur x due aux différentes erreurs liées au mesurage: $X-dx < X < x+dx$

L'erreur absolue :

C'est la différence entre la vraie valeur du mesurande et sa valeur mesurée. Elle s'exprime en unité de la mesure

L'erreur relative :

C'est le rapport de l'erreur absolue au résultat du mesurage.
Elle s'exprime en pourcentage de la grandeur mesurée.

1.1.2 Le système d'unités internationales (SI) et ses symboles

Le système d'unités internationales comporte 7 unités de base indépendantes du point de vue dimensionnel, des unités dérivées et des unités complémentaires.

Les grandeurs les plus fréquemment utilisées, ainsi que leurs unités sont présentées dans les tableaux suivants.

Unités dérivées		
Grandeur	Unité (SI)	Symbole
Aire (notée A ou S)	mètre carré	m ²
Volume (noté V)	mètre cube	m ³
Fréquence (notée f)	Hertz (Heinrich Hertz, Allemagne, 1857-1894)	Hz
Vitesse (notée v)	mètre par seconde	m/s
Force (notée F)	Newton (Issac Newton, Angleterre, 1642-1727)	N
Moment d'une force (noté \mathcal{M})	mètre - Newton	mN
Moment d'un couple (noté \mathcal{T})	mètre - Newton	mN
Viscosité dynamique (notée η)	poiseuille	Pi
Tension électrique (notée U)	Volt (Alexandro Volta, Italie, 1745-1827)	V
Force électromotrice (notée E)	Volt	V

Impédance (notée Z)	Ohm	Ω
Résistivité (notée ρ)	Ohm-mètre	Ωm
Capacité électrique (notée C)	Farad (Michael Faraday, Angleterre, 1791-1867)	F
Perméabilité électrique (notée μ)	Henry par mètre	H/m
Flux lumineux	lumen	lm
Eclairage lumineux	lux	lx
Longueur d'onde (notée λ)	mètre	m
Vitesse angulaire (notée ω)	radian par seconde	rad/s
Accélération (notée g)	mètre par seconde ²	m/s ²
Accélération angulaire (notée α)	radian par seconde ²	rad/s ²
Energie, Travail (noté W)	Joule (James Joule, Angleterre, 1818-1889)	J
Puissance (notée P)	Watt (James watt, Ecosse, 1736-1819)	Watt

1.1.3 Les multiples et les sous-multiples des unités

Multiples		
Multiple	Préfixe	Symbole
10^{24}	yotta	Y
10^{21}	zetta	Z
10^{18}	exa	E
10^{15}	peta	P
10^{12}	téra	T
10^9	giga	G
10^6	méga	M
10^3	kilo	k
10^2	hecto	h
10	déca	da

Sous-multiples		
Multiple	Préfixe	Symbole
10^{-1}	déci	d
10^{-2}	centi	e
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

1.1.4 Liens entre les unités SI et les unités anglo-saxonnes

Distance :

pouce (inch) : 1 in = 2.54 cm

pied (foot) : 1 ft = 12 in = 30.48 cm

mile (miles) : 1 mile = 5280 ft = 1.609 km

Volume :

pinte (pint) : 1 pint = 0.94 l

gallon (US gallon) : 1 US gal = 4 pintes = 3.786 l

baril (US barrel): 1 bbi = 42 USgal = 159 l

1.1.4 Liens entre les unités SI et les unités anglo-saxonnes

Masse :

once (ounce) : 1 oz = 28.35 g

livre (pound) : 1 lb = 0.454 kg

Puissance :

cheval vapeur (horsepower) : 1 hp = 0.736 kW

1.2. CLASSIFICATION DES CAPTEURS

Un capteur est un dispositif qui produit, à partir d'une grandeur physique, une grandeur électrique utilisable à des fins de mesure ou de commande. Cette grandeur électrique (tension ou courant) doit être une représentation aussi exacte que possible du mesurande considéré. On distingue les capteurs actifs et les capteurs passifs.

1.2.1 Les capteurs actifs

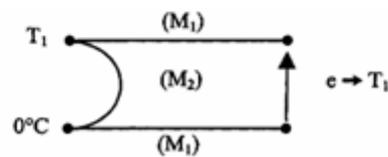
Ils se comportent comme des générateurs. Ils sont basés sur un effet physique qui permet de transformer l'énergie du mesurande (énergie mécanique, thermique ou de rayonnement), en énergie électrique. La réponse en sortie d'un capteur actif peut être un courant, une tension ou une charge. Parmi ces effets, les plus importants sont :

* L'effet thermoélectrique :

Un circuit formé de deux conducteurs de nature chimique différente, dont les jonctions sont à des températures T_1 et T_2 , est le siège d'une force électromotrice $e = f(T_1, T_2)$.

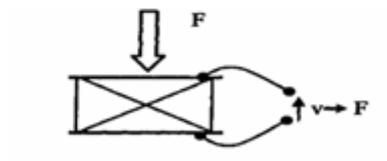
Exemple d'application :

la mesure de e permet de déterminer une température inconnue T_1 , lorsque la température T_2 est connue (principe du thermocouple).



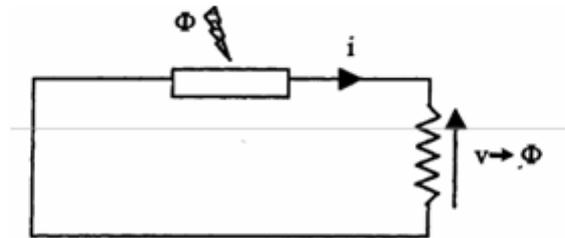
* L'effet piezo-électrique :

L'application d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézo-électriques (le quartz par exemple) entraîne une déformation qui provoque l'apparition de charges électriques égales et de signes contraires sur les faces opposées du matériau.



* L'effet photo-électrique :

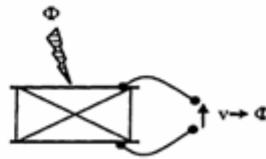
Un rayonnement lumineux ou plus généralement une onde électromagnétique dont la longueur d'onde est inférieure à une valeur seuil, caractéristique du matériau considéré, provoquent la libération de charges électriques dans la matière.



* **L'effet pyro-électrique :**

Les cristaux pyro-électriques (le sulfate de triglycine par exemple) ont une polarisation électrique spontanée qui dépend de leur température, ils portent en surface des charges électriques proportionnelles à cette polarisation et de signes contraires sur leurs faces opposées.

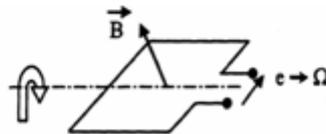
Exemple d'application : la mesure de la charge aux bornes d'un condensateur



* **L'effet d'induction électromagnétique :**

lorsqu'un circuit électrique est soumis à un flux d'induction variable du à son déplacement ou à celui de la source de l'induction (par exemple, un aimant), la f.e.m dont il est le siège est de valeur égale et de signe opposé à la vitesse de variation du flux d'induction.

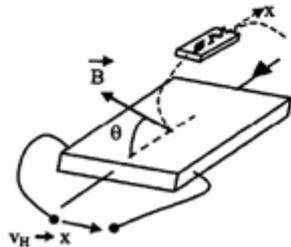
Exemple d'application : la mesure de la f.e.m d'induction permet de connaître la vitesse du déplacement qui en est l'origine.



* **L'effet Hall :**

Lorsqu'un matériau est parcouru par un courant I et soumis à un champ B formant un angle θ avec le courant, il apparaît une tension de Hall V_H dans une direction qui leur est perpendiculaire ($V_H = K_H \cdot I \cdot B \cdot \sin \theta$, où K_H est une constante qui dépend du matériau considéré).

Exemple d'application : la mesure de la tension V_H permet de déterminer la position d'un objet qui est lié à un aimant.



* **L'effet photovoltaïque :**

Un rayonnement lumineux sur l'assemblage de semi-conducteurs de types opposés P et N provoque la libération d'électrons (charges négatives) au voisinage de la jonction illuminée. Leur déplacement dans le champ électrique de la jonction modifie la tension à ses bornes.

Exemple d'application : la mesure de la tension de sortie permet de déterminer le flux par rayonnement.

Grandeur physique à mesurer	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermo-électrique	Tension
Flux par rayonnement	Photo-électrique	Tension
	Photovoltaïque	Tension
	Pyro-électrique	Charge
Force	Piézo-électrique	Charge
Pression	Piézo-électrique	Charge
Accélération	Piézo-électrique	Charge
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position	Hall	Tension

1.2.2. Les capteurs passifs

Les capteurs passifs sont des impédances intégrées dans un circuit électrique.

Les propriétés électriques des matériaux (résistivité ρ , perméabilité magnétique μ , constante diélectrique ϵ), qui peuvent être sensibles à différentes grandeurs physiques (température, humidité, éclairement ...). Si on fait varier une de ces grandeurs en maintenant les autres constantes, il s'établit une relation entre la valeur de cette grandeur et celle de l'impédance du capteur. La courbe d'étalonnage traduit cette relation et permet, à partir de la mesure de l'impédance, de déduire la valeur de la grandeur physique variable, qui est le mesurande.

Les principaux mesurandes permettant de modifier les propriétés électriques des matériaux

Mesurande	Type de matériaux utilisés	Caractéristique électrique sensible
Température	Métaux, Semi-conducteurs	Résistivité
Flux par rayonnement	Semi-conducteurs	Résistivité
Déformation	Alliages de nickel	Résistivité
	Alliages ferromagnétiques	Perméabilité magnétique
Position	Matériaux magnéto-résistants	Résistivité
Humidité	Chlorure de Lithium	Résistivité
	Polymères	Constante diélectrique
Niveau	Liquides isolants	Constante diélectrique

1.2.3. Les grandeurs d'influence

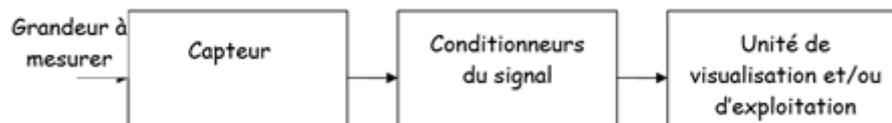
le capteur peut se trouver soumis non seulement à l'influence du mesurande, mais également à d'autres grandeurs physiques qui peuvent entraîner une variation de la grandeur électrique de sorti :

- La température qui modifie les caractéristiques électriques, mécaniques et dimensionnelles des composants du capteur.
- La pression, l'accélération et les vibrations qui peuvent provoquer des déformations et des contraintes .
- L'humidité qui peut modifier certaines propriétés électriques du capteur et qui peut dégrader l'isolation électrique entre ses composants ou entre le capteur et son environnement.

1.3. LA CHAÎNE DE MESURE

- La chaîne de mesure est constituée d'un ensemble de dispositifs (y compris le capteur), permettant de déterminer, de la manière la plus précise que possible, la valeur du mesurande considéré.
- A l'entrée de la chaîne de mesure, le capteur, soumis à l'action du mesurande, permet (de manière directe s'il est actif ou par le moyen de son conditionneur s'il est passif), d'injecter dans la chaîne le signal électrique qui est le support de l'information liée au mesurande.
- A la sortie de la chaîne de mesure, les informations sont délivrées sous une forme appropriée à leur exploitation.

Dans sa structure de base, une chaîne de mesure doit pouvoir assurer, au moyen de dispositifs appropriés, les fonctions suivantes :



- L'extraction de l'information et la traduction de la grandeur physique à mesurer en signal électrique par le capteur.
- Le conditionnement du signal afin d'éviter sa dégradation par le bruit ou par des signaux parasites : amplification, filtrage.
- La conversion du signal sous forme numérique adaptée au calculateur chargé de l'exploiter : échantillonneur bloqueur, convertisseur.
- La visualisation et/ou l'utilisation des informations recueillies afin de lire la valeur de la grandeur mesurée.

CHAPITRE 2 : LES CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES

2.1 LES ERREURS DE MESURE

2.1.1 Les erreurs illégitimes

2.1.2 Les erreurs systématiques

2.1.3 Les erreurs accidentelles ou aléatoires

2.2 TRAITEMENT STATISTIQUE DES MESURES

2.2.1 Caractérisation statistique d'une distribution

2.2.3 Mesures de la dispersion d'une distribution

2.3 ERREURS TOTALES D'UN SYSTEME DE MESURE

2.3.1 Erreur d'un produit

2.3.2 Erreur d'un quotient

2.3.3 Erreur d'une somme

2.3.4 Erreur d'une différence

2.4 REGRESSION LINEAIRE

2.5 FIDELITE, JUSTESSE ET PRECISION

2.1 LES ERREURS DE MESURE

- Les seuls mesurandes dont les valeurs sont parfaitement connues sont les grandeurs étalons dont les valeurs sont fixées par convention.
- La valeur de tout autre mesurande ne peut être connue qu'après le traitement par une chaîne de mesure. L'écart entre la valeur mesurée et la valeur vraie est l'erreur de mesure qui est due essentiellement aux imperfections de la chaîne de mesure qui dégradent l'information du signal au cours de son traitement.
- Il existe différents types d'erreurs de mesure :

2.1.1 Les erreurs illégitimes

Elles résultent d'une fausse manœuvre , d'une mauvaise utilisation ou d'un dysfonctionnement de l'appareil de mesure. Ce sont des fautes commises lors de la mesure et elles ne sont généralement pas prises en compte dans la détermination de cette dernière.

2.1.2 Les erreurs systématiques :

Ce sont des erreurs reproductibles, elles sont constantes et/ou à variation lente par rapport à la durée de mesure. Elles introduisent donc un décalage constant entre la valeur vraie et la valeur mesurée. Ces erreurs peuvent avoir plusieurs causes :

2.1.2.1 Les erreurs sur la valeur d'une grandeur de référence

Par exemple : le décalage du zéro d'un appareil analogique, la valeur erronée de la température de référence d'un thermocouple ou la valeur inexacte de la tension d'alimentation d'un pont. Ces erreurs peuvent être éliminées par la vérification rigoureuse des appareils de mesure

2.1.2.2 Les erreurs dues aux conditions d'emploi

Principalement l'erreur de rapidité qui résulte d'une mesure faite avant que le régime permanent ne soit atteint.

2.1.3 Les erreurs accidentelles ou aléatoires (Random errors)

Ce sont des erreurs non reproductibles, leurs apparitions et leurs valeurs sont considérées comme aléatoires. Certaines de leurs causes peuvent être connues, mais les valeurs des erreurs qu'elles entraînent au moment de la mesure sont inconnues.

Elles sont déterminées à partir de lois statistiques.

2.1.3.1 Les erreurs liées aux indéterminations des caractéristiques instrumentales

L'erreur de mobilité ϵ_m

c'est la variation maximale du mesurande qui n'entraîne pas de variation détectable de la grandeur de sortie du capteur.

Exemple :

Une balance qui ne serait pas sensible aux poids de quelques grammes.

Ampèremètre.....

2.1.3.1 Les erreurs liées aux indéterminations des caractéristiques instrumentales

L'erreur de lecture d'un appareil analogique ϵ_L

Elle résulte de la plus ou moins grande habileté de l'opérateur ainsi que de la qualité de l'appareil.

2.1.3.1 Les erreurs liées aux indéterminations des caractéristiques instrumentales

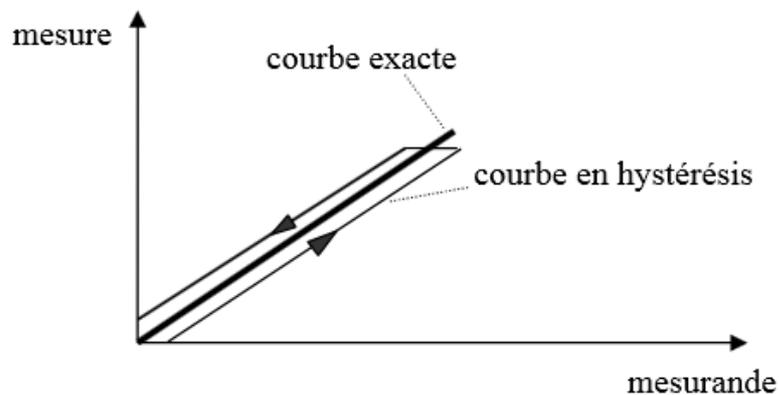
L'erreur de résolution ϵ_r

Elle est la combinaison de l'erreur de mobilité et de l'erreur de lecture. C'est la variation minimale du mesurande mesuré avec un capteur donné

$$\epsilon_r = [(\epsilon_L)^2 + (\epsilon_m)^2]^{1/2}$$

2.1.3.1 Les erreurs liées aux indéterminations des caractéristiques instrumentales

L'erreur d'hystérésis



2.1.3.1 Les erreurs liées aux indéterminations des caractéristiques instrumentales

L'erreur d'hystérésis

Lorsqu'un des éléments de la chaîne de mesure comporte un composant présentant de l'hystérésis (par exemple un ressort), sa réponse dépend de ses conditions d'utilisation antérieures. Cette erreur est évaluée en supposant qu'elle est égale à la moitié de l'écart maximal des valeurs de la grandeur de sortie correspondant à une valeur du mesurande, selon que cette dernière est obtenue par des valeurs croissantes ou décroissantes.

2.1.3.2 Les erreurs dues aux signaux parasites de caractère aléatoire

Ces erreurs sont dues aux bruits de fond, aux agitations thermiques, aux fluctuations de tension des sources.....

2.1.3.3 Les erreurs dues à des grandeurs d'influence

Ce type d'erreurs apparaît lorsque l'appareil de mesure est utilisé dans des conditions environnementales différentes de celles dans lesquelles il a été étalonné.

2.2 TRAITEMENT STATISTIQUE DES MESURES

2.2 TRAITEMENT STATISTIQUE DES MESURES

Des mesures répétées plusieurs fois donnent des résultats dispersés en raison des erreurs.

Solution :

. Il faut donc appliquer un traitement statistique afin de connaître la valeur la plus probable de la grandeur mesurée et de fixer les limites de l'incertitude.

Le traitement statistique des mesures s'effectue en plusieurs étapes qui consistent à :

- Etablir la distribution des données, une représentation graphique de la distribution permettra une première évaluation des mesures.
- Caractériser la distribution statistique par la mesure de la tendance centrale (moyenne, mode, médiane).
- Déterminer la dispersion de la distribution par la variation des résultats de mesure par rapport à la valeur moyenne (variance, écart-type).

2.2.1 Caractérisation statistique d'une distribution

Lorsque la mesure d'une même grandeur X , a été répétée n fois en donnant les résultats x_1, x_2, \dots, x_n , et si on suppose que la valeur x_1 a été obtenue n_1 fois, la valeur x_2 obtenue n_2 fois ...et x_n obtenue n_n fois :

Le nombre total d'observations $n = n_1 + n_2 + \dots + n_n$ et la fréquence relative de distribution qui correspond à la probabilité d'apparition des valeurs x_1, x_2, \dots, x_n est donc :

$$f_n(x_1) = \frac{n_1}{n}, f_n(x_2) = \frac{n_2}{n}, \dots, f_n(x_n) = \frac{n_n}{n} \quad \text{et} \quad \sum_{i=1}^n f_n(x_i) = 1$$

Application :

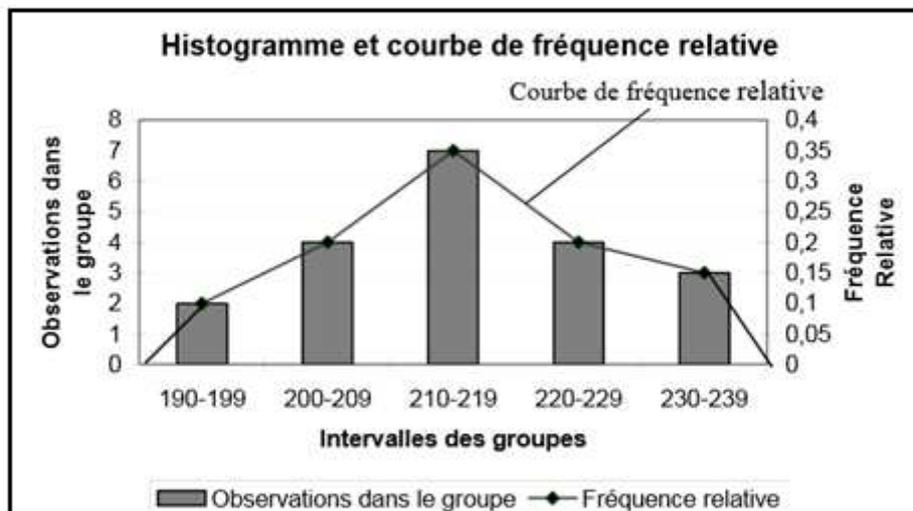
La température d'une pièce a été mesurée tout es les 30 mn pendant une période de 10 h. Les valeurs obtenues sont consignées dans le tableau ci-dessous.

N° de la mesure	Température (°C)	N° de la mesure	Température (°C)
1	209	11	212
2	195	12	205
3	212	13	225
4	225	14	214
5	216	15	216
6	228	16	216
7	231	17	205
8	212	18	193
9	237	19	220
10	200	20	230

Application : mode d'emploi

Il faut commencer par ordonner ces valeurs et les diviser en groupes pour déterminer la fréquence de distribution et représenter graphiquement la distribution:

Intervalles des groupes	Observations dans le groupe	Fréquence relative	Fréquence cumulée
190-199	2	0.1	0.1
200-209	4	0.2	0.3
210-219	7	0.35	0.65
220-229	4	0.2	0.85
230-239	3	0.15	1
Total	20	1	



2.2.2 Mesures de la tendance centrale d'une distribution

2.2.2.1 La moyenne

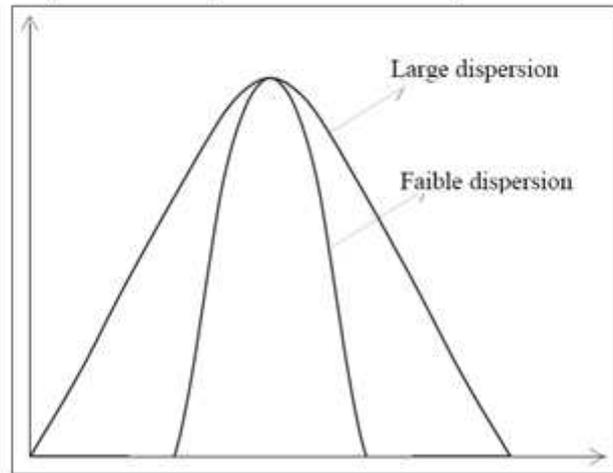
Lorsque la mesure d'une même grandeur X a été répétée n fois, donnant les résultats x_1, x_2, \dots, x_n , la valeur moyenne est définie par :

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

C'est la mesure de la tendance centrale la plus utilisée, \bar{x} moyen s'approche de la vraie valeur lorsque le nombre de mesures augmente.

2.2.3 Mesures de la dispersion d'une distribution

Deux distributions de données différentes peuvent avoir la même moyenne mais pas la même dispersion :



2.2.3 Mesures de la dispersion d'une distribution

Il existe plusieurs mesures de dispersion :

2.2.3.1 Le domaine :

$$R = x_{\max} - x_{\min}$$

2.2.3.2 La déviation moyenne:

$$d_x = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| \right)$$

2.2.3 Mesures de la dispersion d'une distribution

2.2.3.4 Le coefficient de variation :

C'est un paramètre normalisé qui indique la variabilité des données par rapport à la valeur moyenne.

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} 100 (\%)$$

2.2.3 Mesures de la dispersion d'une distribution

2.2.3.5 L'erreur standard sur la moyenne :

L'erreur standard sur la moyenne

$$S_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, S_x \rightarrow 0 \text{ quand } n \rightarrow \infty$$

Lorsque les erreurs aléatoires qui affectent les mesures sont indépendantes, la probabilité d'apparition des différents résultats de mesure satisfait à la loi normale dite également **loi de Gauss**.

2.2.3 Mesures de la dispersion d'une distribution

2.2.3.5 L'erreur standard sur la moyenne (suite):

La probabilité $P(x_1, x_2)$ d'obtenir comme résultat d'une mesure une valeur du mesurande comprise entre deux valeurs x_1 et x_2 peut s'écrire :

$$P(x_1, x_2) = \int_{x_1}^{x_2} p(x) dx$$

où $p(x)$ est la densité de probabilité pour la valeur x du mesurande.

Dans le cas de la loi de Gauss :

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

2.2.2 Mesures de la tendance centrale d'une distribution

- La valeur de x la plus probable est \bar{x} (moyen) .
- La probabilité d'apparition d'un résultat de mesure dans les limites indiquées est :

- ❖ $P(x \pm \sigma) = 68.27\%$
- ❖ $P(x \pm 2\sigma) = 95.45\%$
- ❖ $P(x \pm 3\sigma) = 99.73\%$

En général, on prend donc une incertitude égale à 3 fois l'écart type (3σ).