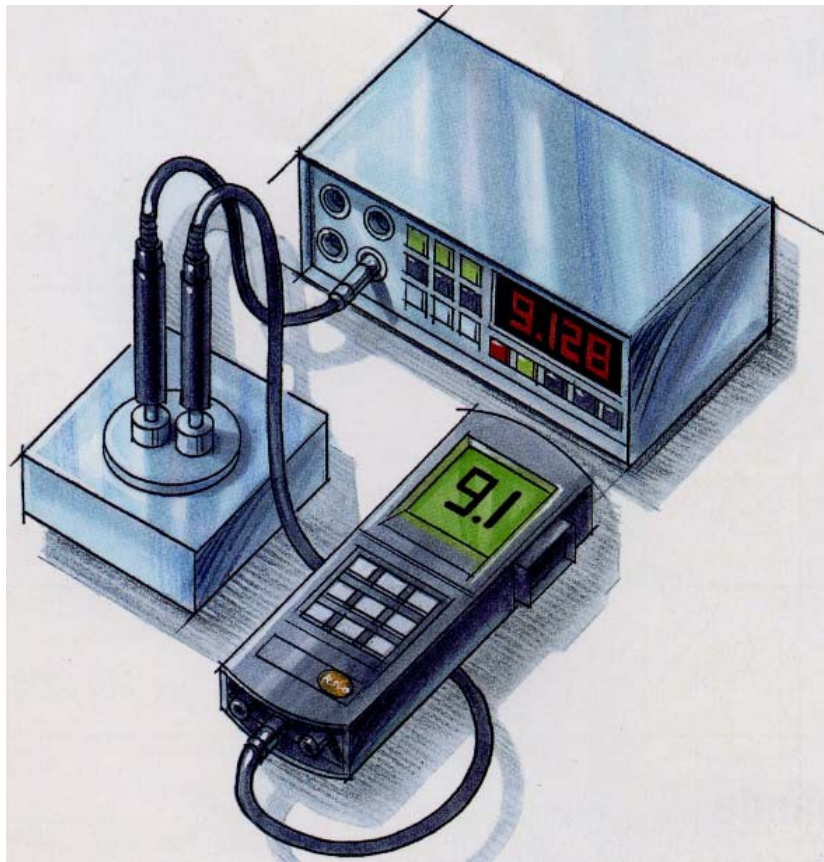




المدرسة الوطنية للمهندسين بتونس

École Nationale d'Ingénieurs de Tunis

COURS DE MESURE ET INSTRUMENTATION



Leila GHARBI ERNEZ

Février 2005

PREMIERE PARTIE :METROLOGIE DES CAPTEURS

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION A LA METROLOGIE	6
1.1 NOTIONS DE BASE	6
1.1.1 <u>Quelques définitions</u>	6
1.1.2 <u>Le système d'unités internationales (SI) et ses symboles</u>	6
1.1.3 <u>Les multiples et les sous-multiples des unités</u>	9
1.1.4 <u>Liens entre les unités SI et les unités anglo-saxonnes</u>	9
1.2 CLASSIFICATION DES CAPTEURS	10
1.2.1 <u>Les capteurs actifs</u>	10
1.2.2 <u>Les capteurs passifs</u>	13
1.2.3 <u>Les grandeurs d'influence</u>	14
1.3 LA CHAINE DE MESURE	14
CHAPITRE 2 : LES CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES	16
2.1 LES ERREURS DE MESURE	16
2.1.1 <u>Les erreurs illégitimes (Illegitimate errors)</u>	16
2.1.2 <u>Les erreurs systématiques (Systematic errors)</u>	16
2.1.3 <u>Les erreurs accidentelles ou aléatoires (Random errors)</u>	17
2.2 TRAITEMENT STATISTIQUE DES MESURES	18
2.2.1 <u>Caractérisation statistique d'une distribution</u>	19
2.2.3 <u>Mesures de la dispersion d'une distribution</u>	21
2.3 ERREURS TOTALES D'UN SYSTEME DE MESURE	23
2.3.1 <u>Erreur d'un produit</u>	23
2.3.2 <u>Erreur d'un quotient</u>	24
2.3.3 <u>Erreur d'une somme</u>	24
2.3.4 <u>Erreur d'une différence</u>	25
2.4 REGRESSION LINEAIRE	25
2.5 FIDELITE, JUSTESSE ET PRECISION	26
CHAPITRE 3 : PERFORMANCES DES SYSTEMES DE MESURE	28
3.1 LE SYSTEME DE MESURE IDEAL	28
3.2 LES CARACTERISTIQUES STATIQUES D'UN CAPTEUR	28
3.2.1 <u>Gamme de mesure - Etendue de mesure</u>	28
3.2.2 <u>La courbe d'étalonnage ou l'étalonnage statique (Static calibration)</u>	29
3.2.3 <u>La précision (Accuracy)</u>	29
3.2.4 <u>Le décalage du zéro (Bias, Zero-drift)</u>	29
3.2.5 <u>La linéarité</u>	29
3.2.6 <u>La sensibilité (sensitivity)</u>	30
3.2.7 <u>Le décalage de la sensibilité (sensitivity drift)</u>	30
3.2.8 <u>La résolution</u>	31
3.2.9 <u>La répétabilité (Precision)</u>	31
3.2.10 <u>La reproductibilité</u>	31

3.3 LES CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES D'UN CAPTEUR	32
3.3.1 <u>Le système d'ordre zéro</u>	32
3.3.2 <u>Le système du premier ordre</u>	32
3.3.3 <u>Le système du deuxième ordre</u>	35

DEUXIEME PARTIE :LES CAPTEURS DE TEMPERATURE

CHAPITRE 4 : LES THERMOMETRES A DILATATION	40
4.1 INTRODUCTION	40
4.2 LE THERMOMETRE A DILATATION DE LIQUIDE	40
4.2.1 <u>Description</u>	40
4.2.2 <u>Loi de variation</u>	41
4.2.3 <u>Liquides thermométriques</u>	41
4.2.4 <u>Nature de l'enveloppe</u>	41
4.2.5 <u>Colonne émergente</u>	41
4.3 LE THERMOMETRE A DILATATION DE GAZ	43
4.3.1 <u>Principe</u>	43
4.3.2 <u>Description</u>	43
4.4 LE THERMOMETRE A TENSION DE VAPEUR	44
4.4.1 <u>Principe</u>	44
4.4.2 <u>Liquides de remplissage et domaines d'utilisation</u>	45
4.5 LE THERMOMETRE A DILATATION DE SOLIDE	45
4.5.1 <u>Principe</u>	45
4.5.2 <u>Le bilame (bi-metallic-strip thermometer)</u>	46
CHAPITRE 5 : LES THERMOMETRES ELECTRIQUES	47
5.1 INTRODUCTION	47
5.2 LES THERMOMETRES A RESISTANCE	47
5.2.1 <u>Principe</u>	47
5.2.2 <u>Critères de choix du métal</u>	48
5.3 LES THERMISTANCES	49
5.3.1 <u>Principe</u>	49
5.3.2 <u>Relation résistance-température</u>	49
CHAPITRE 6 : LES THERMOCOUPLES	51
6.1 PRINCIPE	51
6.2 LES EFFETS THERMOELECTRIQUES	51
6.2.1 <u>L'effet Peltier</u>	51
6.2.2 <u>L'effet Thomson</u>	52
6.2.3 <u>L'effet Seebeck</u>	52
6.3 PRINCIPES PRATIQUES D'UTILISATION DES THERMOCOUPLES	53
6.4 SENSIBILITE THERMIQUE D'UN THERMOCOUPLE	56
6.5 TEMPERATURE DE REFERENCE D'UN THERMOCOUPLE	58

6.5.1 <u>Le bain d'eau et de glace</u>	58
6.5.2 <u>La méthode du pont électrique</u>	58
6.5.3 <u>La méthode du double four</u>	59
6.6 PRINCIPAUX TYPES DE THERMOCOUPLES ET LIMITES D' EMPLOI	60
6.7 COMPARAISON THERMOCOUPLE/THERMOMETRES ELECTRIQUES	61
CHAPITRE 7 : REPONSE DYNAMIQUE D' UN CAPTEUR DE TEMPERATURE	62
7.1 INTRODUCTION	62
7.2 REPONSE A UN SIGNAL ECHELON	63
7.3 REPONSE A UN SIGNAL RAMPE	64
BIBLIOGRAPHIE	65
ANNEXES	66

Première partie :

Métrologie des capteurs

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 le tableau suivant.

Unités de base		
Grandeur	Unité (SI)	Symbole
Longueur (notée l)	mètre	m
Masse (notée m)	Kilogramme	kg
Temps (noté t)	seconde	s
Courant électrique (noté i)	Ampère (André Marie Ampère, 1775-1836)	A
Température (notée T)	Kelvin (Lord Kelvin, Angleterre, 1824-1907)	K
Quantité de matière	mole	mol
Intensité lumineuse (notée I)	la candela	cd
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
Résistance électrique (notée R)	Ohm (Georges Ohm, Allemagne, 1789-1854)	Ω
Réactance (notée X)	Ohm	Ω

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
Eclairement 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
Puissance apparente (notée S)	Volt-Ampère	VA
Puissance réactive (notée q)	Volt-Ampère-Réactif	VAR
Pression (notée P)	Pascal (Blaise Pascal, France, 1623-1662)	Pa
Quantité d'électricité (notée Q)	Coulomb (Charles Coulomb, France, 1736-1806)	C
Inductance (notée L)	Henry (Joseph Henry, Etats-Unis, 1797-1878)	H
Champ magnétique (noté H)	Ampère par mètre	A/m
Induction magnétique (notée B)	Tesla (Nicolas Tesla, Yougoslavie, 1857-1943)	T
Flux d'induction magnétique (noté ϕ)	Weber (Wilhelm Weber, Allemagne, 1816-1892)	Wb
Unités complémentaires		
Grandeur	Unité (SI)	Symbole
Angle plan	radian	rad
Angle solide	stéradian	Sr

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 barel): 1 bbi = 42 USgal = 159 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

1.2. 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.

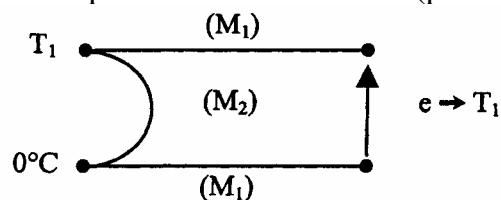
1.2.1 Les capteurs actifs

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 $e = f(T_1, T_2)$.

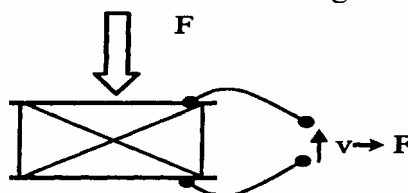
Exemple d'application : la mesure de e permet de déterminer une température inconnue T_1 , lorsque la température T_2 est connue (principe du thermocouple).



- **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.

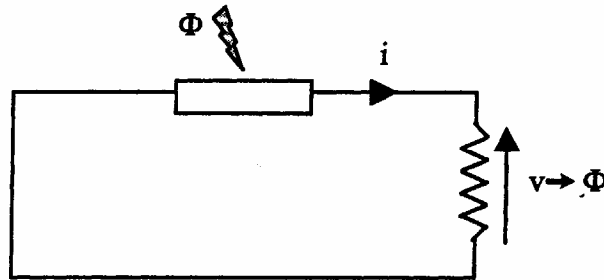
Exemple d'application : la mesure de force, de pression ou d'accélération à partir de la tension que provoquent aux bornes d'un condensateur associé à l'élément piézo-électrique les variations de sa charge.



- **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.

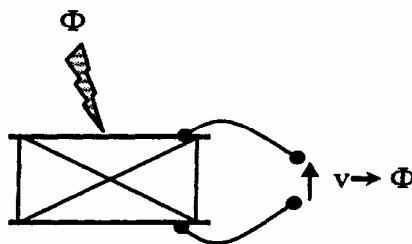
Exemple d'application : la mesure de la tension de sortie permet de déterminer le flux par rayonnement.



- **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.

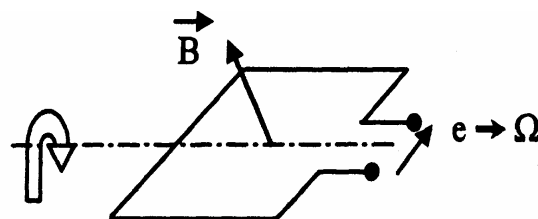
Exemple d'application : la mesure de la charge aux bornes d'un condensateur associé à un cristal pyro-électrique permet de déterminer le flux lumineux auquel il est soumis.



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

Lorsqu'un conducteur se déplace dans un champ d'induction fixe, il est le siège d'une force électro-motrice proportionnelle à sa vitesse de déplacement. Ainsi, 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.

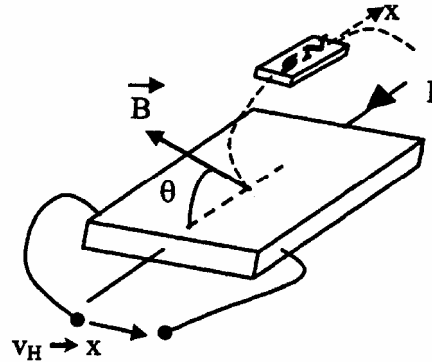
Exemple d'application : la mesure de la f.e.m d'induction permet de connaître la vitesse du déplacement qui en est l'origine.



- **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) et de trous (charges positives) 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.

Les principes physiques de base et les modes d'application de ces effets sont regroupés dans le tableau suivant :

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 (conditionneur), dont l'un des paramètres déterminants est sensible au mesurande. La variation d'impédance résulte de l'effet de la grandeur à mesurer sur :

- Soit les caractéristiques géométriques ou dimensionnelles qui peuvent varier si le capteur comporte un élément mobile ou déformable. Dans le premier cas, à chaque position de l'élément mobile correspond une valeur de l'impédance dont la mesure permet de connaître la position (principe des capteurs de déplacement ou de position tel que le potentiomètre). Dans le second cas, la déformation appliquée au capteur entraîne une modification de l'impédance (principe des capteurs de déformation tels que les jauges de contraintes).
- Soit les propriétés électriques des matériaux (résistivité ρ , perméabilité magnétique μ , constante diélectrique ϵ), qui peuvent être sensibles à différentes grandeurs physiques (température, humidité, éclairage ...). 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 en fait le mesurande. Le tableau présente un aperçu des principaux mesurandes permettant de modifier les propriétés électriques des matériaux utilisés pour la fabrication des capteurs passifs.

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

En raison des conditions d'utilisation, 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 sortie qu'il n'est pas possible de distinguer de l'action du mesurande. Ces grandeurs physiques « parasites » auxquelles la réponse du capteur peut être sensible représentent les grandeurs d'influence, dont les plus importantes sont :

- 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 qui altèrent la réponse du capteur.
- 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.
- Les champs magnétiques qui peuvent créer des f.e.m d'induction qui se superposent au signal utile.
- La tension d'alimentation dont la variation de l'amplitude ou de la fréquence peut perturber la grandeur électrique de sortie du capteur.
- La lumière ambiante qui peut s'ajouter au flux lumineux à mesurer.

Afin de pouvoir déduire de la valeur mesurée, les valeurs correspondant à ces grandeurs parasites, il faut :

- Réduire l'importance des grandeurs d'influence au niveau du capteur en le protégeant par un isolement adéquat.
- Stabiliser les grandeurs d'influence à des valeurs parfaitement connues et étalonner le capteur dans ces conditions de fonctionnement.
- Utiliser éventuellement des montages électriques permettant de compenser l'influence de ces grandeurs, comme par exemple un pont de Wheatstone avec un capteur identique placé dans une branche adjacente au capteur.

1.3. LA CHAÎNE DE MESURE

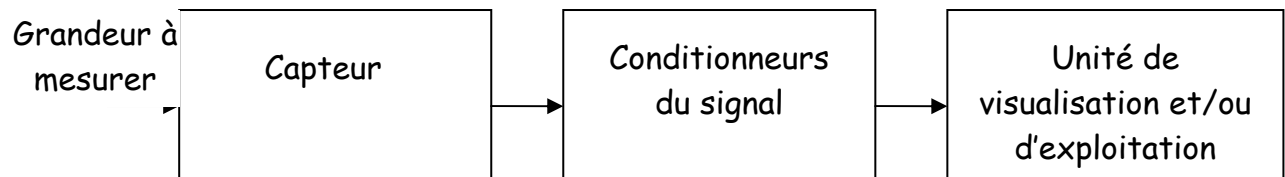
La chaîne de mesure est constituée d'un ensemble de dispositifs (y compris le capteur), permettant de déterminer, de la manière la plus précise que possible, la valeur du mesurande considéré.

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.

Sous sa forme la plus simple, la chaîne de mesure peut se réduire au capteur et à son conditionneur éventuel, associé à un appareil de lecture (par exemple, un thermocouple et un voltmètre). Mais de nos jours, compte tenu des possibilités importantes offertes par l'électronique et l'informatique, la quasi-totalité des chaînes de mesure sont des chaînes électroniques.

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 analogique-digital.
- La visualisation et/ou l'utilisation des informations recueillies afin de lire la valeur de la grandeur mesurée et/ou de l'exploiter dans le cas d'un asservissement : microprocesseur, microcontrôleur.

CHAPITRE 2 : LES CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES

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. Une conception rigoureuse de la chaîne de mesure permet de réduire l'erreur de mesure et donc l'incertitude sur la valeur vraie.

Il existe différents types d'erreurs de mesure que nous présentons dans ce qui suit.

2.1.1 Les erreurs illégitimes (Illegitimate errors)

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 (Systematic errors)

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, dont nous présentons les plus fréquentes.

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

Nous citons à titre d'exemples 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 sur la valeur d'une grandeur de référence*

Ce sont des erreurs sur la sensibilité ou sur la courbe d'étalonnage d'un capteur. Le vieillissement d'un capteur, la fatigue mécanique ou l'altération chimique de ses composants, entraînent une modification de sa courbe d'étalonnage initiale. Ces erreurs peuvent être réduites par un réétalonnage fréquent des capteurs.

2.1.2.3 *Les erreurs dues au mode ou aux conditions d'emploi*

Les principales sont :

- l'erreur de rapidité qui résulte d'une mesure faite avant que le régime permanent ne soit atteint.
- l'erreur de finesse qui est due à la modification de la valeur du mesurande par la présence du capteur lui même.

2.1.2.4 *Les erreurs dans l'exploitation des données brutes de mesures*

Ce sont des erreurs de correction ou d'interpolation qui résultent d'une appréciation erronée des corrections qu'il peut être nécessaire d'appliquer au résultat brut de la mesure afin d'obtenir une valeur plus juste. Ces erreurs peuvent être des écarts à la linéarité d'un capteur dont la caractéristique n'est pas une droite ...

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 intrinsèques des caractéristiques instrumentales*

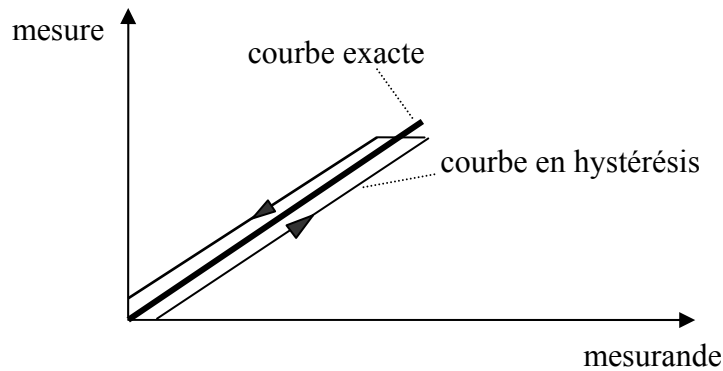
L'erreur de mobilité ϵ_m : c'est la variation maximale du mesurande qui n'entraîne pas de variation détectable de la grandeur de sortie du capteur. Exemple : un potentiomètre bobiné pour lequel un déplacement du curseur inférieur à la distance entre deux spires peut n'entraîner aucune variation de la tension de sortie.

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. Exemple : finesse de l'aiguille.

L'erreur de résolution ϵ_r : c'est la variation minimale du mesurande mesuré avec un capteur donné. Elle est la combinaison de l'erreur de mobilité et de l'erreur de lecture :

$$\epsilon_r = \sqrt{\epsilon_m^2 + \epsilon_l^2}$$

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 antérieure. 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.



L'erreur de quantification d'un convertisseur analogique/digital : l'opération de quantification attribue une valeur unique à l'ensemble des valeurs analogiques comprises dans une plage correspondant à un bit de poids le plus faible (L.S.B). L'incertitude maximale est de $\pm 1/2$ LSB.

2.1.3.2 *Les erreurs dues à la prise en compte par la chaîne de mesure de signaux parasites de caractère aléatoire*

Le bruit de fond produit par l'agitation thermique des porteurs de charge dans les résistances qui entraînent des fluctuations de tension qui se superposent au signal utile, les fluctuations de tension des sources d'alimentation qui agissent sur les performances des appareils et modifient l'amplitude du signal ... engendrent ce type d'erreurs.

2.1.3.3 *Les erreurs dues à des grandeurs d'influence*

Lorsque les conséquences des variations des grandeurs d'influence n'ont pas été prises en compte lors de l'étalonnage du capteur, on peut considérer que leur contribution est aléatoire. 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

Des mesures répétées plusieurs fois donnent des résultats dispersés en raison des erreurs dont elles sont entachées. 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. Ce traitement 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 :

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

La représentation graphique par histogramme, par la courbe de fréquence relative, ou par le diagramme de fréquence cumulée permet de visualiser la distribution. Plus le nombre d'observations augmente, et plus les fluctuations diminuent.

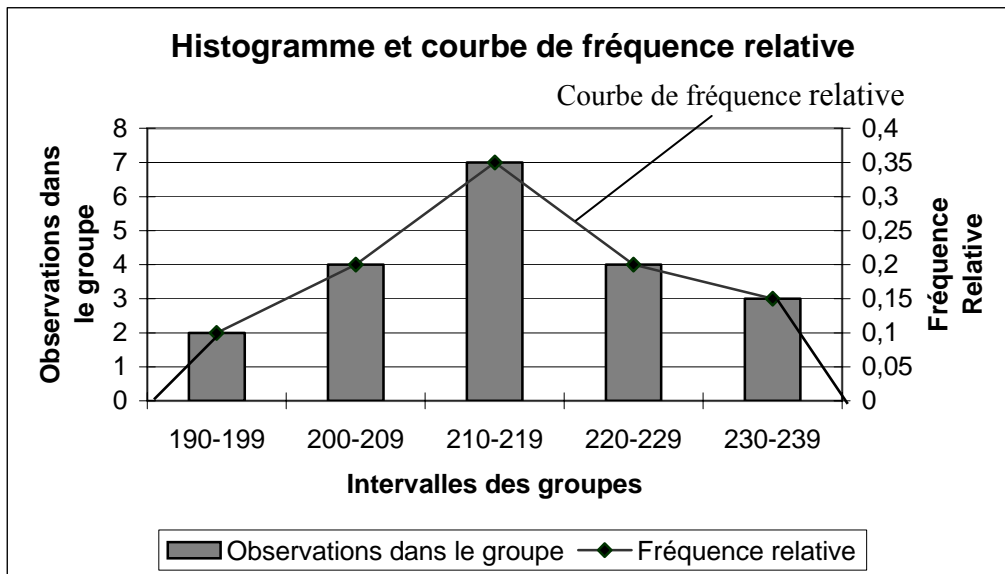
Exemple :

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

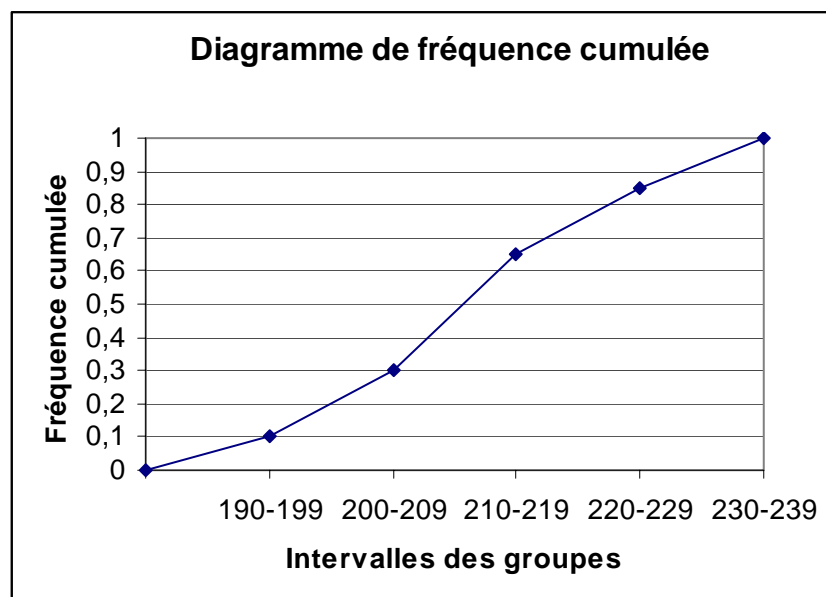
N° de la mesure	Température (°C)	N° de la mesure	Température (°C)
1	209	11	212
2	195	12	205
3	212	13	225
4	225	14	214
5	216	15	216
6	228	16	216
7	231	17	205
8	212	18	193
9	237	19	220
10	200	20	230

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	



On peut également représenter le diagramme de fréquence cumulée :



2.2.2 Mesures de la tendance centrale d'une distribution

2.2.2.1 *La moyenne (The mean)*

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} s'approche de la vraie valeur lorsque le nombre de mesures augmente.

2.2.2.2 La médiane (*The median*)

Elle correspond à la valeur centrale dans un groupe de données ordonnées.

2.2.2.3 Le mode (*The mode*)

C'est la valeur la plus fréquente, elle correspond au pic de la courbe de fréquence relative.

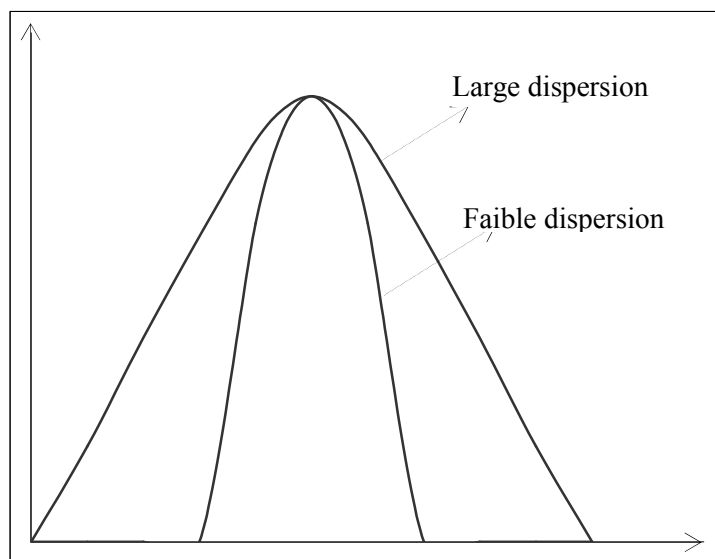
Remarque :

Pour l'exemple que nous avons présenté, les trois mesures de la tendance centrale ne donnent pas les mêmes résultats : la moyenne est égale à 215.05 °C, la médiane a pour valeur 215 °C et le mode est égal à 214.5 °C.

Ces trois valeurs ne coïncident pas car le nombre de mesures est réduit et la représentation n'est pas Gaussienne.

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 :



Il existe plusieurs mesures de dispersion :

2.2.3.1 *Le domaine (The range)*

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

2.2.3.2 La déviation moyenne (The mean deviation)

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

2.2.3.3 La variance

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|^2 \right)$$

2.2.3.3 L'écart type (The standard deviation)

C'est la mesure de dispersion la plus utilisée : $\sigma = \left(\frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|^2 \right) \right)^{\frac{1}{2}}$

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.

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

2.2.3.5 L'erreur standard sur la moyenne

L'erreur standard sur la moyenne $S_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$, $S_x \rightarrow 0$ 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**.

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

- La valeur de x la plus probable est \bar{x} .
- La probabilité d'apparition d'un résultat de mesure dans les limites indiquées est :
 - $P(\bar{x} \pm \sigma) = 68.27\%$
 - $P(\bar{x} \pm 2\sigma) = 95.45\%$
 - $P(\bar{x} \pm 3\sigma) = 99.73\%$

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

2.3 ERREURS TOTALES D'UN SYSTEME DE MESURE

Un appareil de mesure est souvent constitué de plusieurs composants, chacun d'entre eux pouvant être sujet à des erreurs systématiques et aléatoires. On peut évaluer les erreurs de chaque composant et les combiner pour avoir l'erreur totale du système de mesure.

2.3.1 Erreur d'un produit

On considère une grandeur X qui s'obtient par la mesure de Y et Z tels que $X=Y.Z$, les nombres Y et Z étant positifs.

Si on suppose que la mesure de Y donne $y \pm dy$ et que la mesure de Z donne $z \pm dz$:

$$(y - dy)(z - dz) < X < (y + dy)(z + dz)$$

or :

$$(y - dy)(z - dz) = yz - ydz - zdy + dydz = yz \left(1 - \left(\frac{dz}{z} + \frac{dy}{y} - \frac{dydz}{yz} \right) \right)$$

et

$$(y + dy)(z + dz) = yz + ydz + zdy + dydz = yz \left(1 + \left(\frac{dz}{z} + \frac{dy}{y} - \frac{dydz}{yz} \right) \right)$$

Si on néglige les erreurs d'ordre 2 par rapport aux autres termes (les erreurs des appareils de mesure sont faibles, de l'ordre de 1 à 2 %), on obtient :

$$X = yz \pm yz \left(\frac{dz}{z} + \frac{dy}{y} \right) \Rightarrow \frac{dx}{x} = \frac{dz}{z} + \frac{dy}{y}$$

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

2.3.2 Erreur d'un quotient

On considère une grandeur X qui s'obtient par la mesure de Y et Z tels que $X = \frac{Y}{Z}$, les nombres Y et Z étant positifs.

Si on suppose que la mesure de Y donne $y \pm dy$ et que la mesure de Z donne $z \pm dz$:

$$\frac{y - dy}{z + dz} < X < \frac{y + dy}{z - dz}$$

or :

$$\frac{y - dy}{z + dz} = \frac{(y - dy)(z - dz)}{(z + dz)(z - dz)} = \frac{yz \left(1 - \left(\frac{dy}{y} + \frac{dz}{z} - \frac{dydz}{yz} \right) \right)}{z^2 - dz^2}$$

et

$$\frac{y + dy}{z - dz} = \frac{(y + dy)(z + dz)}{(z - dz)(z + dz)} = \frac{yz \left(1 + \left(\frac{dy}{y} + \frac{dz}{z} + \frac{dydz}{yz} \right) \right)}{z^2 - dz^2}$$

En négligeant les erreurs d'ordre 2 par rapport aux autres termes, on obtient :

$$X = \frac{y}{z} \pm \frac{y}{z} \left(\frac{dz}{z} + \frac{dy}{y} \right) \Rightarrow \frac{dx}{x} = \frac{dz}{z} + \frac{dy}{y}$$

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

2.3.3 Erreur d'une somme

On considère une grandeur X qui s'obtient par la mesure de Y et Z tels que $X = Y + Z$, les nombres Y et Z étant positifs.

Si on suppose que la mesure de Y donne $y \pm dy$ et que la mesure de Z donne $z \pm dz$:

$$(y - dy) + (z - dz) < X < (y + dy) + (z + dz)$$

on a donc: $X = y + z \pm (dy + dz) \Rightarrow dx = dy + dz$

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

2.3.4 Erreur d'une différence

On considère une grandeur X qui s'obtient par la mesure de Y et Z tels que $X = Y - Z$, les nombres Y et Z étant positifs.

Si on suppose que la mesure de Y donne $y \pm dy$ et que la mesure de Z donne $z \pm dz$:

$$(y - dy) - (z + dz) < X < (y + dy) - (z - dz)$$

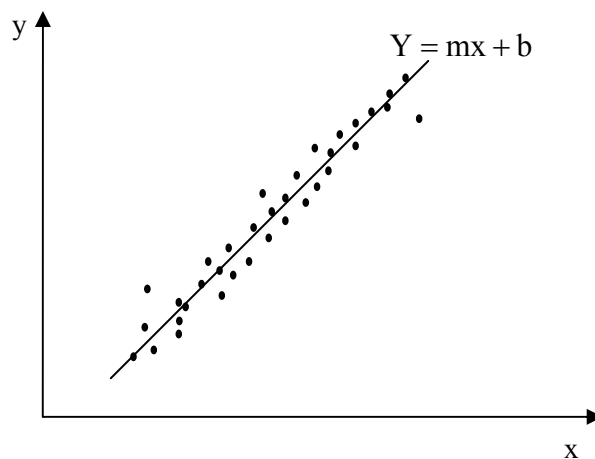
on a donc: $X = y - z \pm (dy + dz) \Rightarrow dx = dy + dz$

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

2.4 REGRESSION LINEAIRE

L'analyse de régression fournit une approche statistique qui permet de corréler des données expérimentales qui dépendent de plusieurs grandeurs mesurées.

Si on mesure une variable y qui décrit le comportement d'un processus et qui dépend de plusieurs variables $x_1, x_2 \dots x_n$ indépendantes ; la méthode des moindres carrés permet de relier par une droite des points dispersés : $Y_i = mx_i + b$ et $y_i = f(x_i)$



Les paramètres m et b sont tels qu'ils minimisent l'écart entre le point et la droite :

$$\Delta^2 = \sum (y_i - Y_i)^2, \text{ en écrivant que } \frac{\partial \Delta^2}{\partial m} = 0 \text{ et } \frac{\partial \Delta^2}{\partial b} = 0 \text{ on obtient :}$$

$$m = \frac{\sum x \sum y - n \sum xy}{(\sum x)^2 - n \sum x^2} \quad \text{et} \quad b = \frac{\sum y - m \sum x}{n} = \frac{\sum x \sum xy - \sum x^2 \sum y}{(\sum x)^2 - n \sum x^2}$$

La dispersion de y est une mesure de la corrélation : si la dispersion est faible l'analyse de régression est adaptée pour décrire la variation de y et si la dispersion est élevée l'analyse de régression n'est pas adaptée.

Le coefficient de corrélation $\rho^2 = 1 - \frac{n-1}{n-2} \frac{[y^2] - m[xy]}{[y^2]}$

avec :

$$[y^2] = \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} \quad \text{et} \quad [xy] = \sum xy - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n}$$

Si $\rho^2 = 1$, x et y sont parfaitement corrélés et si $\rho^2 = 0$, x et y ne sont pas corrélés.

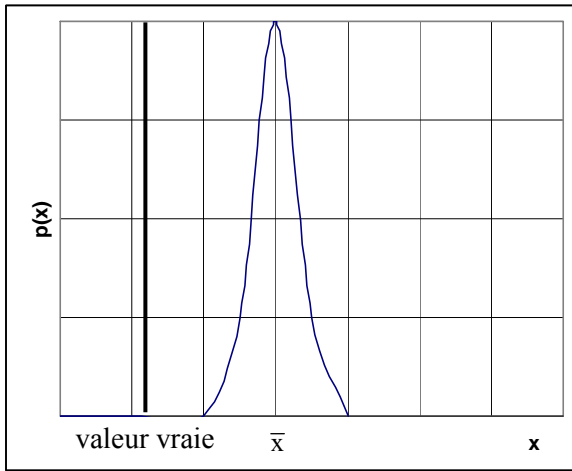
2.5 FIDELITE, JUSTESSE ET PRECISION

La fidélité : elle caractérise un appareil de mesure dont les erreurs aléatoires sont faibles, ce qui se traduit par des résultats de mesure 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 et en permet une appréciation quantitative.

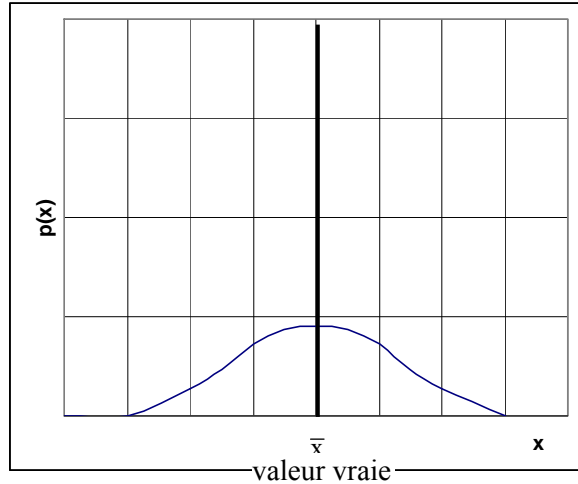
La justesse : elle caractérise un appareil de mesure dont les erreurs systématiques sont faibles. La valeur la plus probable du mesurande déterminée par un tel appareil de mesure est très proche de la vraie valeur.

La précision : elle caractérise un appareil de mesure qui est tel que chaque mesure soit très proche de la valeur vraie du mesurande, un appareil précis est donc à la fois juste et fidèle. La précision peut être spécifiée numériquement comme l'intervalle autour de la valeur mesurée, à l'intérieur duquel on est assuré de trouver la valeur vraie.

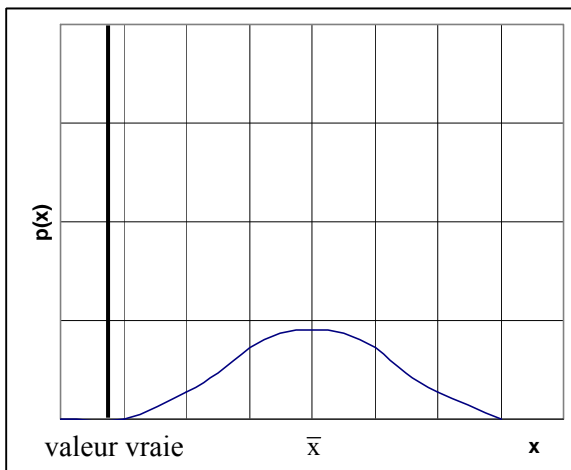
Fidélité + Justesse \Leftrightarrow Précision



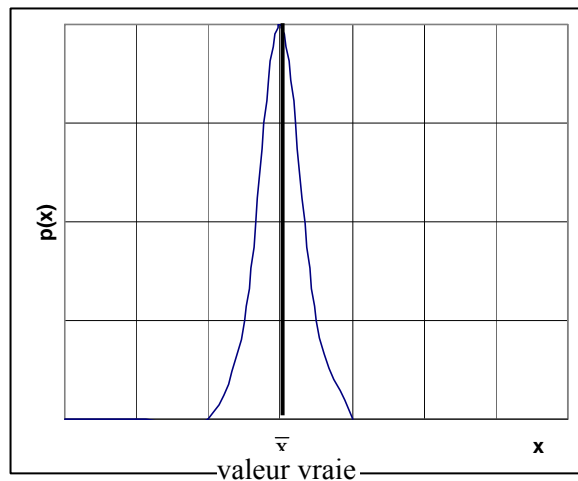
Erreurs systématiques importantes et erreurs aléatoires faibles :
appareil fidèle mais pas juste



Erreurs systématiques faibles et erreurs aléatoires faibles :
appareil juste mais pas fidèle



Erreurs systématiques et aléatoires élevées :
appareil ni juste ni fidèle



Erreurs systématiques et aléatoires faibles :
appareil juste et fidèle donc PRECIS

CHAPITRE 3 : PERFORMANCES DES SYSTEMES DE MESURE

3.1 LE SYSTEME DE MESURE IDEAL

Un système de mesure idéal est tel que le signal de sortie est une fonction linéaire du mesurande, la sortie est une reproduction de l'entrée quelle que soit la manière dont elle varie.

Le système de mesure idéal n'existe pas dans la réalité, c'est un outil théorique qui permet d'évaluer les performances d'un système de mesure donné, en les comparant avec celles qui seraient obtenues par un système idéal, dans les mêmes conditions :

- Les performances statiques d'un système sont obtenues en appliquant un signal d'entrée constant ou en régime permanent et en comparant le signal de sortie avec le cas idéal.
- Les performances dynamiques d'un système sont obtenues en appliquant un signal variable et en comparant le signal de sortie avec le cas idéal.

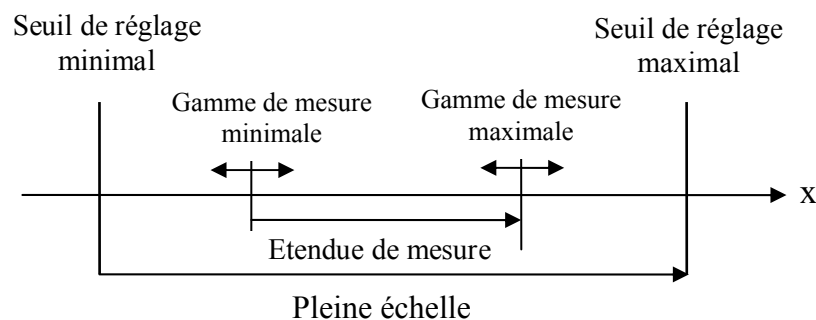
3.2 LES CARACTERISTIQUES STATIQUES D'UN CAPTEUR

3.2.1 Gamme de mesure - Etendue de mesure

La **gamme de mesure** est l'ensemble des valeurs du mesurande pour lesquelles un instrument de mesure est supposé 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**.



3.2.2 La courbe d'étalonnage ou l'étalonnage statique (Static calibration)

Elle est propre à chaque appareil de mesure et permet de transformer la mesure brute en une mesure corrigée. Elle est obtenue en soumettant le capteur à une série de valeurs constantes de la grandeur à mesurer, et à relever avec précision les valeurs correspondantes des grandeurs électriques de sortie, lorsque le régime permanent est atteint. Les résultats obtenus sont présentés sous forme de tableaux ou de graphiques (courbes, abaques ...).

3.2.3 La précision (Accuracy)

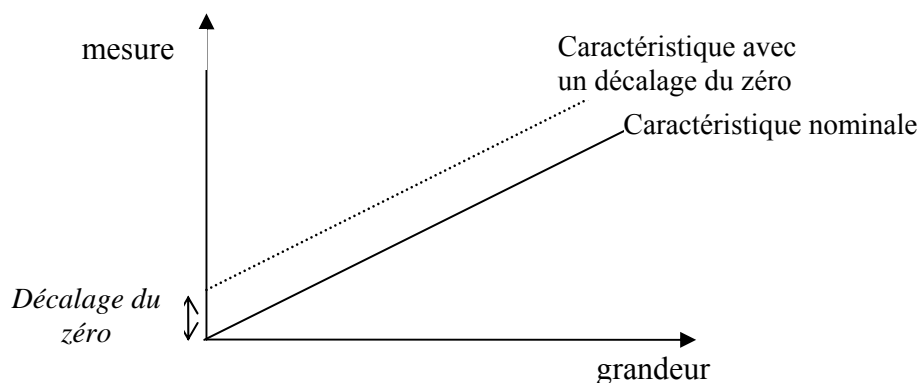
C'est la différence entre la valeur mesurée et la vraie valeur. Elle peut être définie par rapport à la valeur vraie ou par rapport à la pleine échelle, et elle s'exprime en % :

$$\text{précision (par rapport à la valeur vraie)} = \frac{\text{valeur mesurée} - \text{valeur vraie}}{\text{valeur vraie}} \times 100$$

$$\text{précision (par rapport à la pleine échelle)} = \frac{\text{valeur mesurée} - \text{valeur vraie}}{\text{pleine échelle}} \times 100$$

3.2.4 Le décalage du zéro (Bias, Zero-drift)

C'est une variation constante de la sortie après une période de temps, elle peut être due à la variation des conditions climatiques, au changement des conditions électriques, au vieillissement du capteur ...



3.2.5 La linéarité

C'est la déviation maximale de la sortie d'un appareil de mesure par rapport à la courbe d'étalonnage. Dans ce cas, la caractéristique du capteur n'est pas une droite.

3.2.6 La sensibilité (sensitivity)

La sensibilité est une caractéristique déterminante dans le choix d'un capteur, elle est définie par le rapport de la variation de la grandeur de sortie à la variation de la grandeur d'entrée à mesurer, autour d'une valeur constante du mesurande considéré.

La valeur de la sensibilité, dans des conditions d'emploi spécifiées, est généralement fournie par le constructeur. Elle permet à l'utilisateur d'estimer l'ordre de grandeur de la réponse du capteur, connaissant l'ordre de grandeur des variations du mesurande et de choisir le capteur afin que l'ensemble de la chaîne de mesure satisfasse aux conditions de mesure adéquates.

Soit m la valeur à mesurer et s l'indication ou le signal fourni par le capteur. A chaque valeur de m appartenant à l'étendue de mesure, correspond une valeur de s : $s=f(m)$.

La sensibilité autour d'une valeur de m est le rapport S :

$$S = \left(\frac{ds}{dm} \right)_{m=\text{constante}}$$

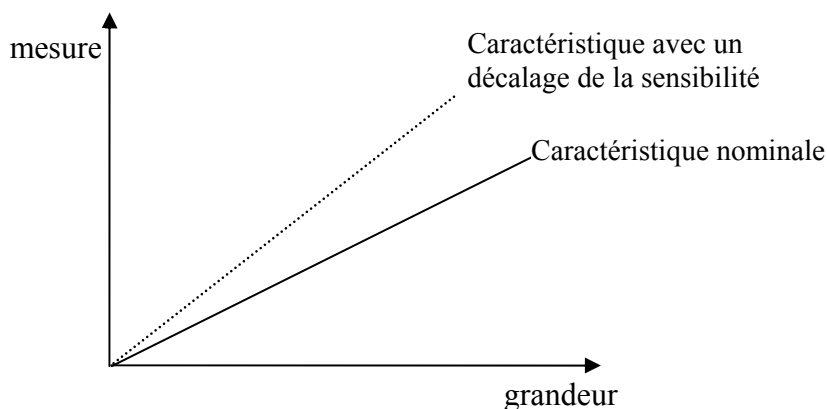
Si la fonction est linéaire, la sensibilité du capteur est constante :

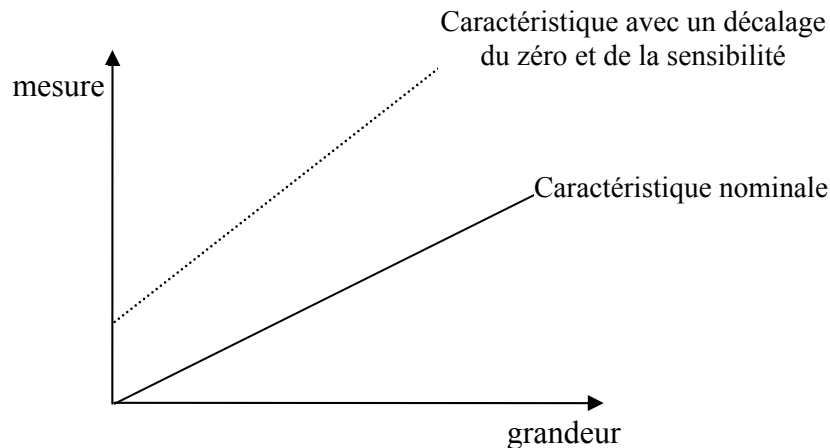
$$S = \left(\frac{\Delta s}{\Delta m} \right)$$

Dans ce cas, la sensibilité en régime statique est égale à la pente de la courbe d'étalonnage du capteur.

3.2.7 Le décalage de la sensibilité (sensitivity drift)

C'est la variation de la sensibilité d'un capteur avec les conditions ambiantes, elle dépend de façon linéaire de la grandeur mesurée. Un appareil de mesure peut présenter un décalage du zéro, un décalage de la sensibilité ou les deux en même temps.





3.2.8 La résolution

La résolution d'un appareil de mesure est la plus faible variation du mesurande qui provoque une variation de la grandeur de sortie du capteur considéré, elle représente la plus petite variation de la grandeur d'entrée que le système de mesure sera capable d'identifier..

Lorsque l'appareil de mesure est un appareil numérique, la résolution est définie par le rapport entre l'étendue de la mesure et le nombre de points de mesure.

3.2.9 La répétabilité (Precision)

La répétabilité est l'étroitesse de l'accord entre les résultats de mesure d'une même grandeur effectuée selon la même procédure, avec le même appareillage, par la même personne, en un même lieu et pendant une durée de temps courte vis à vis de la durée de la mesure.

Attention : Une bonne répétabilité ne signifie pas que le capteur est satisfaisant mais que le processus est répétitif. Par contre, la non-répétabilité est généralement significative d'une mauvaise qualité du capteur, les grandeurs d'influence susceptibles de perturber les résultats de mesure évoluent généralement de manière peu sensible pendant une courte période de temps.

3.2.10 La reproductibilité

C'est une notion qu'il ne faut pas confondre avec la répétabilité. Elle correspond à l'étroitesse de l'accord entre les résultats de mesures d'une même grandeur effectuées avec plusieurs appareils de mesure identiques, par des opérateurs distincts, en des temps et des lieux différents.

La notion de reproductibilité est beaucoup plus significative que celle de répétabilité et représente une des garanties de qualité d'un capteur car les essais de reproductibilité permettent de s'affranchir de plusieurs risques d'erreurs qui peuvent être liés à un dérèglement de l'appareil de mesure, à l'habilité de l'opérateur

3.3 LES CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES D'UN CAPTEUR

Les caractéristiques dynamiques d'un instrument de mesure décrivent son comportement en régime transitoire. Les performances dynamiques d'un tel système sont évaluées à partir de sa réponse à des signaux d'entrée types qui sont le signal échelon, le signal rampe et le signal sinusoïdal.

3.3.1 Le système d'ordre zéro

C'est un système de mesure idéal dont la sortie est proportionnelle à l'entrée. Il est régi par la relation mathématique :

$$s = K.m$$

avec :

- K la sensibilité du système
- s la grandeur de sortie
- m la grandeur d'entrée (le mesurande)

Dans la réalité, le capteur dont le comportement s'approche le système d'ordre zéro est le potentiomètre qui fournit en sortie une tension proportionnelle au déplacement du curseur.

3.3.2 Le système du premier ordre

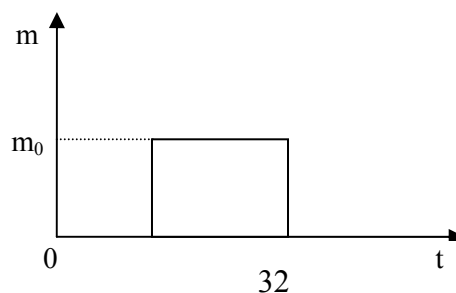
Son comportement est régi par une équation différentielle du premier ordre de la forme :

$$A \frac{ds}{dt} + B.s = m(t)$$

où A et B sont des constantes et m(t) la valeur du mesurande à un instant t.

3.3.2.1 Réponse à un signal échelon

Lorsque le mesurande subit une variation brusque (échelon), l'établissement du régime permanent est précédé d'un régime transitoire qui doit être caractérisé afin de réaliser des mesures correctes. La réponse d'un système du 1^{er} ordre à un signal échelon permet d'obtenir la constante de temps du système.

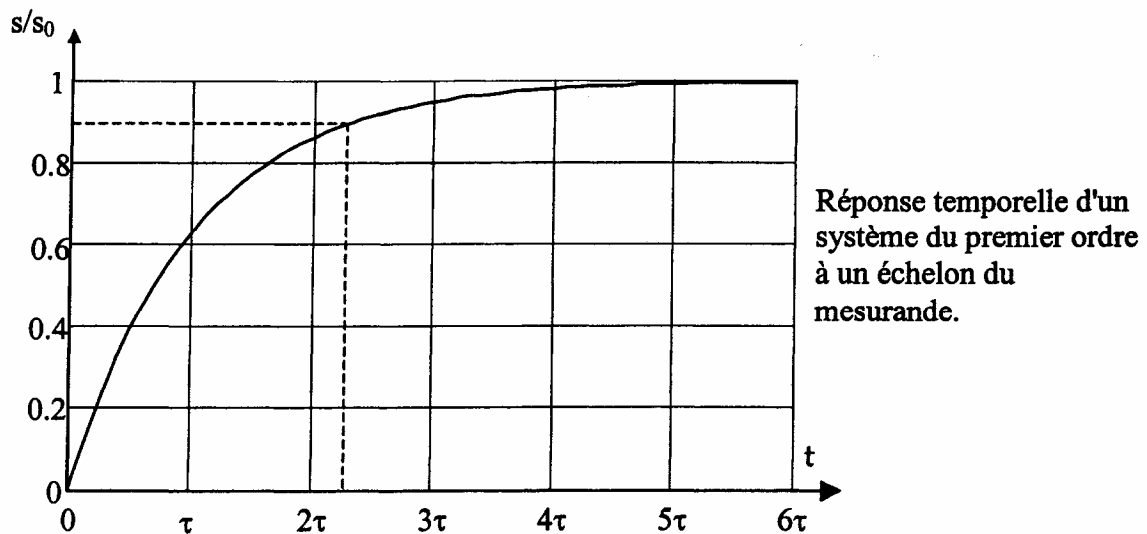


Pour un échelon du mesurande et en supposant que $s=0$ à $t=0$, la solution de l'équation différentielle précédente s'écrit:

$$s = s_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right)$$

avec :

- $s_0 = \frac{m_0}{B}$ la sensibilité du système en régime permanent
- $\tau = \frac{A}{B}$ la constante de temps du système



La grandeur utilisée pour caractériser la rapidité d'un système est le temps de réponse t_r , c'est l'intervalle de temps qui s'écoule après une variation brusque du mesurande (échelon) jusqu'à ce que la variation de sortie ne diffère plus de sa valeur finale d'un écart supérieur à une limite $\varepsilon(\%)$ fixée conventionnellement. Un temps de réponse doit donc toujours être spécifié avec l'écart $\varepsilon(\%)$ auquel il correspond.

Le temps de réponse t_r du système peut être déterminé soit par la représentation graphique ci-dessus, soit à partir de son expression mathématique : $t_r(\varepsilon) = 2.3(2 - \log \varepsilon)\tau$

L'expression du temps de réponse pour différentes valeurs de $\varepsilon(\%)$ est indiquée dans le tableau ci-dessous :

$\varepsilon(\%)$	$t_r(\varepsilon)$
10	2.3τ
5	3.0τ
2	3.9τ
1	4.6τ
0.1	6.9τ

3.3.2.2 Réponse à un signal sinusoïdal

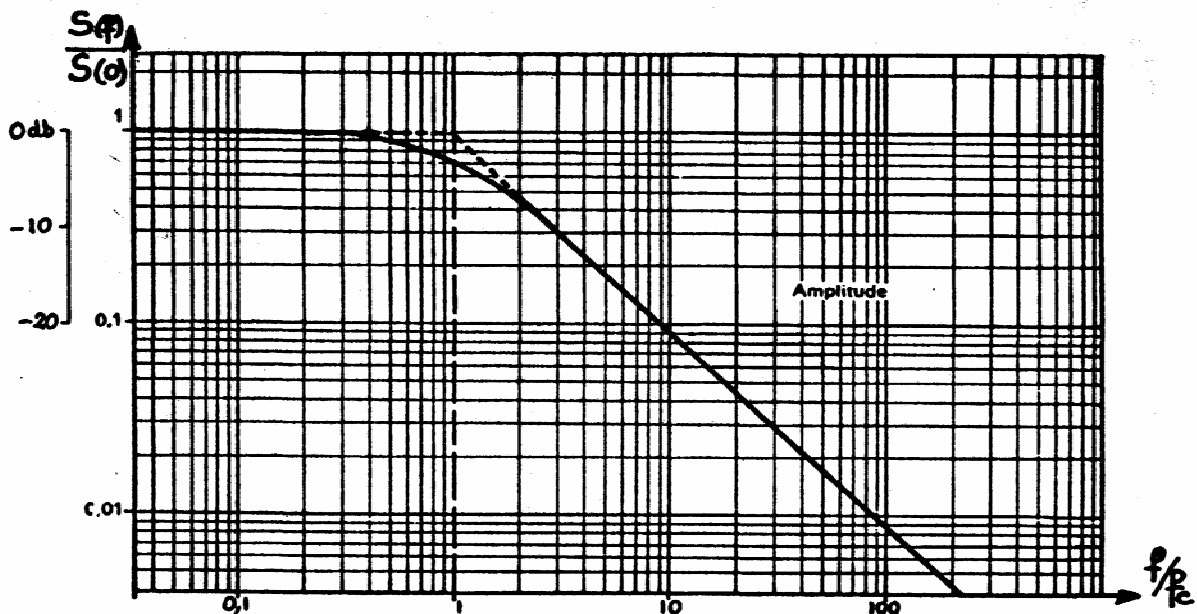
La réponse d'un système à un signal sinusoïdal permet de caractériser la sensibilité en régime dynamique du système.

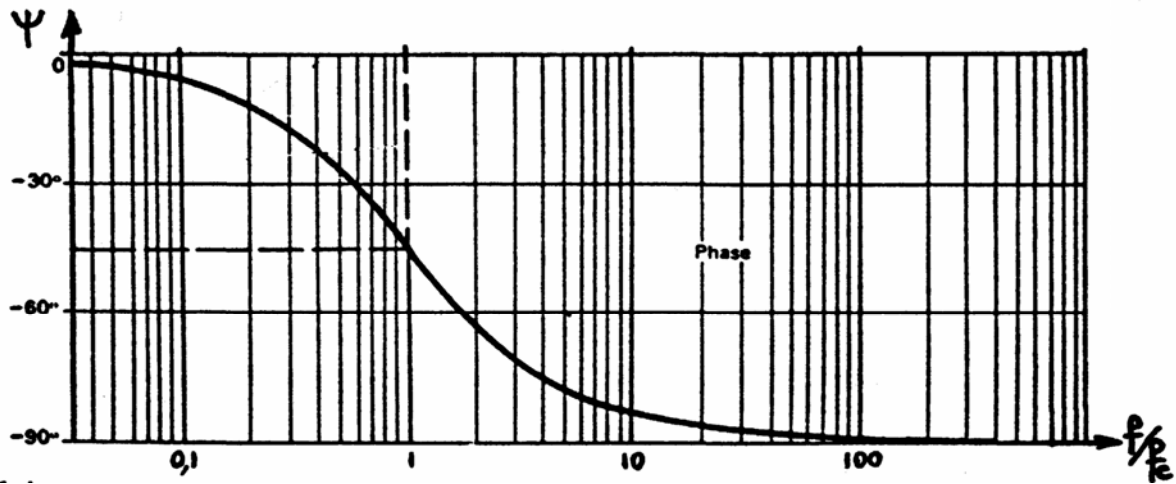
Pour un mesurande sinusoïdal $m(t) = m_1 \cos(\omega t)$ avec m_1 l'amplitude du signal et ω la pulsation (la période $T = \frac{2\pi}{\omega}$ et la fréquence $f = \frac{1}{T}$), la réponse du capteur est de la forme $s(t) = s_1 \cos(\omega t + \psi)$.

L'équation différentielle $A \frac{ds}{dt} + B.s = m(t)$ permet d'écrire la sensibilité en régime dynamique $S(f)$ et le déphasage ψ sous la forme :

$$S(f) = \frac{s_1}{m_1} = \frac{1}{B} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}} \text{ et } \psi = -\text{Arc tan}\left(\frac{f}{f_c}\right), \text{ la fréquence de coupure } f_c = \frac{B}{2\pi A}$$

Lorsque la fréquence $f \rightarrow 0$, la sensibilité en régime dynamique tend vers la sensibilité en régime statique $S(0) = s = \frac{1}{B}$.





3.3.3 Le système du deuxième ordre

Son comportement est régi par une équation différentielle du deuxième ordre de la forme :

$$A \frac{d^2s}{dt^2} + B \frac{ds}{dt} + C.s = m(t)$$

où A, B et C sont des constantes.

Cette équation peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{d^2s}{dt^2} + \frac{B}{A} \frac{ds}{dt} + \frac{C}{A} s = \frac{1}{A} m(t)$$

ou encore :

$$\frac{d^2s}{dt^2} + 2\omega_0 \zeta \frac{ds}{dt} + \omega_0^2 s = K' m(t)$$

avec :

$$\zeta = \frac{B}{2\sqrt{CA}} \text{ le coefficient d'amortissement du système}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C}{A}} \text{ la pulsation propre du système}$$

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \text{ la fréquence propre du système}$$

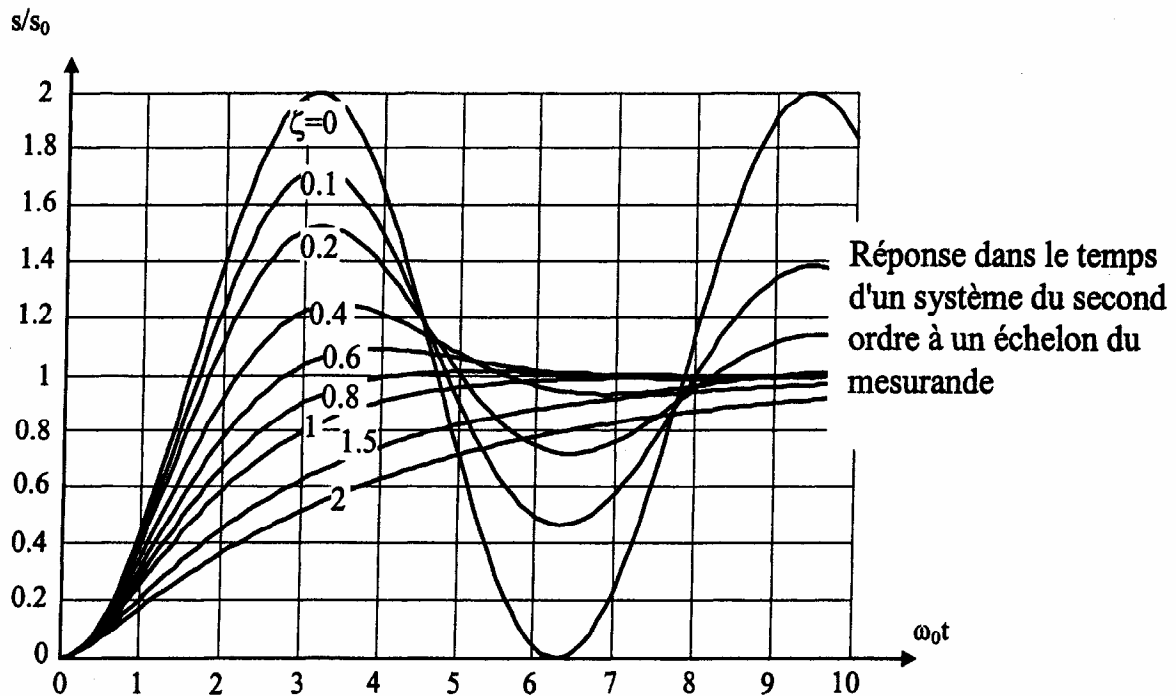
3.3.3.1 Réponse à un signal échelon

Lorsqu'un échelon est appliqué au système, l'équation différentielle précédente s'écrit :

$$A \frac{d^2s}{dt^2} + B \frac{ds}{dt} + C.s = m_0$$

Les conditions initiales du problème étant $s=0$ et $\frac{ds}{dt}=0$ à $t=0$, la forme des solutions dépend de la valeur du coefficient d'amortissement ζ et du produit $\omega_0 t$.

La figure suivante montre la réponse temporelle d'un système du 2^{ème} ordre à un échelon, pour différentes valeurs du coefficient d'amortissement ζ .



Si on cherche à minimiser le temps de réponse du capteur, qui est inversement proportionnel à ω_0 , la valeur optimale de ζ est comprise entre 0.6 et 0.8 (régime périodique transitoire amorti $\zeta < 1$).

3.3.3.2 Réponse à un signal sinusoïdal

Lorsque le mesurande est sinusoïdal, la sensibilité en fonction de la fréquence $S(f)$ est donnée par :

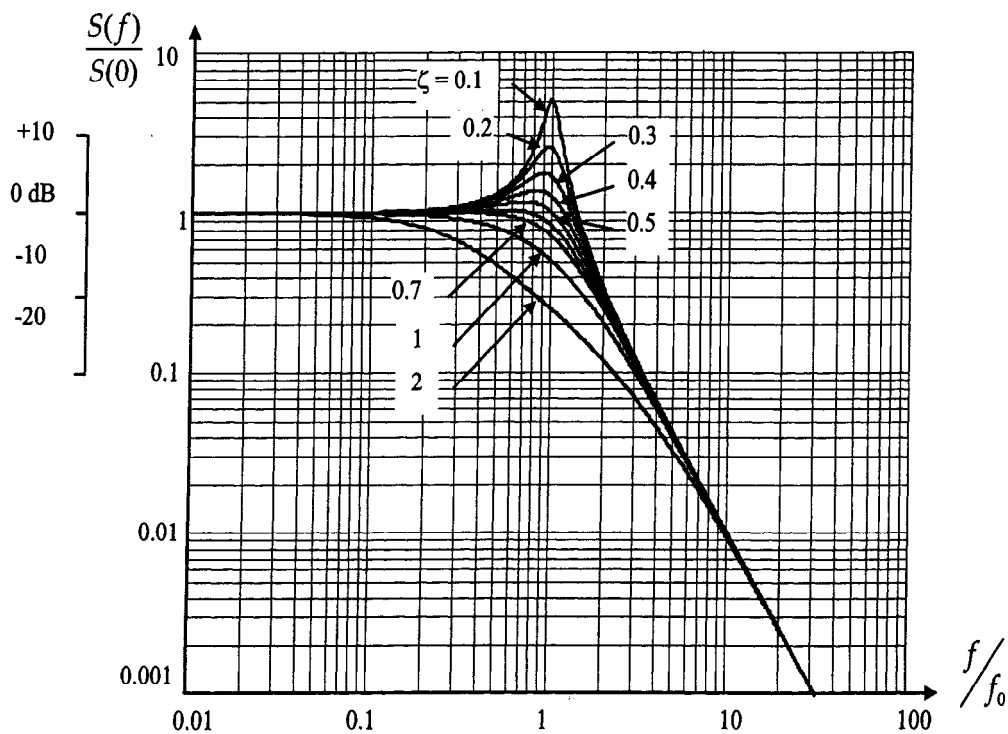
$$S(f) = \frac{s_1}{m_1} = S(0) \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}}$$

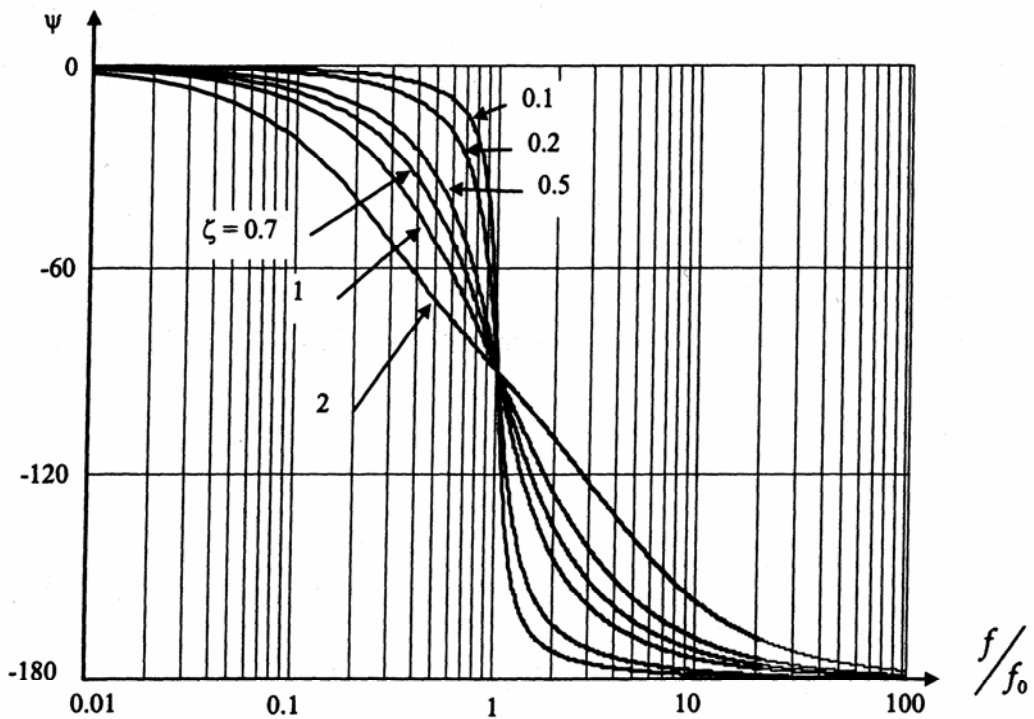
avec $S(0) = \frac{1}{C}$ la sensibilité en régime statique.

Le déphasage en fonction de la fréquence a pour expression :

$$\psi(f) = -\text{Arc tan} \left(\frac{2\zeta}{\frac{f_0}{f} \left(1 - \frac{f}{f_0}\right)^2} \right)$$

La réponse en fréquence d'un système du 2^{ème} ordre, pour les différentes valeurs du coefficient d'amortissement ζ sont présentées sur les figures suivantes.





La réponse en fréquence la plus uniforme a été obtenues pour $\zeta = 0.7$, et c'est pour des valeurs de ζ comprises entre 0.6 et 0.7 que le temps de transmission est le plus constant dans plage étendue de fréquence.

Un coefficient d'amortissement du capteur compris entre 0.6 et 0.7 afin d'assurer à la fois :

- une réponse en fréquence d'amplitude quasi-constante dans une bande relativement étendue.
- Une distorsion de phase réduite
- Un temps de réponse minimal

Deuxième partie :

Les capteurs de température

CHAPITRE 4 : LES THERMOMETRES A DILATATION

4.1 INTRODUCTION

La température est une grandeur différente des autres grandeurs physiques (longueur, masse, ...) qui sont des grandeurs extensives qu'on peut définir numériquement par rapport à une grandeur de même nature prise comme référence. La température est une grandeur intensive, multiplier ou diviser une température n'a pas, à priori, de signification physique évidente.

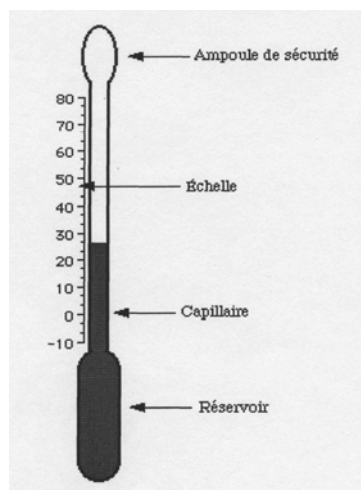
La température est une grandeur abstraite, elle définie est définie en termes de changement de comportement des matériaux lorsqu'ils sont soumis à un changement de température. Du nombre important de propriétés de la matière et de phénomènes physiques sensibles à la température, résulte une grande diversité de méthodes de mesure de la température.

Dans ce chapitre, c'est la dilatation des corps sous l'effet de l'augmentation de la température qui sera l'image de la grandeur thermométrique. La dilatation étant un phénomène réversible, elle fournit un mode pratique de mesure des températures. Ce phénomène se retrouve de manière analogue, mais avec une ampleur différente pour les liquides, les gaz et les solides. D'où les trois types de thermomètres à dilatation qui font l'objet de ce chapitre.

4.2 LE THERMOMETRE A DILATATION DE LIQUIDE

4.2.1 Description

Il est constitué d'un réservoir surmonté d'un capillaire de section faible et régulière (l'ordre de grandeur est de 0.2 mm) se terminant par une ampoule de sécurité. Il est réalisé en verre. Sous l'effet des variations de température, le liquide se dilate de manière plus ou moins importante. Son niveau est repéré à l'aide d'une échelle thermométrique gravée sur l'enveloppe.



4.2.2 Loi de variation

La loi de variation du volume du liquide en fonction de la température s'écrit :

$$V = V_0(1 + aT)$$

avec :

- V_0 le volume du liquide à 0°C
- V le volume du liquide à $T(^\circ\text{C})$
- a le coefficient de dilatation du liquide ($^\circ\text{C}^{-1}$)

4.2.3 Liquides thermométriques

Le liquide le plus utilisé est le mercure mais d'autres liquides sont quelquefois employés :

Liquide	Domaine d'emploi ($^\circ\text{C}$)	a ($^\circ\text{C}^{-1}$)
Pentane	-200 à +20	-
Alcool éthylique	-110 à +100	1.17
Toluène	-90 à +100	1.03
Mercure	-38 à +650	0.182

L'espace libre au dessus du liquide peut être vide mais pour empêcher la colonne de liquide de se fractionner facilement et pour permettre la mesure des hautes températures, l'espace libre est rempli d'un gaz neutre (azote ou argon) et mis sous une pression fonction de la température à mesurer. Par exemple, pour un thermomètre à mercure prévu pour mesurer une température de 600°C , la pression de l'azote est de 20 bars. La chambre d'expansion évite les trop fortes variations de pression.

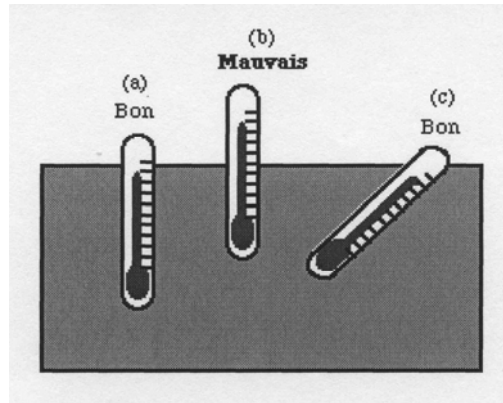
4.2.4 Nature de l'enveloppe

Le matériau constituant l'enveloppe du thermomètre dépend de la température à mesurer :

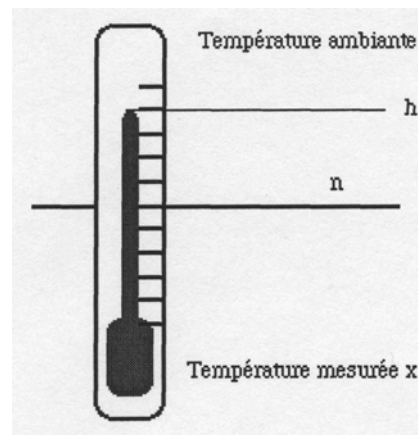
- jusqu'à 450°C : verre d'Iena
- jusqu'à 630°C : verre Supremax
- jusqu'à 1000°C : silice pure fondue

4.2.5 Colonne émergente

Il faut corriger la mesure de la température s'il n'est pas possible d'immerger complètement le thermomètre. Comme le montre la figure suivante, dans les cas (a) et (c) la colonne de liquide thermométrique est totalement immergée dans l'enceinte dont on mesure la température. La dilatation du liquide se fait donc pleinement.



Par contre, dans le cas (b), la colonne de liquide est immergée jusqu'à la graduation n , dans l'enceinte de température inconnue x et la partie de la colonne située entre les graduations n et h est en contact avec la température ambiante.



Si on note v le volume correspondant à une graduation, le volume V à la température ambiante T a pour expression :

$$V = (h - n)v$$

La correction à apporter est donc :

$$dh = \frac{dV}{v} = a(h - n)(x - T)$$

En réalité, la partie émergée n'est pas tout à fait à la température ambiante, dans la pratique on prend les 7/10 de la correction calculée. Cette correction n'étant pas très précise, il faut, dans la mesure du possible, positionner au mieux le thermomètre (selon les configurations a et c).

Ces thermomètres sont très simples à utiliser, ils peuvent être également précis mais ils présentent deux inconvénients, leur temps de réponse est élevé et ils sont à lecture directe, ce qui nécessite la présence d'un opérateur pour réaliser les mesures. Ils ne sont pas adaptés à l'enregistrement et à l'acquisition de données et ne peuvent pas être utilisés pour des mesures sur une longue période de temps ou pour de la régulation. Ce dernier inconvénient est commun à tous les thermomètres à dilatation.

4.3 LE THERMOMETRE A DILATATION DE GAZ

4.3.1 Principe

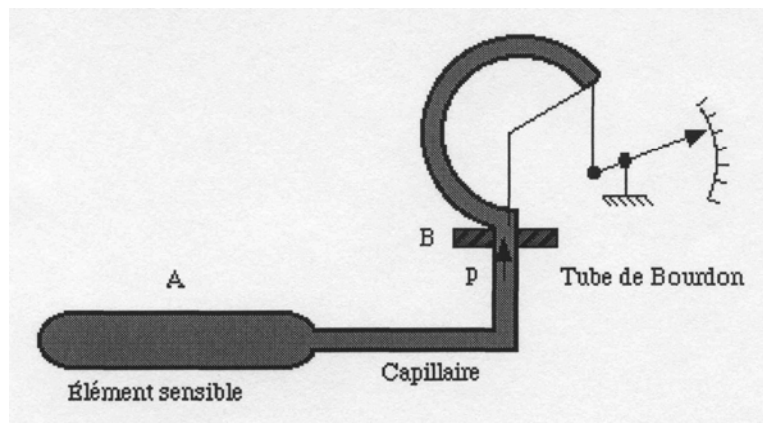
L'équation d'un gaz parfait s'écrit : $PV = nRT$, avec :

- P la pression (Pa)
- T la température (K)
- R la constante des gaz parfaits ($8.31 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
- n le nombre de moles

Si on enferme une certaine quantité de gaz dans une enveloppe de volume constant V, la pression développée par le gaz est proportionnelle à la température, c'est le principe sur lequel repose le thermomètre à dilatation de gaz.

4.3.2 Description

De manière schématisée, un thermomètre à gaz est composé d'une sonde A qui représente l'enveloppe dans laquelle est enfermé le gaz thermométrique. Cette sonde est reliée par un tube de raccordement de faible section à l'extrémité B fixe d'un tube de Bourdon, appelé également spirale de mesure. La longueur du tube de raccordement ne doit pas dépasser 100 m.



Sous l'effet de la variation de la température du milieu dans lequel est placée la sonde, la pression du gaz varie, ce qui modifie l'extrémité libre du tube de Bourdon. Cette variation de pression se traduit par un mouvement de rotation de l'index indicateur qui se déplace devant un cadran portant des graduations thermométriques. Les gaz les plus employés sont l'hélium, l'hydrogène, l'azote et le gaz carbonique.

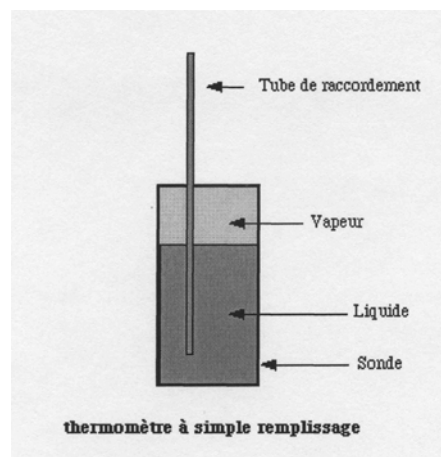
L'avantage des thermomètres à gaz est leur précision, qui est de l'ordre de 1% en mesures industrielles. Ils sont très adaptés pour mesurer les très basses températures (jusqu'à -268°C pour l'hélium et -240°C pour l'hydrogène). Certains de ces thermomètres sont de véritables instruments de précision auxquels on a recours pour les déterminations des températures de référence, tels que le thermomètre à hydrogène. Leur principal inconvénient est que la dimension de la sonde est d'assez grande dimension.

4.4 LE THERMOMETRE A TENSION DE VAPEUR

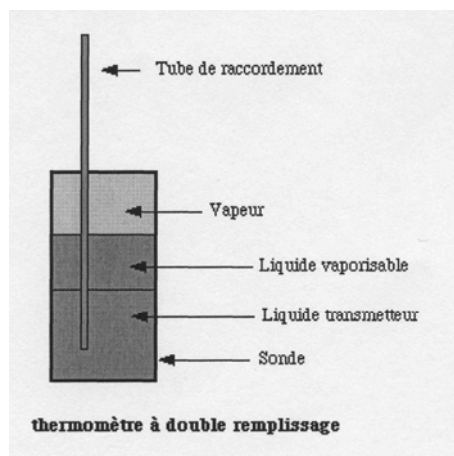
4.4.1 Principe

On appelle tension de vapeur d'un liquide pur, la pression sous laquelle ce liquide est en équilibre avec sa vapeur saturante. Pour un liquide donné, la tension de vapeur n'est fonction que de la température. La mesure de la tension de vapeur d'un liquide permet donc de connaître sa température, la mesure thermométrique se fait donc par l'intermédiaire d'une mesure de pression.

La réalisation la plus simple est celle du thermomètre à simple remplissage présenté sur la figure ci-dessous. L'élément sensible est une sonde analogue à celle du thermomètre à gaz mais le tube de raccordement est plongé dans la sonde. La sonde, le tube de raccordement et l'élément de mesure sont remplis de liquide vaporisable. Lorsque la sonde est placée dans une enceinte chaude, une partie du liquide se vaporise. Un équilibre liquide/vapeur, fonction de la température, s'établit. En même temps, la pression augmente pour se fixer à la valeur de la tension de vapeur du liquide. Cette pression est transmise par le liquide à un manomètre de mesure.



La vaporisation se faisant toujours au point le plus chaud du système fermé, les capteurs à simple remplissage ne sont utilisables que si la sonde est à une température supérieure à la température ambiante, sinon la vaporisation se ferait dans le capteur de pression. Pour pallier cet inconvénient et effectuer des mesures de températures inférieures et supérieures à la température ambiante, on utilise une sonde à double remplissage (voir figure suivante). Le liquide vaporisable est placé dans la zone médiane de la sonde et c'est un liquide non évaporable, appelé liquide transmetteur, qui est placé dans le fond de la sonde et dans l'ensemble capillaire-capteur de pression. Ce liquide, qui transmet au manomètre la pression de la vapeur est soit de l'huile, soit de la glycérine.



L'avantage de ces thermomètres est qu'ils sont très sensibles, l'inconvénient est que la position de la sonde par rapport au capteur peut influencer la mesure.

4.4.2 Liquides de remplissage et domaines d'utilisation

Ils sont rassemblés dans le tableau suivant :

Liquide	Domaine d'utilisation	
	Température (°C)	Pression (bars)
Ammoniac	-20 à +60	2 à 25
Propane	0 à 100	5 à 45
Butane	+20 à +140	2 à 30
Chlorure d'éthyle	+30 à +180	2 à 50
Alcool méthylique	+60 à +220	1 à 53
Benzène	+80 à +280	1 à 43

4.5 LE THERMOMETRE A DILATATION DE SOLIDE

4.5.1 Principe

Lorsqu'une tige métallique est soumise à une variation de température, sa longueur varie. Cette loi de variation s'écrit sous la forme : $L = L_0(1 + \alpha T)$, avec :

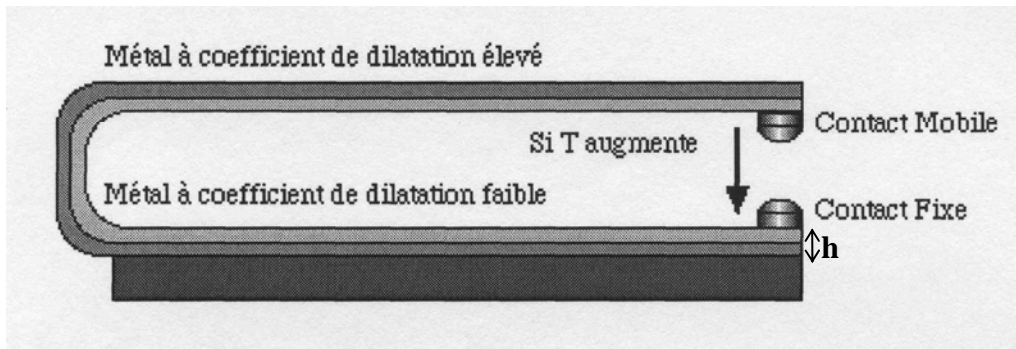
- L la longueur de la tige à la température T (°C)
- L_0 la longueur de la tige à 0°C
- α le coefficient de dilatation linéaire du métal (°C⁻¹)

La dilatation linéaire du métal peut donc servir de grandeur thermométrique, c'est le principe sur lequel reposent les thermomètres à dilatation de solide. Les métaux les plus utilisés sont le platine ($\alpha = 9 \cdot 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$), le Zinc ($\alpha = 30 \cdot 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$) et l'Invar qui est un alliage de Fer et de Nickel ($\alpha = 2 \cdot 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$).

4.5.2 Le bilame (bi-metallic-strip thermometer)

Le thermomètre bilame est constitué de deux bandes de métaux dont les coefficients de dilatation sont très différents, soudés à plat sur toute leur surface. La soudure des deux constituants doit être réalisée de manière à ce que le contact soit parfait et que la zone de jonction soit mécaniquement aussi résistante que chacune des deux lames.

Lorsque le bilame est soumis à une variation de température, les dilatations des deux lames provoquent des tensions, il en résulte une incurvation de l'ensemble.



Si on note h_1 l'épaisseur de la lame de coefficient de dilatation élevé α_1 , et h_2 l'épaisseur de la lame de coefficient de dilatation faible α_2 , le rayon de courbure du bilame d'épaisseur h ($h = h_1 + h_2$) a pour expression :

$$\rho = \frac{h \cdot \left(3(1 + r_h)^2 + (1 + r_h r_e) \left(r_e^2 - \frac{1}{r_h r_e} \right) \right)}{6(\alpha_1 - \alpha_2)(1 + r_h) \Delta T}$$

avec :

$$r_h = \frac{h_2}{h_1} \text{ le rapport des épaisseurs}$$

$$r_e = \frac{E_2}{E_1} \text{ le rapport des modules d'élasticité}$$

La sensibilité des bilames est améliorée en minimisant l'épaisseur h et en augmentant l'écart entre α_1 et α_2 , ce qui revient à prendre des métaux dont les coefficients de dilatation sont les plus différents possibles.

Les bilames sont très utilisés comme thermostats : lorsque la température souhaitée est atteinte, le contact fixe touche le contact mobile qui joue alors le rôle d'un interrupteur de courant. C'est le cas, par exemple, du thermostat du fer à repasser.

CHAPITRE 5 : LES THERMOMETRES ELECTRIQUES

5.1 INTRODUCTION

Les thermomètres électriques présentent l'avantage d'une grande souplesse d'emploi et d'exploitation (le signal électrique délivré est transmissible et enregistrable), tout en étant suffisamment précis, aussi bien pour des utilisations industrielles qu'en laboratoire.

Leur fonctionnement est basé sur la variation de la résistance d'un métal ou d'un semi-conducteur en fonction de la température. Les lois de variation étant très régulières, il est possible de les utiliser pour déterminer les températures par des mesures de résistance. Cependant, ces lois étant très différentes selon qu'il s'agisse d'un métal ou d'un semi-conducteur, deux types de capteurs ont été distingués selon les appellations respectives de thermomètre à résistance (*Resistance Temperature Detector RTD*) d'une part, et de thermistance (*Thermistor*) d'autre part.

5.2 LES THERMOMETRES A RESISTANCE

5.2.1 Principe

La résistance électrique d'un conducteur métallique augmente avec la température. Cette variation étant parfaitement réversible, on peut établir une relation $R=f(T)$ entre la résistance R et la température $T(^{\circ}\text{C})$ sous la forme :

$$R = R_0 (1 + aT + bT^2 + cT^3)$$

avec :

- R_0 la résistance à 0°C
- a , b et c des coefficients de température positifs, spécifiques au métal considéré.

Les coefficients a , b et c de la loi de variation de R ayant été préalablement déterminés par un ensemble de mesures à températures connues, la mesure de R permet de déduire la température.

Pour de petites variations ΔT autour de la température T , la loi de variation de la température peut être linéarisée :

En écrivant $\frac{dR}{dT} = \frac{R(T + \Delta T) - R(T)}{\Delta T}$, on obtient $R(T + \Delta T) = R(T) \cdot (1 + \alpha_R \Delta T)$

avec $\alpha_R = \frac{1}{R(T)} \frac{dR}{dT}$ la **sensibilité thermique du capteur** à la température T .

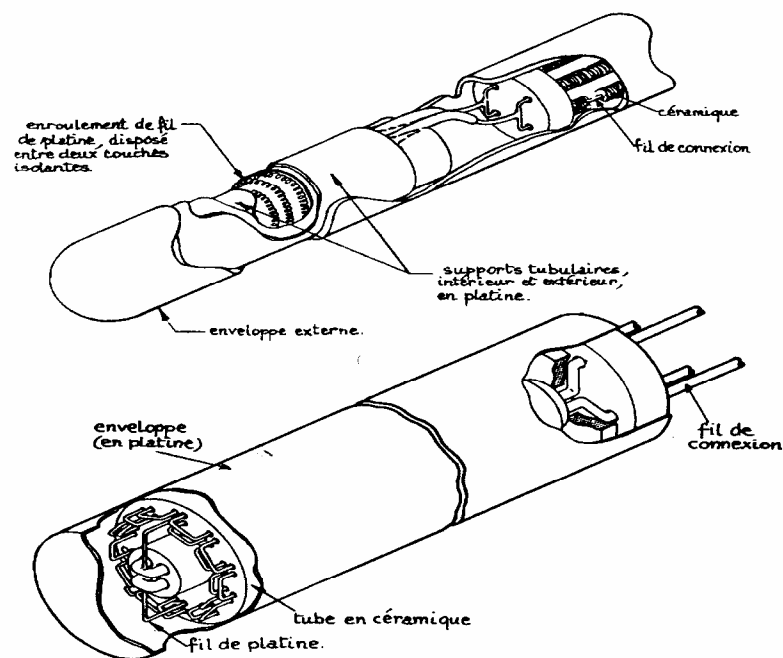
5.2.2 Critères de choix du métal

Selon le domaine d'application et les qualités particulières recherchées, les résistances sont réalisées en platine, en nickel, et plus rarement en cuivre ou en tungstène :

- Le platine peut être obtenu avec une très grande pureté (99.999%), ce qui lui confère des propriétés mécaniques et électriques très stables.
- Le nickel possède une sensibilité thermique élevée mais ses propriétés électriques et mécaniques beaucoup moins stables limitent son utilisation à des températures inférieures à 250°C.
- L'avantage du cuivre est la linéarité de la loi de variation de la résistance, mais il ne peut pas être employé au delà de 180°C pour des raisons de stabilité.
- La sensibilité thermique du tungstène est supérieure à celle du platine au dessus de 100K et il est utilisable à des températures plus élevées que le platine avec une linéarité supérieure, mais sa stabilité est inférieure à celle du platine.

Métal	Résistivité à 0°C ($\mu\Omega.cm$)	Point de fusion (°C)	Domaine d'application
Cuivre	7	1083	-190 à +150°C
Nickel	6.38	1453	-60 à +180°C
Platine	9.81	1769	-250 à +1100°C
Tungstène	1.72	3380	-269 à +27°C

Le matériau le plus utilisé est le platine, qui est généralement encapsulé avec de la céramique et placé dans une gaine d'acier étanche. La résistance est de 100 Ω à 0°C, ces thermomètres sont donc généralement appelés des sondes Pt 100.



5.3 LES THERMISTANCES

5.3.1 Principe

Les thermistances sont des capteurs de température dont la sensibilité thermique est très élevée, de l'ordre de 10 fois celle des capteurs à résistance. Leurs coefficients de température sont généralement négatifs et dépendent fortement de la température.

Elles sont constituées à partir de mélanges d'oxydes métalliques semi-conducteurs tels que les oxydes de Nickel, de Cobalt ou de Manganèse. Contrairement aux métaux, la résistance des semi-conducteurs diminue lorsque la température augmente.

Les thermistances sont disponibles sous des formes variées : disques, petits cylindres, anneaux, perles, l'élément sensible pouvant être ou non protégé par enrobage ou encapsulage. Les valeurs élevées de la résistivité des matériaux employés permettent d'obtenir des résistances de valeurs appropriées avec de faibles quantités de matière et donc des dimensions réduites (de l'ordre du mm). Il en résulte un faible encombrement permettant la mesure quasi-punctuelle de la température.

5.3.2 Relation résistance-température

La résistance d'une thermistance en fonction de la température s'écrit :

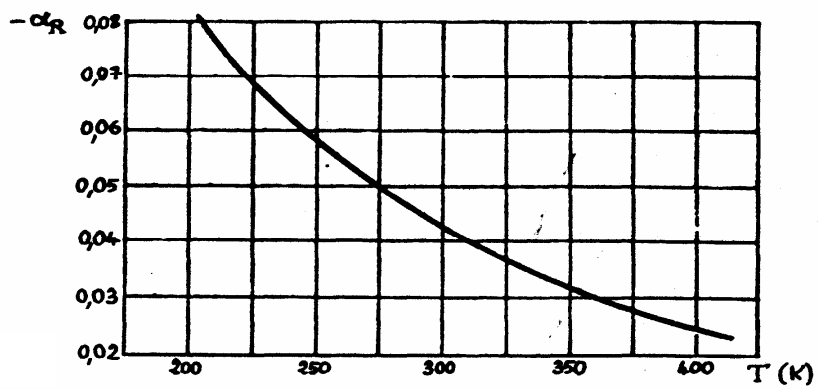
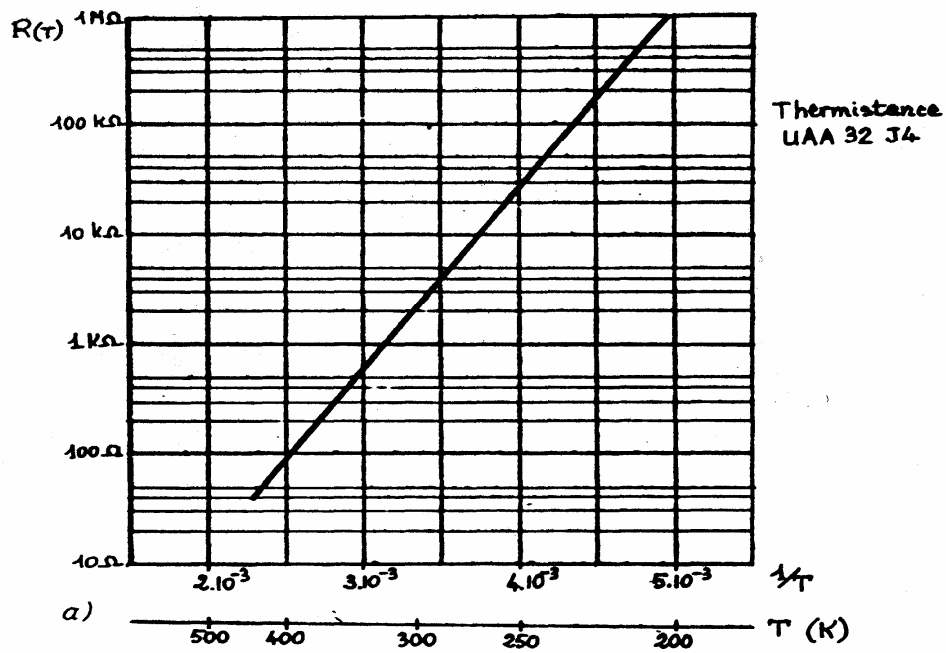
$$R(T) = R_0 \exp\left(\beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right)$$

avec :

- R_0 la résistance à la température T_0
- β un coefficient qui dépend de la température, compris généralement entre 3000 et 5000 K.

La sensibilité thermique a pour expression : $\alpha_R = -\frac{\beta}{T^2}$

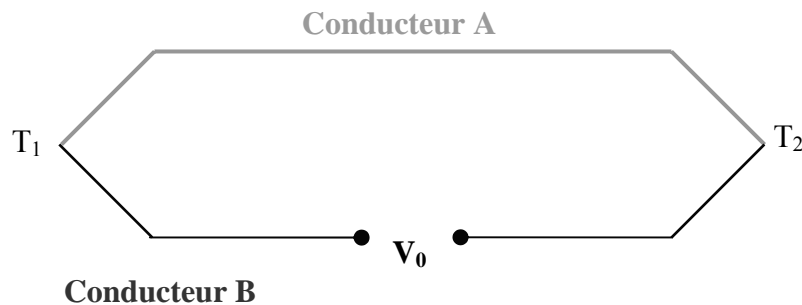
Les figures suivantes présentent la variation en fonction de la température de la résistance et de la sensibilité thermique d'une thermistance, sur une échelle semi-logarithmique. Elles montrent que la résistance et la sensibilité thermique varient de manière inversement proportionnelle à la température. La sensibilité des thermistances est très importante pour les basses températures et elles sont particulièrement adaptées à la détection et la mesure des très faibles variations de température (de 10^{-4} à 10^{-3} K). Elles peuvent être utilisées sans problèmes majeurs de stabilité jusqu'à environ 200°C , au delà il faut utiliser des matériaux spéciaux tel que le carbure de silice. Les variations de la résistance en fonction de la température étant très importantes, on utilise une thermistance donnée pour un intervalle de mesure de 50 à 100°C . Lorsque l'intervalle de mesure est plus étendu, il faut utiliser successivement des thermistances différentes dont les résistances sont convenablement choisies.



CHAPITRE 6 : LES THERMOCOUPLES

6.1 PRINCIPE

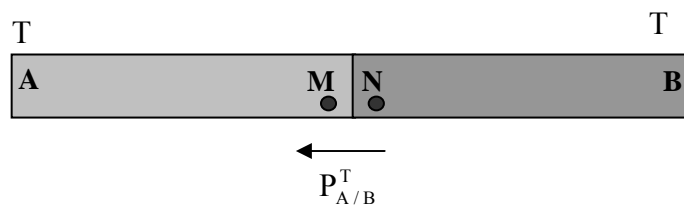
Un thermocouple constitué de deux conducteurs A et B de nature différente, dont les jonctions sont à des températures T_1 et T_2 délivre une f.e.m V_0 qui dépend d'une part de la nature de A et B, et d'autre part des températures des deux jonctions. En général, la température de l'une des jonctions est fixe, connue et sert de référence ($T_1=T_{ref}$), tandis que l'autre jonction est placée dans le milieu dont on cherche à mesurer la température. La jonction à la température T_1 est également appelée soudure froide et celle à la température T_2 soudure chaude.



6.2 LES EFFETS THERMOELECTRIQUES

Le fonctionnement des thermocouples est basé sur plusieurs phénomènes thermo-électriques.

6.2.1 L'effet Peltier



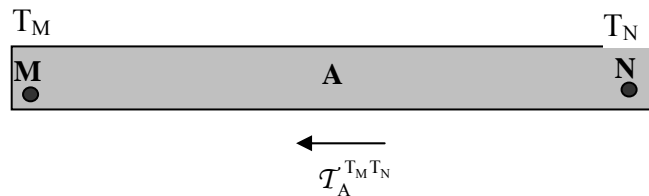
A la jonction de deux conducteurs A et B différents mais à la même température T , s'établit une différence de potentiel qui ne dépend que de la nature des conducteurs et de leur température, c'est la f.e.m de Peltier :

$$V_M - V_N = P_{A/B}^T$$

Loi de Volta : dans un circuit isotherme constitué de conducteurs différents, la somme des f.e.m de Peltier est nulle. On a donc :

$$V_M - V_N = P_{A/B}^T$$

6.2.2 L'effet Thomson

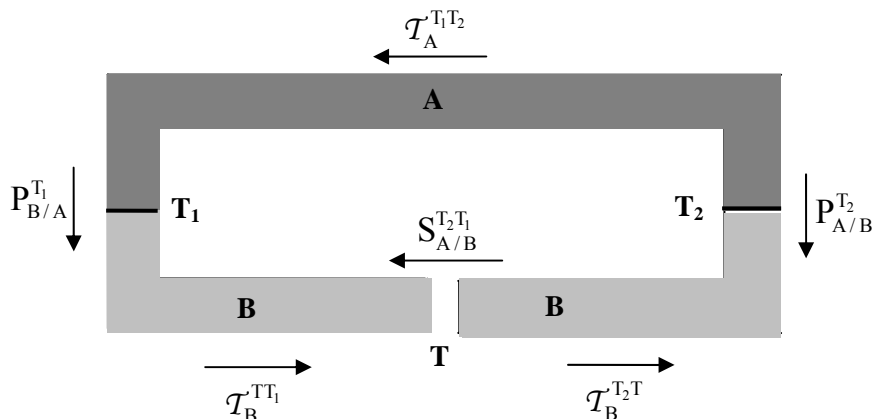


Entre deux points M et N de températures différentes T_M et T_N qui se trouvent à l'intérieur d'un conducteur A homogène, s'établit une force électromotrice, qui ne dépend que la nature du conducteur et des températures T_M et T_N , c'est la f.e.m de Thomson :

$$\mathcal{T}_A^{T_M T_N} = \int_{T_N}^{T_M} h_A dT$$

avec h_A le coefficient de Thomson du conducteur qui dépend de la température.

6.2.3 L'effet Seebeck



On considère le circuit électrique fermé ci-dessus, constitué des deux conducteurs A et B dont les jonctions sont aux températures T_1 et T_2 . ce circuit constitue un couple thermoélectrique et est le siège d'une f.e.m dite de Seebeck $S_{A/B}^{T_2 T_1}$ qui résulte des effets de Peltier et de Thomson qui s'y produisent :

$$S_{A/B}^{T_2 T_1} = \mathcal{T}_B^{T_2 T} + P_{A/B}^{T_2} + \mathcal{T}_A^{T_1 T_2} + P_{B/A}^{T_1} + \mathcal{T}_B^{T T_1}$$

ou encore :

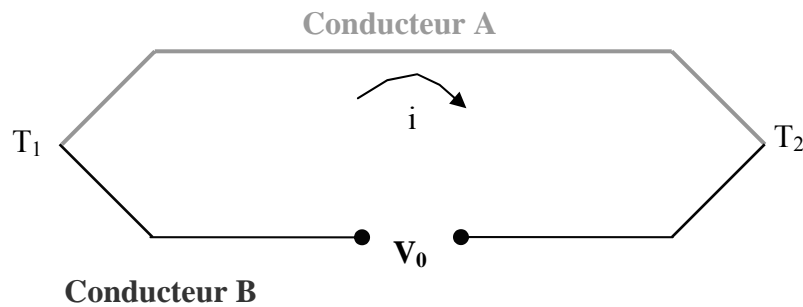
$$S_{A/B}^{T_2 T_1} = (\mathcal{T}_B^{T_2 T_1} - \mathcal{T}_A^{T_2 T_1}) + (P_{A/B}^{T_2} - P_{A/B}^{T_1})$$

Si par convention on choisit pour l'une des températures, T_1 par exemple, une valeur de référence déterminée (généralement 0°C), la f.e.m ne dépend que de la température T_2 , pour un couple de conducteurs A et B donnés.

6.3 PRINCIPES PRATIQUES D'UTILISATION DES THERMOCOUPLES

L'utilisation pratique des thermocouples repose sur les six principes suivants :

1- Un thermocouple doit contenir au moins 2 matériaux et 2 jonctions



La différence de potentiel V_0 est une fonction non linéaire de la différence de températures ($T_1 - T_2$) des deux jonctions :

$$V_0 = e_{B/A} T_1 + e_{A/B} T_2$$

avec :

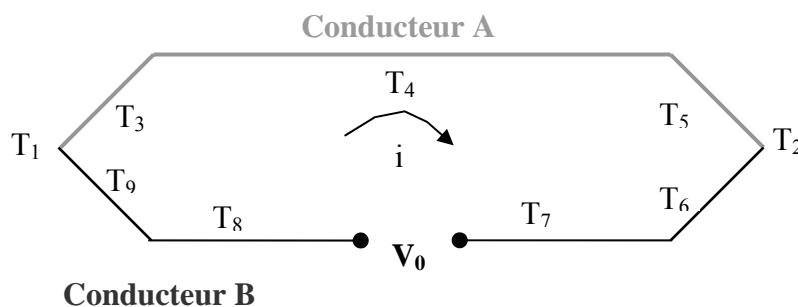
- $e_{B/A}$ le potentiel à la jonction par unité de température à la jonction quand le courant circule de B vers A
- $e_{A/B}$ le potentiel à la jonction par unité de température à la jonction quand le courant circule de A vers B

Etant donné que $e_{A/B} = -e_{B/A}$, on obtient :

$$V_0 = e_{B/A} (T_1 - T_2)$$

Attention : Cette relation n'est pas linéaire, $e_{B/A}$ dépend de la température.

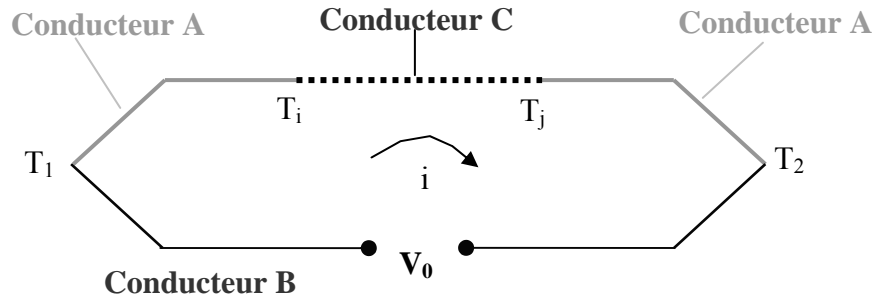
2- V_0 dépend uniquement de la nature des conducteurs A et B et de la différence de température ($T_1 - T_2$) des jonctions.



$$V_0 = f(T_1 - T_2)$$

3- Loi des métaux intermédiaires :

Quand on introduit un 3^{ème} conducteur dans le circuit comprenant le couple A/B, la f.e.m dont le circuit est le siège ne change pas à condition que les extrémités du conducteur ajouté soient à la même température.



En effet :

$$V_0 = e_{B/A} T_1 + e_{A/C} T_i + e_{C/A} T_j + e_{A/B} T_2$$

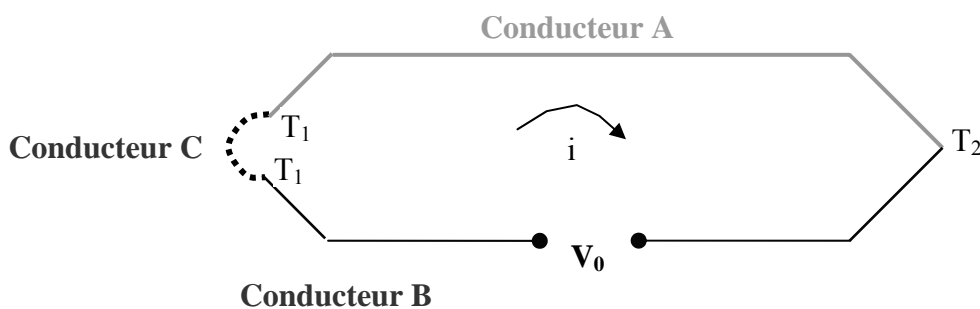
Etant donné que $e_{A/B} = -e_{B/A}$ et $e_{A/C} = -e_{C/A}$, on obtient :

$$V_0 = e_{B/A} (T_1 - T_2) + e_{A/C} (T_i - T_j)$$

Les effets du conducteur introduit dans le circuit sont donc éliminés si $T_i = T_j$.

Cette conclusion est valable quel que soit le nombre de conducteurs introduits, à condition que leurs extrémités soient deux à deux à la même température.

4- L'insertion d'un conducteur dans une jonction n'affecte pas V_0 si ses deux extrémités sont maintenues à la température de la jonction.



En effet :

$$V_0 = e_{B/C} T_1 + e_{C/A} T_1 + e_{A/B} T_2, \text{ et compte tenu du fait que } \begin{cases} e_{C/A} = e_{C/B} + e_{B/A} \\ e_{B/A} = e_{B/C} + e_{C/A} \end{cases}$$

$$\text{on obtient : } V_0 = e_{B/A} (T_1 - T_2)$$

Cette conclusion est valable quel que soit le nombre de conducteurs introduits, à condition que leurs extrémités soient deux à deux à la température de la jonction.

5- Loi des températures successives :

Lorsque la température de référence T_1 d'un thermocouple prend une nouvelle valeur T'_1 , la f.e.m de Seebeck du couple A/B passe de la valeur $S_{A/B}^{T_2 T_1}$ à $S_{A/B}^{T_2 T'_1}$:

$$S_{A/B}^{T_2 T'_1} = (\mathcal{T}_B^{T_2 T'_1} - \mathcal{T}_A^{T_2 T'_1}) + (P_{A/B}^{T_2} - P_{A/B}^{T'_1})$$

que l'on peut écrire :

$$S_{A/B}^{T_2 T'_1} = (P_{A/B}^{T_2} - P_{A/B}^{T_1}) + (\mathcal{T}_B^{T_2 T_1} - \mathcal{T}_A^{T_2 T_1}) - (P_{A/B}^{T'_1} - P_{A/B}^{T_1}) - (\mathcal{T}_B^{T_1 T_1} - \mathcal{T}_A^{T_1 T_1})$$

soit : $S_{A/B}^{T_2 T'_1} = S_{A/B}^{T_2 T_1} - S_{A/B}^{T_1 T_1}$, ou encore :

$$S_{A/B}^{T_2 T_1} = S_{A/B}^{T_2 T'_1} + S_{A/B}^{T_1 T_1}$$

Cette relation est utilisée en particulier lorsque la mesure a été faite avec une température de référence T_1' ayant fourni la f.e.m $S_{A/B}^{T_2 T'_1}$ et que l'on souhaite connaître la valeur de $S_{A/B}^{T_2 T_1}$ pour $T_1=0^\circ\text{C}$, afin d'en déduire la température à mesurer T_2 à partir de la table du thermocouple utilisé.

6- Loi des métaux successifs :

Si on considère un premier thermocouple formé des conducteurs A et B, et un deuxième thermocouple formé des conducteurs B et C, les températures des jonctions étant T_1 et T_2 pour les deux conducteurs, nous pouvons en déduire la f.e.m du thermocouple constitué des matériaux A et C :

$$\text{Pour le thermocouple A/B : } S_{A/B}^{T_2 T_1} = (\mathcal{T}_B^{T_2 T_1} - \mathcal{T}_A^{T_2 T_1}) + (P_{A/B}^{T_2} - P_{A/B}^{T_1})$$

$$\text{Pour le thermocouple B/C : } S_{B/C}^{T_2 T_1} = (\mathcal{T}_C^{T_2 T_1} - \mathcal{T}_B^{T_2 T_1}) + (P_{B/C}^{T_2} - P_{B/C}^{T_1})$$

Pour le thermocouple A/C :

$$S_{A/C}^{T_2 T_1} = (\mathcal{T}_C^{T_2 T_1} - \mathcal{T}_A^{T_2 T_1}) + (P_{A/C}^{T_2} - P_{A/C}^{T_1}) = (\mathcal{T}_C^{T_2 T_1} - \mathcal{T}_A^{T_2 T_1} + \mathcal{T}_B^{T_2 T_1} - \mathcal{T}_B^{T_2 T_1}) + (P_{A/B}^{T_2} + P_{B/C}^{T_2} - P_{A/B}^{T_1} - P_{B/C}^{T_1})$$

$$\text{ce qui nous donne : } S_{A/C}^{T_2 T_1} = (\mathcal{T}_B^{T_2 T_1} - \mathcal{T}_A^{T_2 T_1}) + (P_{A/B}^{T_2} - P_{A/B}^{T_1}) + (\mathcal{T}_C^{T_2 T_1} - \mathcal{T}_B^{T_2 T_1}) + (P_{B/C}^{T_2} - P_{B/C}^{T_1})$$

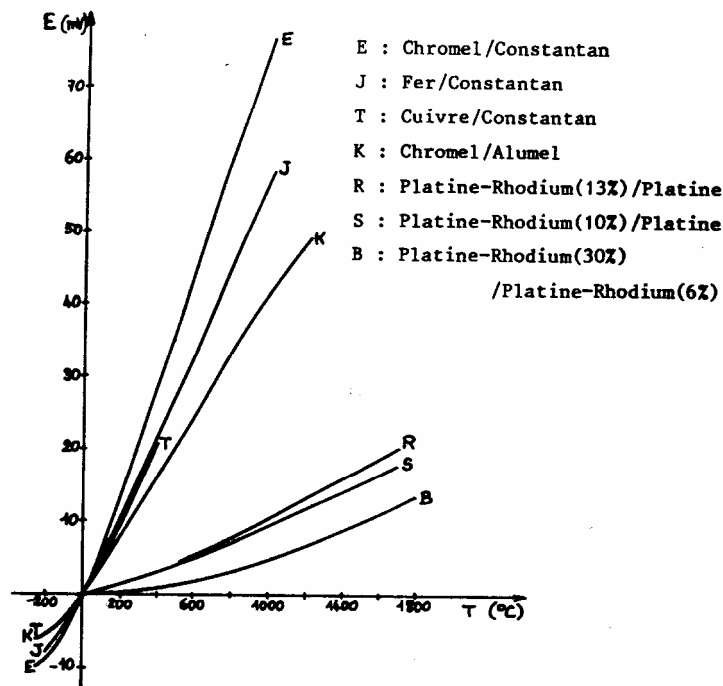
ou encore :

$$S_{A/C}^{T_2 T_1} = S_{A/B}^{T_2 T_1} + S_{B/C}^{T_2 T_1}$$

Sur le plan pratique, si B est un métal de référence (Pb ou Pt) pour lequel il existe différentes tables de thermocouples correspondant à son association avec divers autres conducteurs. La connaissance à partir de ces tables des f.e.m de Seebeck délivrées pour son association avec des conducteurs A et C nous permettra d'en déduire la f.e.m délivrée par le thermocouple A/C dont la table de thermocouple peut ne pas être disponible.

6.4 SENSIBILITE THERMIQUE D' UN THERMOCOUPLE

La f.e.m délivrée par un thermocouple est, sur de grands intervalles de température, une fonction non linéaire de cette dernière. A titre d'exemple, la figure ci-dessous présente la variation de la f.e.m en fonction de la température, pour différents types de thermocouples d'un usage courant. On considère cependant que cette variation est linéaire sur un intervalle restreint de température, dont la taille dépend de la précision recherchée.



La relation qui lie la f.e.m E (en μV) d'un thermocouple à la température T (en $^{\circ}\text{C}$) par une équation polynomiale de la forme :

$$E = \sum_{i=1}^n a_i T^i$$

avec :

- n l'ordre maximal du polynôme (généralement inférieur à 9)
- a_i des coefficients propres au thermocouple considéré.

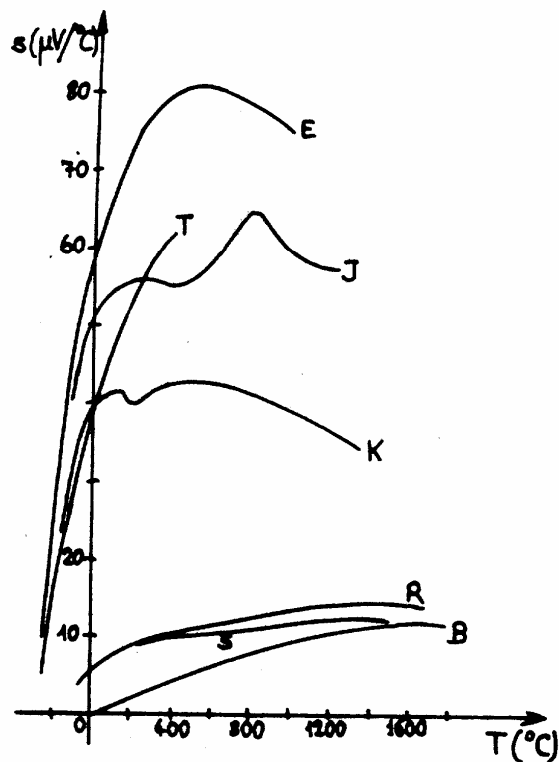
Par exemple, pour le thermocouple type B (Platine-30% Rhodium / Platine-6% Rhodium), $n=8$ et les coefficients a_i sont les suivants :

$$\begin{array}{lll} a_0 = 0 & a_1 = -2.4674601620 \cdot 10^{-1} & a_2 = 5.9102111169 \cdot 10^{-3} \\ a_3 = -1.4307123430 \cdot 10^{-6} & a_4 = 2.1509149750 \cdot 10^{-9} & a_5 = -3.175800720 \cdot 10^{-12} \\ a_6 = 2.4010367459 \cdot 10^{-15} & a_7 = -9.0928148159 \cdot 10^{-19} & a_8 = 1.3299505137 \cdot 10^{-22} \end{array}$$

La sensibilité thermique S (en $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) d'un thermocouple, appelée également pouvoir thermoélectrique, est définie à une température T (pour $T_{\text{ref}} = 0^\circ\text{C}$) par :

$$S(T) = \frac{dS_{A/B}^{T \ 0^\circ\text{C}}}{dT}$$

La figure ci-dessous présente la variation de la sensibilité thermique en fonction de la température, pour les différents thermocouples précédents.



Par exemple, pour le thermocouple type J (Fer/Constantan) $S(0^\circ\text{C}) = 52.9 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ et $S(700^\circ\text{C}) = 63.8 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, tandis que pour le thermocouple type S (Platine-10%Rhodium / Platine) $S(0^\circ\text{C}) = 6.4 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ et $S(700^\circ\text{C}) = 11.3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

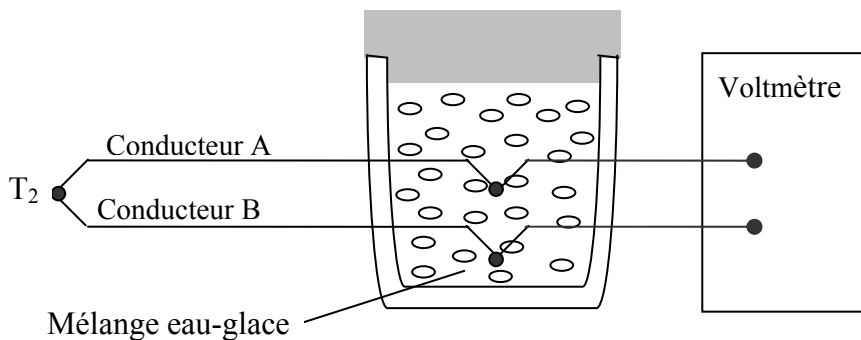
L'ordre de grandeur des sensibilités des thermocouples est très inférieur à celui des capteurs de température utilisant des résistances.

6.5 TEMPERATURE DE REFERENCE D' UN THERMOCOUPLE

La mesure de la température à l'aide d'un thermocouple nécessite que la température de la jonction de référence soit parfaitement connue, en effet toute incertitude sur la valeur de T_{ref} entraîne une incertitude sur la température mesurée. Plusieurs méthodes sont utilisées pour maintenir cette température constante à 0°C

6.5.1 Le bain d'eau et de glace

La jonction de référence est plongée dans un bain constitué d'un mélange eau - glace à pression atmosphérique normale, à l'intérieur d'une enceinte adiabatique. L'eau et la glace doivent être très pures et la glace finement pilée. Cette dernière doit être renouvelée fréquemment pour maintenir une température de référence constante. La température de 0°C est obtenue avec une précision de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$.



6.5.2 La méthode du pont électrique

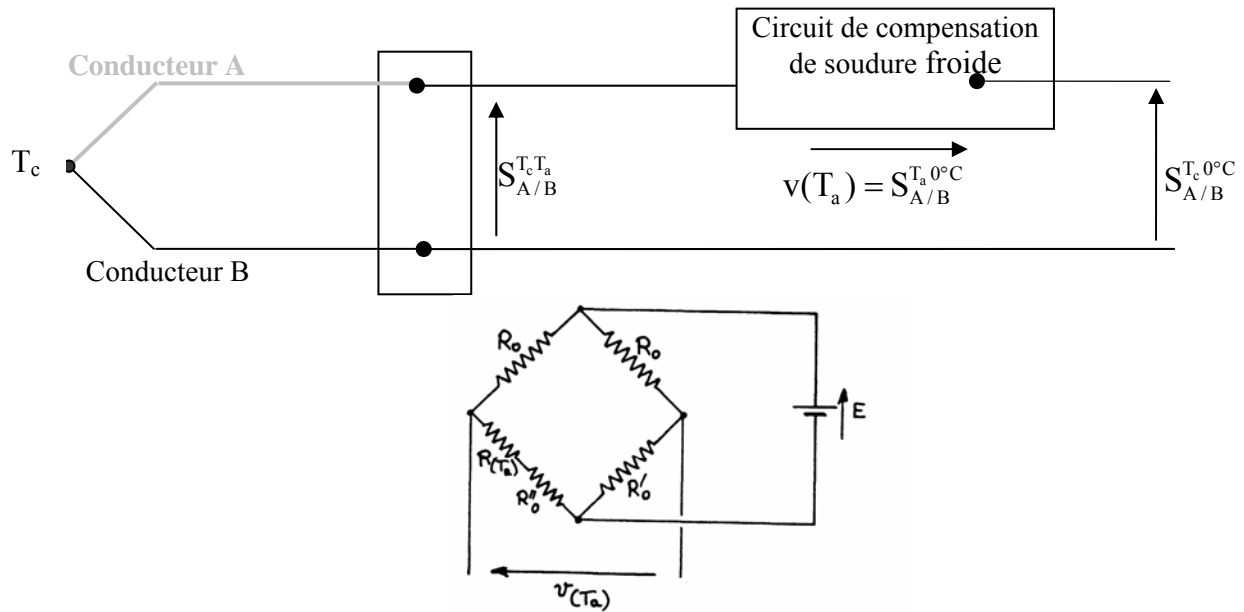
Il est possible de maintenir la température de référence à 0°C par l'intermédiaire de circuits électriques, appelés circuits de correction de la soudure froide.

Si on connaît la température ambiante T_a à l'instant de la mesure, et T_c étant la température à mesurer, on peut écrire :

$$S_{A/B}^{T_c 0^{\circ}\text{C}} = S_{A/B}^{T_c T_a} + S_{A/B}^{T_a 0^{\circ}\text{C}}$$

Le circuit de correction de la soudure froide est tel qu'il délivre automatiquement une tension $v(T_a)$ qui est égale à $S_{A/B}^{T_a 0^{\circ}\text{C}}$. Cette f.e.m, ajoutée à la f.e.m $S_{A/B}^{T_c T_a}$ du thermocouple A/B, permet de mesurer la f.e.m $S_{A/B}^{T_c 0^{\circ}\text{C}}$ aux bornes du circuit de mesure.

La tension $v(T_a)$ est déterminée à partir de la résistance $R(T_a)$ d'un capteur de température à résistance maintenu à température ambiante, le dispositif utilisé est le pont de Wheatstone. Le montage de principe est présenté sur la figure suivante.



Le pont de Wheatstone permet la correction de la soudure froide pour des variations de la température ambiante autour de 0°C . Les résistances R_0 , R_0' et R_0'' ne dépendent pas de la température alors que la résistance $R(T_a)$ du capteur en est une fonction linéaire, dont le coefficient est sa sensibilité thermique α_R .

Le pont est équilibré à 0°C , à la température T_a sa tension de déséquilibre a pour expression :

$$v(T_a) = E \frac{R_0 (R_0' - R_0'')}{(R_0 + R_0')^2} \alpha_R T_a$$

Les valeurs numériques des composants du pont sont choisies de manière à assurer :

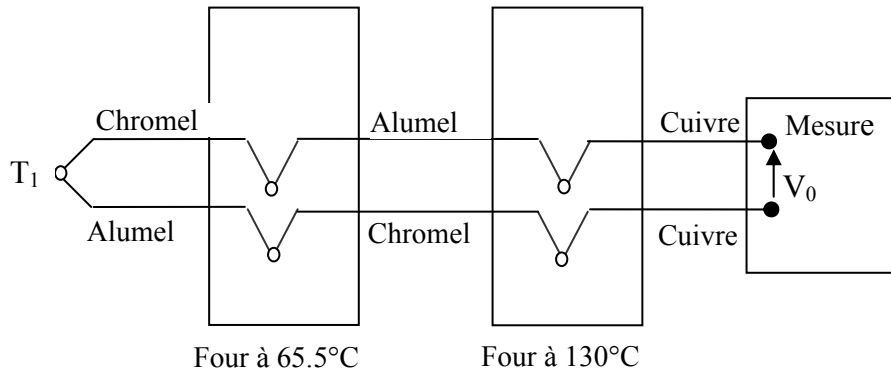
$$E \frac{R_0 (R_0' - R_0'')}{(R_0 + R_0')^2} \alpha_R T_a = S_{A/B}^{T_a, 0^\circ\text{C}}$$

En supposant que la sensibilité du thermocouple est constante dans la plage de variation de T_a on obtient :

$$S = E \frac{R_0 (R_0' - R_0'')}{(R_0 + R_0')^2} \alpha_R$$

6.5.3 La méthode du double four

Cette méthode utilise deux fours à des températures différentes pour simuler la température de référence de 0°C .



On a :

$$V_0 = e_{\text{Cuivre/Alumel}} \cdot 130 + e_{\text{Alumel/Chromel}} \cdot 65,5 + e_{\text{Chromel/Alumel}} \cdot T_1 + e_{\text{Alumel/Chromel}} \cdot 65,5 + e_{\text{Chromel/Cuivre}} \cdot 130$$

$$= 2e_{\text{Alumel/Chromel}} \cdot 65,5 + e_{\text{Chromel/Alumel}} \cdot 130 + e_{\text{Chromel/Alumel}} \cdot T_1 = e_{\text{Chromel/Alumel}} (T_1 - 0^\circ\text{C})$$

On se ramène ainsi à un couple Chromel/Alumel dont la jonction froide est à 0°C.

6.6 PRINCIPAUX TYPES DE THERMOCOUPLES ET LIMITES D'EMPLOI

Le tableau suivant présente, pour différents types de thermocouples, les températures d'utilisation ainsi que la précision, pour les diamètres indiqués. Des tables donnant la f.e.m de ces thermocouples en fonction de la température figurent en annexe.

Thermocouples	Gamme de Températures	f.e.m (mV)	Précision
Cuivre / Constantan Type T (diamètre 1.63 mm)	-270 à 370°C	-6.258 à 19.027	± 2% de -100°C à -40°C ± 0.8% de -40°C à 100°C ± 0.75% de 100°C à 350°C
Fer / Constantan Type J (diamètre 3.25 mm)	-210 à 800°C	-8.096 à 45.498	± 3°C de 0°C à 400°C ± 0.75% de 400°C à 800°C
Chromel / Alumel Type K (diamètre 3.25 mm)	-270 à 1250°C	-5.354 à 50.633	± 3°C de 0°C à 400°C ± 0.75% de 400°C à 1250°C
Chromel / Constantan Type E (diamètre 3.25 mm)	-270 à 870°C	-9.835 à 66.473	± 3°C de 0°C à 400°C ± 0.75% de 400°C à 1250°C
Platine-Rhodium (10%) / Platine Type S (diamètre 0.51 mm)	-50 à 1500°C	-0.236 à 15.576	± 2.5°C de 0°C à 600°C ± 0.4% de 600°C à 1600°C
Platine-Rhodium (13%) / Platine Type R (diamètre 0.51 mm)	-50 à 1500°C	-0.226 à 17.445	± 1.4°C de 0°C à 538°C ± 0.25% de 538°C à 1500°C
Platine-Rhodium (30%) / Platine-Rhodium (6%) Type B (diamètre 0.51 mm)	0 à 2760°C	0 à 12.426	± 0.5% de 870°C à 1700°C

6.7 COMPARAISON THERMOCOUPLE/THERMOMETRES ELECTRIQUES

Le tableau suivant récapitule les principaux avantages et inconvénients des thermocouples, des capteurs de température à résistance et des thermistances.

	THERMOCOUPLE	RTD	THERMISTANCE
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> ✓ simple ✓ robuste ✓ peu coûteux ✓ mesures ponctuelles ✓ rapide ✓ gamme de températures large 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ très stable ✓ très précis ✓ meilleure linéarité que le thermocouple 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ très sensible ✓ faible encombrement
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> ✓ non linéaire ✓ stabilité faible ✓ sensibilité faible ✓ nécessite une température de référence 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ coûteux ✓ lent ✓ sensibilité faible ✓ erreurs par auto-échauffement (effet Joule) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ non linéaire ✓ gamme réduite de températures ✓ stabilité faible ✓ fragile ✓ auto-échauffement

CHAPITRE 7 : REPONSE DYNAMIQUE D' UN CAPTEUR DE TEMPERATURE

7.1 INTRODUCTION

Les capteurs de température (thermomètres à dilatation, thermomètres électriques et thermocouples) sont des systèmes du 1^{er} ordre, leur comportement dynamique est régi par une équation différentielle du 1^{er} degré qui décrit les échanges de chaleur entre le capteur considéré et son environnement.

A l'instant t , on considère un capteur de température à la température T_c , plongé dans un milieu à la température T_x .

Si m est la masse du capteur, A sa surface et C_p sa capacité calorifique massique, le bilan thermique s'écrit :

$$mC_p \frac{dT_c}{dt} = hA(T_x - T_c)$$

avec h le coefficient d'échanges convectifs entre le capteur et le milieu qui l'entoure.

Cette équation peut également s'écrire sous la forme :

$$\frac{dT_c}{dt} + \frac{hA}{mC_p} T_c = \frac{hA}{mC_p} T_x$$

La solution de l'équation sans second membre s'écrit :

$$T_c = Ke^{-\frac{t}{\tau}}$$

avec K une constante et $\tau = \frac{mC_p}{hA}$ la constante de temps du système.

La résolution de l'équation de bilan nécessite de connaître la température du milieu T_x ainsi que les conditions initiales. Nous nous intéressons à la réponse du système à des sollicitations de type échelon et rampe.

7.2 REPONSE A UN SIGNAL ECHELON

La réponse d'un capteur de température à une sollicitation de type échelon correspond à celle d'un capteur qui serait plongé brusquement dans un fluide à la température T_x . Dans ce cas, une solution particulière de l'équation est :

$$T_c = T_x$$

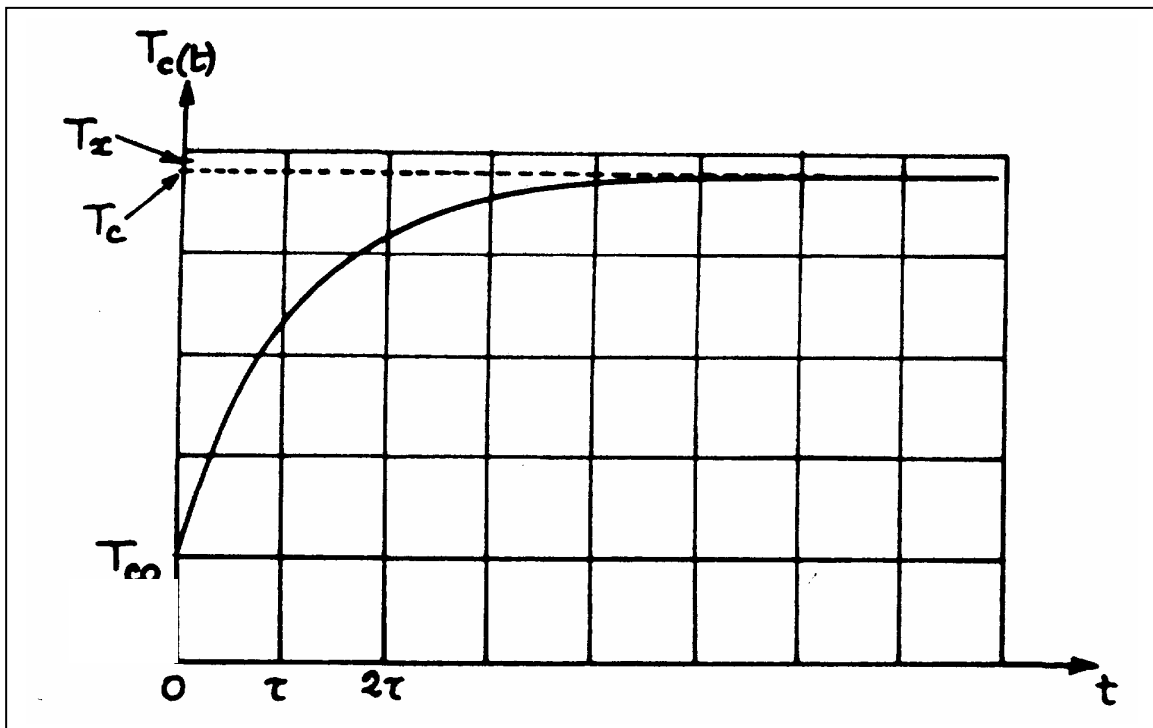
La solution générale s'écrit alors :

$$T_c = Ke^{-\frac{t}{\tau}} + T_x$$

Compte tenu des conditions initiales (à $t = 0$, $T_c(0) = 0^\circ\text{C}$), la réponse dynamique d'un capteur de température à un signal échelon s'écrit :

$$T_c = T_x \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

La figure suivante montre l'évolution de la température T_c du capteur, lorsque la température T_x du milieu augmente de manière brusque.



Pour améliorer la rapidité du capteur considéré, il faut réduire sa constante de temps τ . Cela exige que la masse et la capacité calorifique du capteur soient aussi faibles que possible et sa surface d'échange élevée.

7.3 REPONSE A UN SIGNAL RAMPE

Un capteur de température soumis à une sollicitation de type rampe correspond au cas où le capteur est situé dans un milieu dont la température augmente linéairement au cours du temps. Cette évolution est exprimée par :

$$T_x = b.t$$

où b est la pente de la droite représentant l'évolution de la température du milieu.

Dans ce cas, une solution particulière de l'équation différentielle est :

$$T_c = b.(t - \tau)$$

La solution générale du problème s'écrit alors :

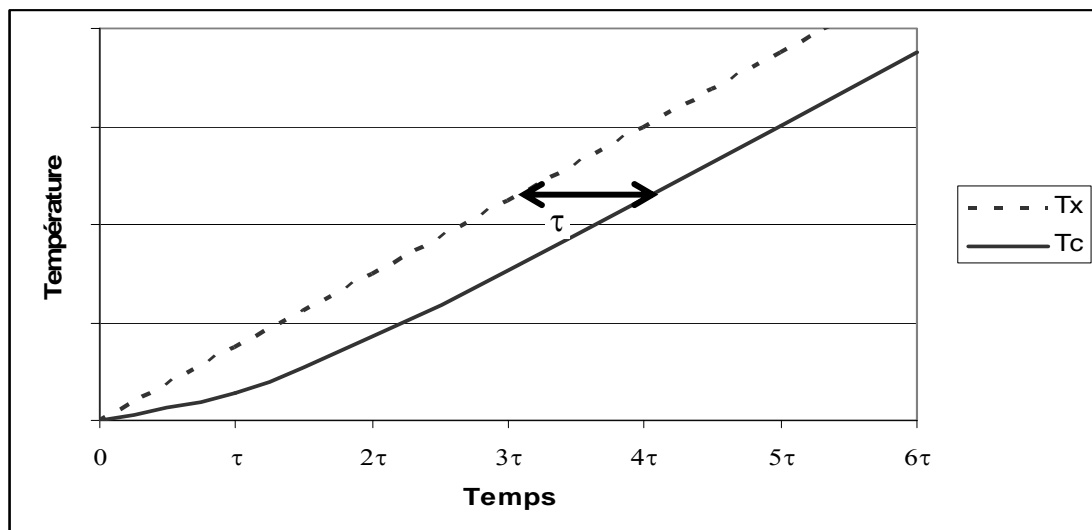
$$T_c = K'e^{-\frac{t}{\tau}} + b.(t - \tau)$$

Compte tenu des conditions initiales (à $t = 0$, $T_c(0) = T_x(0) = 0^\circ\text{C}$), $K' = b\tau$

La réponse du capteur à une sollicitation rampe s'écrit donc :

$$T_c = b.t - b.\tau\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

La figure suivante montre l'évolution de la température T_c du capteur, lorsque la température T_x du milieu évolue linéairement en fonction du temps. Le terme exponentiel est dominant au début puis il décroît rapidement avec le temps et devient négligeable pour $t > 3\tau$. La réponse du capteur devient linéaire avec un déphasage égal à τ par rapport à la température du milieu. Les mesures deviennent précises à partir d'un instant $t > 3\tau$.



BIBLIOGRAPHIE

G. ASCH et coll. (1998). LES CAPTEURS EN INSTRUMENTATION INDUSTRIELLE. (DUNOD, Collection EEA, Paris), 864 pages, 5^{ème} édition. ISBN : 2100047582

Chiheb BOUDEN, Textbook for Instrumentation Lectures, ENIT, 1996

L. BERGOUGNOUX, Conditionnement Electronique des Capteurs, Polytechnique Marseille.

ANNEXE

SONDE DE PLATINE

Résistance en fonction de la température - d'après la Norme DIN 43760

°C	Ω	°C	Ω	°C	Ω	°C	Ω
-220	10,41	+50	119,40	+320	219,13	+590	310,43
210	14,36	60	123,24	330	222,66	+600	313,65
-200	18,53	70	127,07	340	226,18	610	316,86
190	22,78	80	130,89	+350	229,69	620	320,05
180	27,05	90	134,70	360	233,19	630	323,24
170	31,28	+100	138,50	370	236,67	640	326,41
160	35,48	110	142,28	380	240,15	+650	329,57
150	39,65	120	146,06	390	243,61	660	332,72
140	43,80	130	149,82	+400	247,06	670	335,86
130	47,93	140	153,57	410	250,50	680	338,99
120	52,04	+150	157,32	420	253,93	690	342,10
110	56,13	160	161,05	430	257,34	+700	345,21
-100	60,20	170	164,76	440	260,75	710	348,30
90	64,25	180	168,47	+450	264,14	720	351,38
80	68,28	190	172,16	460	267,52	730	354,45
70	72,29	+200	175,84	470	270,89	740	357,51
60	76,28	210	179,51	480	274,25	+750	360,55
-50	80,25	220	183,17	490	277,60	760	363,59
40	84,21	230	186,82	+500	280,93	770	366,61
30	88,17	240	190,46	510	284,25	780	369,62
20	92,13	+250	194,08	520	287,57	790	372,62
-10	96,07	260	197,70	530	290,87	+800	375,61
+ 0	100,00	270	201,30	540	294,16	810	378,59
+10	103,90	280	204,88	+550	297,43	820	381,55
20	107,79	290	208,46	560	300,70	830	384,50
30	111,67	+300	212,03	570	303,95	840	387,45
40	115,54	310	215,58	580	307,20	850	390,38

Ecart admissible par rapport aux valeurs nominales

T(°C)	-220	-200	-100	0	100	200	300	400	500	600	700	800	850
Ecart en ±Ω	0,7	0,5	0,3	0,1	0,25	0,45	0,65	0,85	1,0	1,2	1,35	1,45	1,5
Ecart en ±°C	1,8	1,2	0,7	0,3	0,6	1,2	1,8	2,4	3,0	3,6	4,2	4,8	5,1

THERMOCOUPLE TYPE R

PLATINE - 13% RHODIUM / PLATINE

Force électromotrice en μV . Température en $^{\circ}\text{C}$ (E.I.P.T. 1968) Jonction de référence à 0°C

d'après la Norme NF C 42-321

$^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
- 0	0	- 51	- 100	- 145	- 188	- 226					
+ 0	0	54	111	171	232	296	363	431	501	573	647
100	647	723	800	879	959	1041	1124	1208	1294	1380	1468
200	1468	1557	1647	1738	1830	1923	2017	2111	2207	2303	2400
300	2400	2498	2596	2695	2795	2896	2997	3099	3201	3304	3407
400	3407	3511	3616	3721	3826	3933	4039	4146	4254	4362	4471
500	4471	4580	4689	4799	4910	5021	5132	5244	5356	5469	5582
600	5582	5696	5810	5925	6040	6155	6272	6388	6505	6623	6741
700	6741	6860	6979	7098	7218	7339	7460	7582	7703	7826	7949
800	7949	8072	8196	8320	8445	8570	8696	8822	8949	9076	9203
900	9203	9331	9460	9589	9718	9848	9978	10109	10240	10371	10503
1000	10503	10636	10768	10902	11035	11170	11304	11439	11574	11710	11846
1100	11846	11983	12119	12257	12394	12532	12669	12808	12946	13085	13224
1200	13224	13363	13502	13642	13782	13922	14062	14202	14343	14483	14624
1300	14624	14765	14906	15047	15188	15329	15470	15611	15752	15893	16035
1400	16035	16176	16317	16458	16599	16741	16882	17022	17163	17304	17445
1500	17445	17585	17726	17866	18006	18146	18286	18425	18564	18703	18842
1600	18842	18981	19119	19257	19395	19533	19670	19807	19944	20080	20215
1700	20215	20350	20483	20616	20748	20878	21006				

THERMOCOUPLE TYPE S

PLATINE - 10% RHODIUM / PLATINE

Force électromotrice en μV . Température en $^{\circ}\text{C}$ (E.I.P.T. 1968) Jonction de référence à 0°C

d'après la Norme NF C 42-321

$^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
- 0	0	- 53	- 103	- 150	- 194	- 236					
+ 0	0	55	113	173	235	299	365	432	502	573	645
100	645	719	795	872	950	1029	1109	1190	1273	1356	1440
200	1440	1525	1611	1698	1785	1873	1962	2051	2141	2232	2323
300	2323	2414	2506	2599	2692	2786	2880	2974	3069	3164	3260
400	3260	3356	3452	3549	3645	3743	3840	3938	4036	4135	4234
500	4234	4333	4432	4532	4632	4732	4832	4933	5034	5136	5237
600	5237	5339	5442	5544	5648	5751	5855	5960	6064	6169	6274
700	6274	6380	6486	6592	6699	6805	6913	7020	7128	7236	7345
800	7345	7454	7563	7672	7782	7892	8003	8114	8225	8336	8448
900	8448	8560	8673	8786	8899	9012	9126	9240	9355	9470	9585
1000	9585	9700	9816	9932	10048	10165	10282	10400	10517	10635	10754
1100	10754	10872	10991	11110	11229	11348	11467	11587	11707	11827	11947
1200	11947	12067	12188	12308	12429	12550	12671	12792	12913	13034	13155
1300	13155	13276	13397	13519	13640	13761	13883	14004	14125	14247	14368
1400	14368	14489	14610	14731	14852	14973	15094	15215	15336	15456	15576
1500	15576	15697	15817	15937	16057	16176	16296	16415	16534	16653	16771
1600	16771	16890	17008	17125	17243	17360	17477	17594	17711	17826	17942
1700	17942	18056	18170	18282	18394	18504	18612				

THERMOCOUPLE TYPE B

PLATINE - 30% RHODIUM / PLATINE - 6% RHODIUM

Force électromotrice en μV . Température en $^{\circ}\text{C}$ (E.I.P.T. 1968) Jonction de référence à 0°C

d'après la Norme NF C 42-321

$^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	0	- 2	- 3	- 2	0	2	6	11	17	25	33
100	33	43	53	65	78	92	107	123	140	159	178
200	178	199	220	243	266	291	317	344	372	401	431
300	431	462	494	527	561	596	632	669	707	746	786
400	786	827	870	913	957	1002	1048	1095	1143	1192	1241
500	1241	1292	1344	1397	1450	1505	1560	1617	1674	1732	1791
600	1791	1851	1912	1974	2036	2100	2164	2230	2296	2363	2430
700	2430	2499	2569	2639	2710	2782	2855	2928	3003	3078	3154
800	3154	3231	3308	3387	3466	3546	3626	3708	3790	3873	3957
900	3957	4041	4126	4212	4298	4386	4474	4562	4652	4742	4833
1000	4833	4924	5016	5109	5202	5297	5391	5487	5583	5680	5777
1100	5777	5875	5973	6073	6172	6273	6374	6475	6577	6680	6783
1200	6783	6887	6991	7096	7202	7308	7414	7521	7628	7736	7845
1300	7845	7953	8063	8172	8283	8393	8504	8616	8727	8839	8952
1400	8952	9065	9178	9291	9405	9519	9634	9748	9863	9979	10094
1500	10094	10210	10325	10441	10558	10674	10790	10907	11024	11141	11257
1600	11257	11374	11491	11608	11725	11842	11959	12076	12193	12310	12426
1700	12426	12543	12659	12776	12892	13008	13124	13239	13354	13470	13585
1800	13585	13699	13814								

THERMOCOUPLE TYPE J

FER / CUIVRE-NICKEL

Force électromotrice en μV . Température en $^{\circ}\text{C}$ (E.I.P.T. 1968) Jonction de référence à 0°C

d'après la Norme NF C 42-321

$^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
- 200	-7890	-8096									
- 100	-4632	-5036	-5426	-5801	-6159	-6499	-6821	-7122	-7402	-7659	-7890
- 0	0	- 501	- 995	-1481	-1960	-2431	-2892	-3344	-3785	-4215	-4632
+ 0	0	507	1019	1536	2058	2585	3115	3649	4186	4725	5268
100	5268	5812	6359	6907	7457	8008	8560	9113	9667	10222	10777
200	10777	11332	11887	12442	12998	13553	14108	14663	15217	15771	16325
300	16325	16879	17432	17984	18537	19089	19640	20192	20743	21295	21846
400	21846	22397	22949	23501	24054	24607	25161	25716	26272	26829	27388
500	27388	27949	28511	29075	29642	30210	30782	31356	31933	32513	33096
600	33096	33683	34273	34867	35464	36066	36671	37280	37893	38510	39130
700	39130	39754	40382	41013	41647	42283	42922	43563	44207	44852	45498
800	45498	46144	46790	47434	48076	48716	49354	49989	50621	51249	51875
900	51875	52496	53115	53729	54341	54948	55553	56155	56753	57349	57942
1000	57942	58533	59121	59708	60293	60876	61459	62039	62619	63199	63777
1100	63777	64355	64933	65510	66087	66664	67240	67815	68390	68964	69536
1200	69536										

THERMOCOUPLE TYPE T

CUIVRE / CUIVRE-NICKEL

Force électromotrice en μV . Température en $^{\circ}\text{C}$ (E. I. P. T. 1968) Jonction de référence à 0°C

d'après la Norme NF C 42-321

$^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
- 200	-5603	-5753	-5889	-6007	-6105	-6181	-6232	-6258			
- 100	-3378	-3656	-3923	-4177	-4419	-4648	-4865	-5069	-5261	-5439	-5603
- 0	0	- 383	- 757	-1121	-1475	-1819	-2152	-2475	-2788	-3089	-3378
+ 0	0	391	789	1196	1611	2035	2467	2908	3357	3813	4277
100	4277	4749	5227	5712	6204	6702	7207	7718	8235	8757	9286
200	9286	9820	10360	10905	11456	12011	12572	13137	13707	14281	14860
300	14860	15443	16030	16621	17217	17816	18420	19027	19638	20252	20869
400	20869										

THERMOCOUPLE TYPE E

NICKEL-CHROME / CUIVRE-NICKEL

Force électromotrice en μV . Température en $^{\circ}\text{C}$ (E.I.P.T.) Jonction de référence à 0°C

d'après la Norme NF C 42-321

$^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
- 200	-8824	-9063	-9274	-9455	-9604	-9719	-9797	-9835			
- 100	-5237	-5680	-6107	-6516	-6907	-7279	-7631	-7963	-8273	-8561	-8824
- 0	0	- 581	-1151	-1709	-2254	-2787	-3306	-3811	-4301	-4777	-5237
+ 0	0	591	1192	1801	2419	3047	3683	4329	4983	5646	6317
100	6317	6996	7683	8377	9078	9787	10501	11222	11949	12681	13419
200	13419	14161	14909	15661	16417	17178	17942	18710	19481	20256	21033
300	21033	21814	22597	23383	24171	24961	25754	26549	27345	28143	28943
400	28943	29744	30546	31350	32155	32960	33767	34574	35382	36290	36999
500	36999	37808	38617	39426	40236	41045	41853	42662	43470	44278	45085
600	45085	45891	46697	47502	48306	49109	49911	50713	51513	52312	53110
700	53110	53907	54703	55498	56291	57083	57873	58663	59451	60237	61022
800	61022	61806	62588	63368	64147	64924	65700	66473	67245	68015	68783
900	68783	69549	70313	71075	72835	72593	73350	74104	74857	75608	76358
1000	76358										

THERMOCOUPLE TYPE K

NICKEL-CHROME / NICKEL-ALUMINIUM

Force électromotrice en μV . Température en $^{\circ}\text{C}$ (E.I.P.T. 1968) Jonction de référence à 0°C

d'après la Norme NF C 42-321

$^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
- 200	-5891	-6035	-6158	-6262	-6344	-6404	-6441	-6458			
- 100	-3553	-3852	-4138	-4410	-4669	-4912	-5141	-5354	-5550	-5730	-5891
- 0	0	- 392	- 777	-1156	-1527	-1889	-2243	-2586	-2920	-3242	-3553
+ 0	0	397	798	1203	1611	2022	2436	2850	3266	3681	4095
100	4095	4508	4919	5327	5733	6137	6539	6939	7338	7737	8137
200	8137	8537	8938	9341	9745	10151	10560	10969	11381	11793	12207
300	12207	12623	13039	13456	13874	14292	14712	15132	15552	15974	16395
400	16395	16818	17241	17664	18088	18513	18938	19363	19788	20214	20640
500	20640	21066	21493	21919	22346	22772	23198	23624	24050	24476	24902
600	24902	25327	25751	26176	26599	27022	27445	27867	28288	28709	29128
700	29128	29547	29965	30383	30799	31214	31629	32042	32455	32866	33277
800	33277	33686	34095	34502	34909	35314	35718	36121	36524	36925	37325
900	37325	37724	38122	38519	38915	39310	39703	40096	40488	40879	41269
1000	41269	41657	42045	42432	42817	43202	43585	43968	44349	44729	45108
1100	45108	45486	45863	46238	46612	46985	47356	47726	48095	48462	48828
1200	48828	49192	49555	49916	50276	50633	50990	51344	51697	52049	52398
1300	52398	52747	53093	53439	53782	54125	54466	54807			