

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.

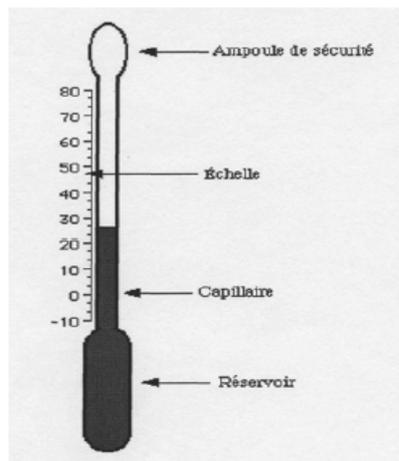
La température est une grandeur abstraite, elle définie est définie en termes de changement de comportement des matériaux lorsqu'ils sont soumis à un changement de température. Du nombre important de propriétés de la matière et de phénomènes physiques sensibles à la température, résulte une grande diversité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

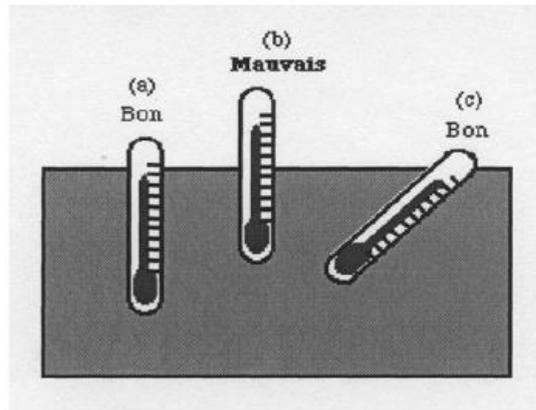
4.2.4 Nature de l'enveloppe

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

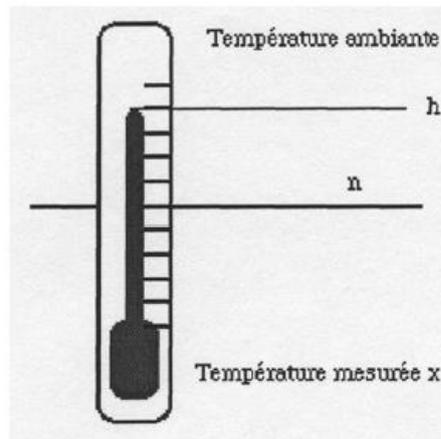
- jusqu'à 450°C : verre d'Iena
- jusqu'à 630°C : verre Supremax
- jusqu'à 1000°C : silice pure fondue

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

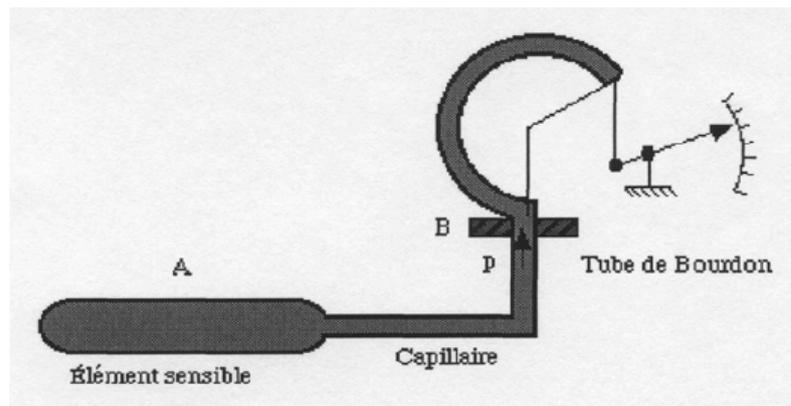
L'équation d'un gaz parfait s'écrit : $PV = nRT$, avec :

- 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.

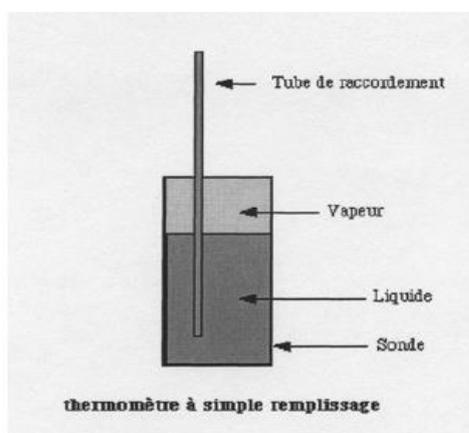
L'avantage des thermomètres à gaz est leur précision, qui est de l'ordre de 1% en mesures industrielles. Ils sont très adaptés pour mesurer les très basses températures (jusqu'à -268°C pour l'hélium et -240°C pour l'hydrogène). Certains de ces thermomètres sont de véritables instruments de précision 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

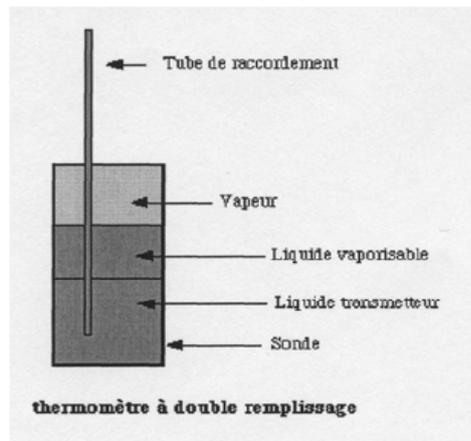
4.4.1 Principe

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 :

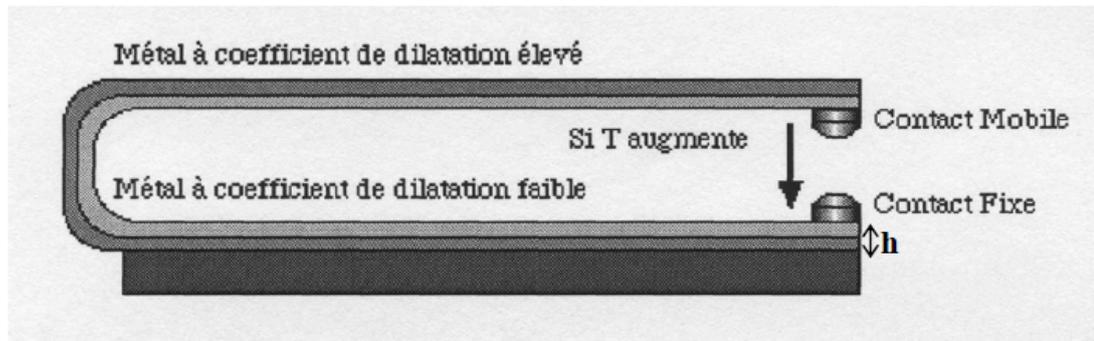
- L la longueur de la tige à la température T (°C)
- L_0 la longueur de la tige à 0°C
- α le coefficient de dilatation linéaire du métal (°C⁻¹)

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 ($\alpha = 9.10^{-6} \text{ °C}^{-1}$), le Zinc ($\alpha = 30.10^{-6} \text{ °C}^{-1}$) et l'Invar qui est un alliage de Fer et de Nickel ($\alpha = 2.10^{-6} \text{ °C}^{-1}$).

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 .

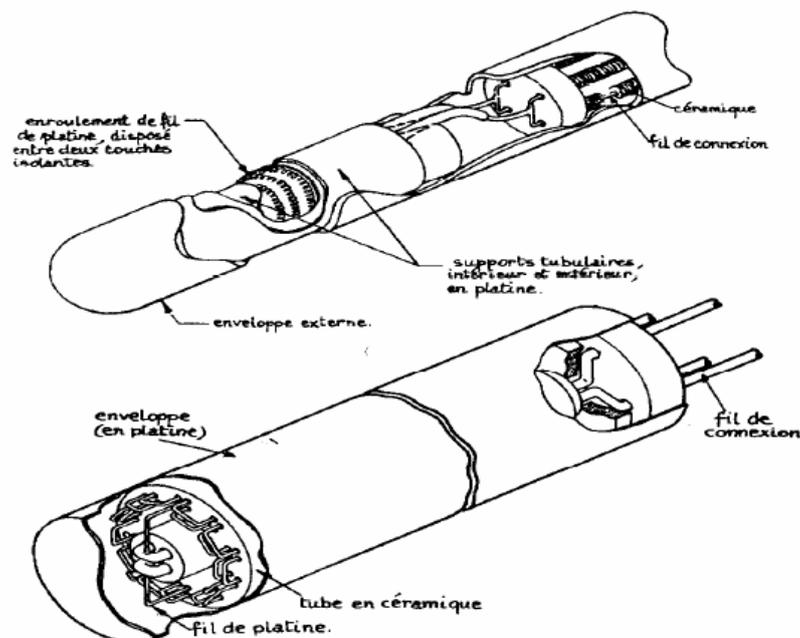
5.2.2 Critères de choix du métal

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 100Ω 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-ponctuelle 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.

