

5) Capteurs de température

1. Généralités	2
1.1. La température, une grandeur physique	2
1.2. Les échelles de température	2
2. Thermomètres à dilatation	2
2.1. Présentation	2
2.2. Thermomètres à dilatation de liquide	3
2.2.1. Loi de variation	3
2.2.2. Liquides thermométriques	3
2.2.3. Nature de l'enveloppe	4
2.2.4. Colonne émergente	4
2.3. Thermomètres à dilatation de gaz	5
2.3.1. Principe	5
2.4. Thermomètres à tension de vapeur	6
2.4.1. Définition	6
2.4.2. Principe	6
2.5. Thermomètres à dilatation de solide	7
2.5.1. Principe	7
2.5.2. Bilame	8
2.5.3. Pyromètre linéaire	8
3. Thermomètres électriques	9
3.1. Présentation	9
3.2. Thermomètres à résistance et à thermistance	9
3.2.1. Thermomètres à résistance	9
3.2.2. Thermomètres à thermistance	10
3.2.3. Montage de mesure	11
3.3. Thermocouples	13
3.3.1. Principes	13
3.3.2. Application	15
3.3.3. Les différents types de thermocouples	15
3.3.4. Câbles de compensation	16
3.3.5. Méthodes de mesure	17
3.3.6. Comparaison avec les thermomètres à résistance	17
4. Les pyromètres optiques	18
4.1. Présentation	18
4.2. Lois du rayonnement thermique du corps noir	18
4.3. Rayonnement thermique d'un corps réel	19
4.4. Principes généraux des pyromètres optiques	19
4.5. Le pyromètre optique à disparition de filament	20
4.6. Pyromètres bichromatiques	20
4.7. Pyromètres mesureurs d'énergie	20

1. Généralités

1.1. La température, une grandeur physique

La température est une grandeur intensive, qui peut être mesurée de deux façons différentes :

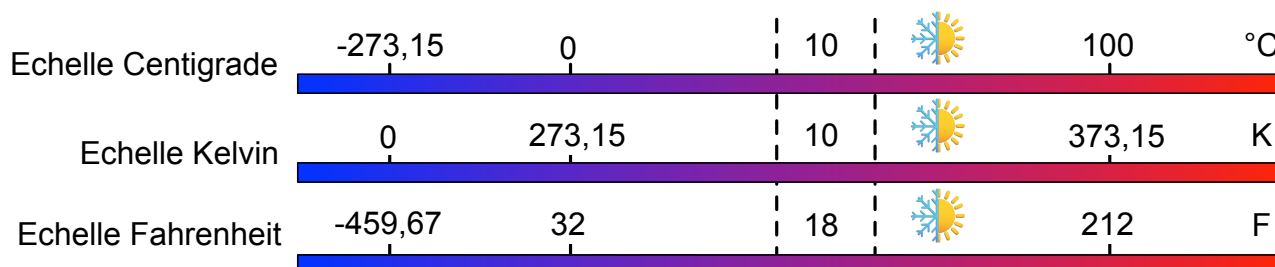
- À l'échelle atomique, elle est liée à l'énergie cinétique moyenne des constituants de la matière ;
- Au niveau macroscopique, certaines propriétés des corps dépendant de la température (volume massique, résistivité électrique, etc...) peuvent être choisies pour construire des échelles de température.

1.2. Les échelles de température

La plus ancienne est l'échelle centésimale (1742), attribuant arbitrairement les valeurs 0 et 100 degrés à la glace fondante et à l'eau bouillante, sous la pression atmosphérique normale. La température ainsi définie dépendant du phénomène choisi (la dilatation d'un fluide) pour constituer le thermomètre étalon, on utilise de préférence l'échelle Celsius, définie à partir de l'échelle Kelvin par :

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15$$

Cette dernière échelle, qui est celle du système international, ne dépend d'aucun phénomène particulier et définit donc des températures absolues. Le zéro absolu (-273,15 °C) a pu être approché à quelques millièmes de degrés près. Les phénomènes physiques qui se manifestent aux très basses températures connaissent d'importantes applications (supraconductivité). Dans le domaine des hautes températures, les torches à plasma permettent d'atteindre 50 000 K et les lasers de grande puissance utilisés pour les recherches sur la fusion nucléaire contrôlée donnent, pendant des temps très brefs, des températures dépassant 100 millions de degrés.



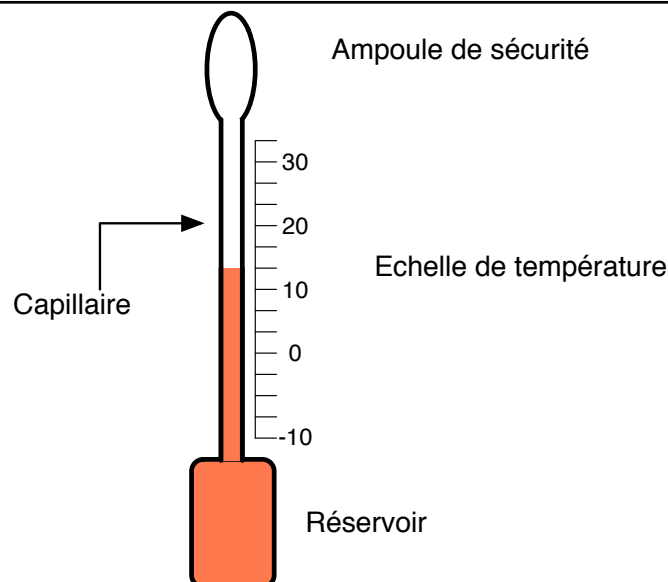
2. Thermomètres à dilatation

2.1. Présentation

Dans ce paragraphe, c'est la dilatation des corps qui sera le phénomène image de la grandeur thermométrique. On constate en effet que le volume d'un corps augmente en général, lorsque sa température s'élève (sans qu'il y ait de changement d'état physique). La dilatation étant réversible, elle fournit un mode pratique de repérage des températures. Ce phénomène se retrouve de façon analogue, mais avec une ampleur différente pour les liquides, les gaz et les solides. D'où les trois types de thermomètres à dilatation.

2.2. Thermomètres à dilatation de liquide

Il est constitué d'un réservoir surmonté d'un capillaire de section faible et régulière (ordre de grandeur : $\varnothing = 0,2 \text{ mm}$) se terminant par une ampoule de sécurité (utile lors d'un dépassement de la température admissible). Il est réalisé en verre. Sous l'effet des variations de température, le liquide se dilate plus ou moins. Son niveau est repéré à l'aide d'une échelle thermométrique gravée sur l'enveloppe.



2.2.1. Loi de variation

La loi de variation du volume du liquide en fonction de la température est :

$$V = V_0(1 + \alpha \times \theta)$$

avec :

- V_0 : volume du liquide à $0 \text{ }^\circ\text{C}$;
- V : volume de liquide à $\theta \text{ }^\circ\text{C}$;
- α : coefficient de dilatation du liquide en $^\circ\text{C}^{-1}$.

Cette équation nous montre que la sensibilité du thermomètre à dilatation de liquide est proportionnelle au volume V_0 (fonction du volume du réservoir), au coefficient de dilatation du liquide (donc au type de liquide choisi) et inversement proportionnel à la section S du capillaire car :

$$\Delta h = \frac{\Delta V}{S}$$

2.2.2. Liquides thermométriques

Liquides	Domaine d'emploi ($^\circ\text{C}$)	α en $^\circ\text{C}^{-1}$
Pentane	-200 à 20	
Alcool éthylique	-110 à 100	1,17
Toluène	-90 à 100	1,03
Créosote - Alcool éthylique	-10 à 200	
Mercure	-38 à +650	0,182
Mercure - Thallium	-58 à +650	
Mercure - Gallium	0 à 1 000	

L'espace libre au dessus du liquide peut-être vide. Toutefois, pour empêcher la colonne de liquide de se fractionner facilement et aussi pour permettre de mesurer des hautes températures, l'espace libre est rempli d'un gaz neutre (azote ou argon) mis sous une pression fonction de la température à mesurer. La chambre d'expansion évite les trop fortes variations de pression.

2.2.3. Nature de l'enveloppe

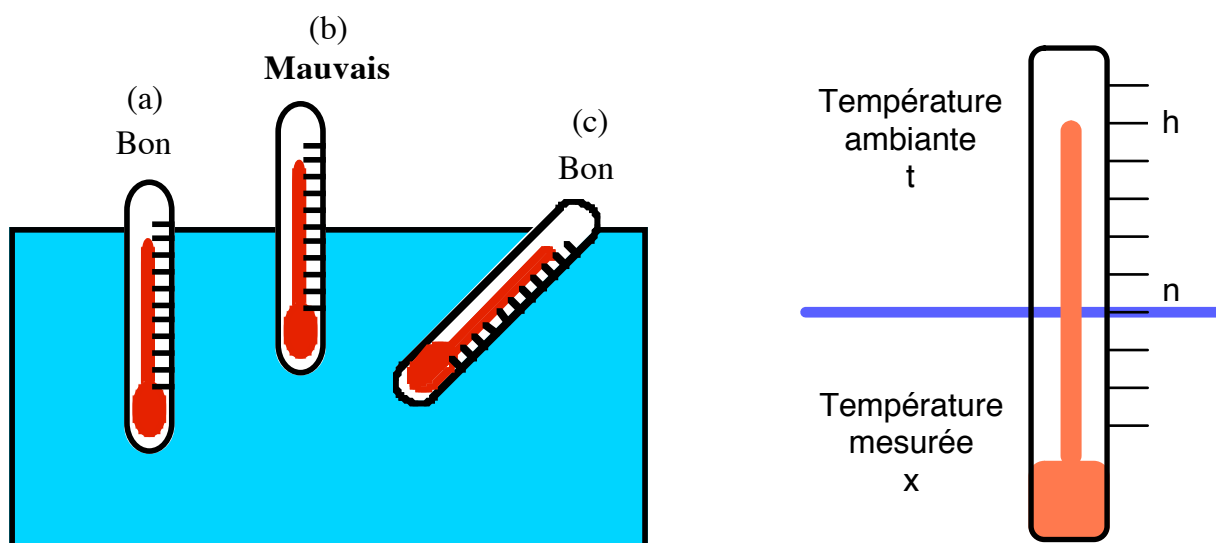
En fonction de la température à mesurer, il y a lieu de choisir le matériau constituant l'enveloppe du thermomètre.

- Verre d'Iena jusqu'à 450 °C ;
- Verre Supremax jusqu'à 630 °C ;
- Silice pure fondue jusqu'à 1 000 °C.

2.2.4. Colonne émergente

En dehors des réglages classiques (zéro, échelle), on doit penser à corriger la mesure de la température si il est impossible d'immerger complètement la colonne.

Dans les cas (a) et (c) la colonne de liquide thermométrique est totalement immergée dans l'enceinte dont on mesure la température. La dilatation de ce liquide se fait donc pleinement.



Dans le cas (b) la colonne de liquide est immergée jusqu'à la graduation n , dans l'enceinte de température inconnue. La partie de la colonne située entre n et h est en contact avec la température ambiante. Le volume correspondant à une graduation est noté v .

Le volume à la température ambiante est :

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

Ce volume est à la température ambiante, donc il en résulte un défaut de dilatation de :

$$\delta V = V \times \alpha \times (x - t)$$

$$\delta V = (h - n) \times v \times \alpha \times (x - t)$$

La correction à apporter est donc :

$$\delta h = \frac{\delta V}{v} = (h - n) \times \alpha \times (x - t)$$

En réalité, la partie émergée n'est pas à la température ambiante. Dans la pratique on prend les 7/10 de la correction calculée. Cette correction n'étant pas très précise, on essayera, dans la mesure du possible, de positionner au mieux le thermomètre (cas a ou c).

2.3. Thermomètres à dilatation de gaz

L'équation d'un gaz parfait est : $PV = nR\theta$

avec :

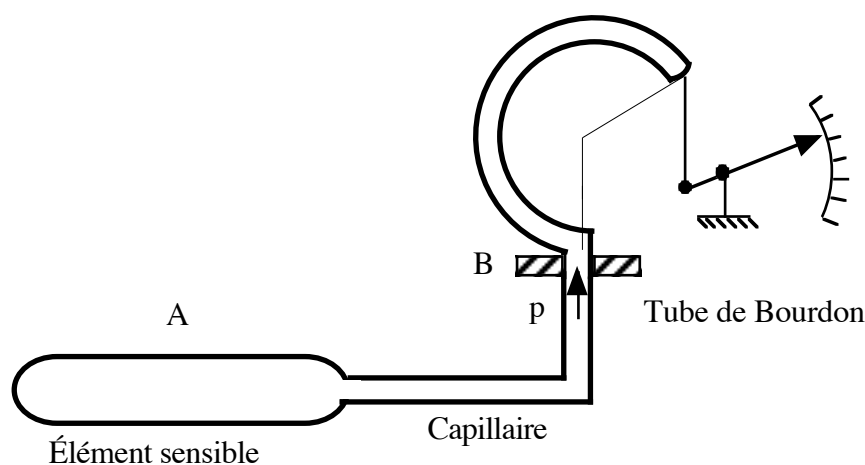
- n : Nombre de moles ;
- $R = 8,31 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$;
- θ : Température en K ;
- P : Pression en Pa.

On voit donc que, si l'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 absolue :

$$P = \frac{R}{V}\theta, \text{ avec le rapport } \frac{R}{V} \text{ constant.}$$

2.3.1. Principe

Sous une forme schématisée, un thermomètre à gaz est composé d'une sonde (A), formant une enveloppe dans laquelle est enfermé le gaz thermométrique. Cette sonde est reliée par un tube capillaire de raccordement à l'extrémité (B) d'un tube de Bourdon, appelée spirale de mesure. Cette extrémité est fixe. La longueur du tube de raccordement ne doit pas excéder 100 mètres. Sous l'effet de la température du milieu dans lequel la sonde est placée, la pression du gaz va varier, ce qui modifiera l'équilibre de l'extrémité libre du tube de Bourdon. Cette variation de pression se traduira par un mouvement de rotation de l'index indicateur qui se déplacera devant un cadran portant des graduations thermométriques.



Les gaz le plus souvent employés sont fournis tableau suivant :

Gaz	Température critique
hélium	-267,8°C
hydrogène	-239,9°C
azote	-147,1 °C
gaz carbonique	-31,1°C

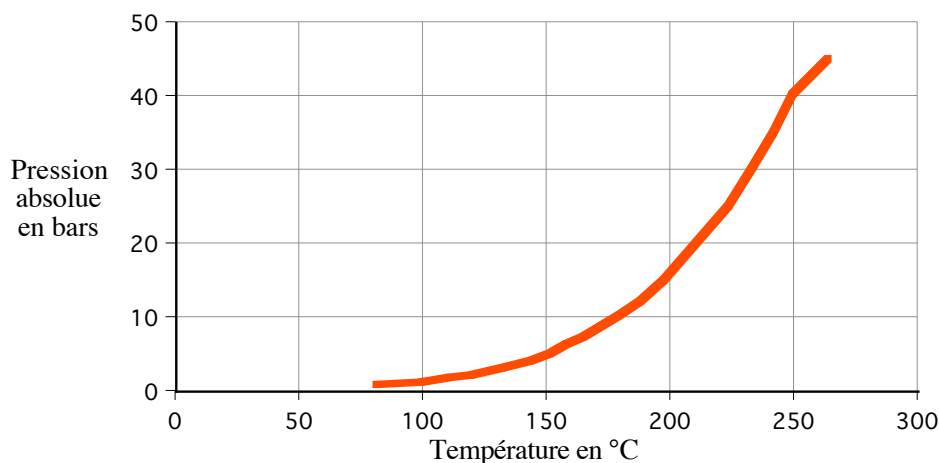
Remarques :

- La température critique, c'est la température maximale à laquelle un gaz ou une vapeur peut être liquéfié par variation de pression uniquement.
- La différence de hauteur entre la sonde sensible et la spirale de mesure est sans effet, puisque la masse du gaz est négligeable.
- Le gaz doit être soigneusement séché avant l'emploi et être utilisé dans des conditions qui le rapprochent de l'état parfait.
- L'avantage des thermomètres à gaz est leur précision, 1 % en mesures industrielles. Mais leur sonde est d'assez grande dimension. Ils permettent le repérage des très basses températures. Certains thermomètres à gaz sont de véritables instruments de précision, auxquels on a recours pour les déterminations de référence de la température. Le thermomètre à hydrogène en est l'exemple classique.

2.4. Thermomètres à tension de vapeur

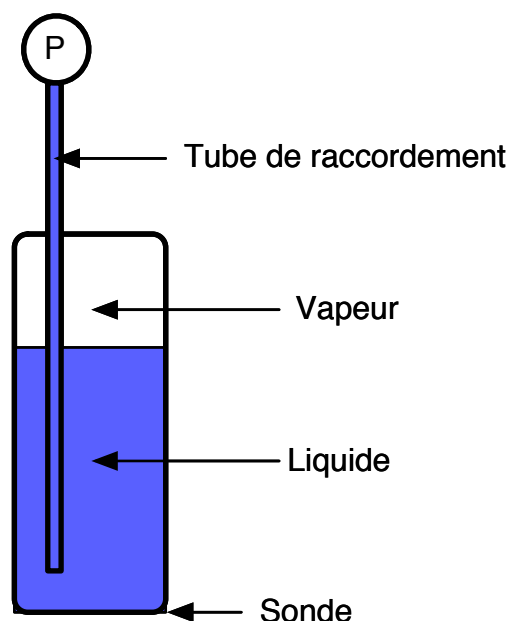
2.4.1. Définition

On appelle tension de vapeur d'un liquide, la pression sous laquelle ce liquide est en équilibre thermodynamique avec sa phase vapeur. La tension de vapeur n'est fonction que de la température d'un liquide donnée. À une température correspond pour le liquide choisie une pression de vapeur fixe.

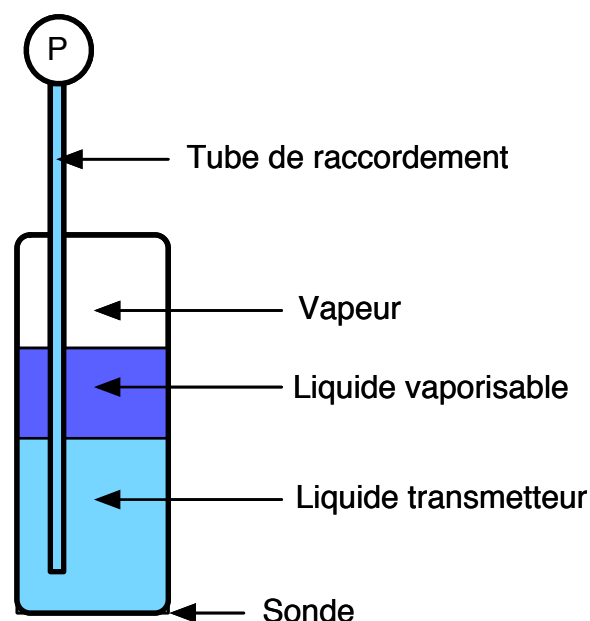


2.4.2. Principe

La mesure thermométrique se fait par l'intermédiaire d'une mesure de la tension de vapeur d'un liquide. La réalisation la plus simple est le thermomètre à simple remplissage. Lorsque la sonde est placée dans une enceinte chaude, une partie du liquide se vaporise. Un équilibre liquide/vapeur s'établit, fonction de la température. La pression a augmenté pour se fixer à la valeur de la tension de vapeur du liquide. Cette pression est transmise par le liquide au manomètre de mesure.



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



Liquides de remplissage et domaine d'utilisation :

Liquide	Domaine d'utilisation Température en °C	Domaine d'utilisation Pression en 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

Remarques :

- La position de la sonde par rapport au capteur de pression influence la mesure.
- L'ordre de grandeur de la classe de précision est de 1 %.

2.5. Thermomètres à dilatation de solide

2.5.1. Principe

Lorsqu'une tige métallique est portée à la température θ sa longueur varie. La relation entre sa longueur L et θ est :

$$L = L_0(1 + \alpha\theta)$$

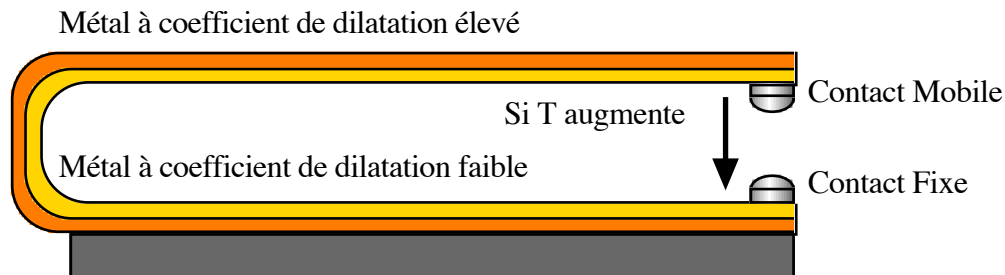
Avec :

- L la longueur de la tige à la température θ ;
- L_0 la longueur de la tige à 0 °C ;
- θ la température en °C ;
- α le coefficient de dilatation linéaire du métal.

2.5.2. Bilame

Une bilame thermique est constituée de deux bandes d'alliage dont les coefficients de dilatation sont très différents, soudées à plat sur toute leur surface. Lorsqu'une telle bande est soumise à une variation de température, les dilatations différentes des deux faces provoquent des tensions, il en résulte une incurvation de l'ensemble.

La soudure des deux constituants doit être suffisamment intime pour que la zone de jonction soit mécaniquement aussi résistante que chacune des deux lames.

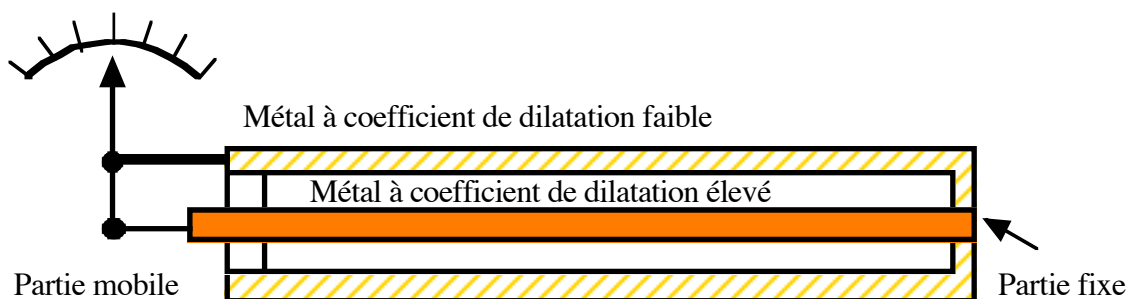


Exemple de constitution :

- Métal très dilatable : Alliage de fer ;
- Métal peu dilatable : Invar.

2.5.3. Pyromètre linéaire

La sonde est formée d'une gaine de silice dans laquelle est placé un barreau métallique dilatable. Une tige en élinvar (Ferronickel dérivé de l'invar auquel on a ajouté du chrome pour assurer un module d'élasticité constant) transmet la dilatation du barreau à un système amplificateur permettant la lecture (ou la transmission).

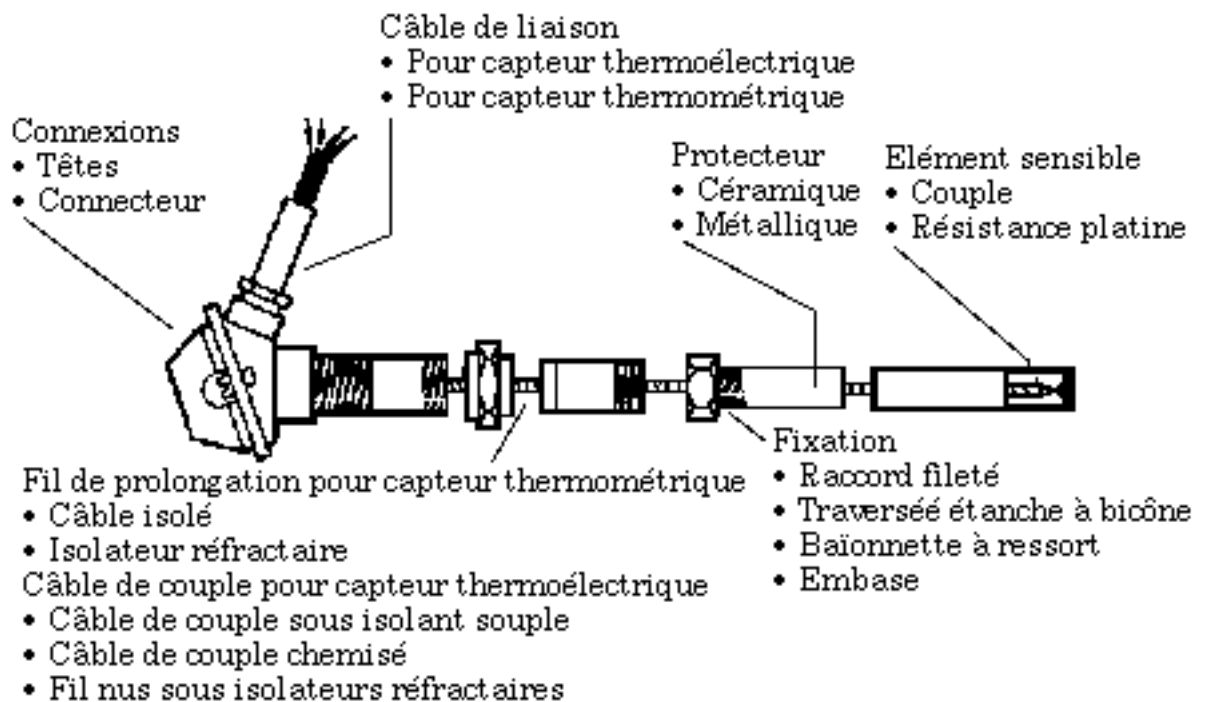


3. Thermomètres électriques

3.1. Présentation

Les capteurs qui précèdent sont à lecture directe et sont peut utilisés dans les régulations industrielles. De plus, à l'exception du thermomètre à gaz l'indication de température est proche du lieu de mesure.

Les capteurs électriques qui suivent auront l'avantage d'une plus grande souplesse d'emploi (information transmissible, enregistrement) tout en gardant une précision suffisante pour les emplois industriels et beaucoup d'emplois de laboratoire.



On décompose les capteurs de température en deux sous catégories :

- Les capteurs passifs, à résistance ou thermistance ;
- Les capteurs actifs, à couple thermoélectrique.

3.2. Thermomètres à résistance et à thermistance

Le fonctionnement des thermomètres à résistance et thermistances est basé sur le même phénomène physique ; l'influence de la température sur la résistance électrique d'un conducteur. La mesure d'une température est donc ramenée à la mesure d'une résistance. Comme la caractéristique résistance/température est de nature différente pour un métal et un agglomérat d'oxydes métalliques, deux cas sont distingués. On parlera de thermomètre à résistance d'une part et de thermistance d'autre part.

3.2.1. Thermomètres à résistance

Le conducteur est un élément métallique. On peut établir une relation bijective entre la résistance R et la température θ et ainsi mesurer θ en mesurant R .

Cette relation est de la forme :

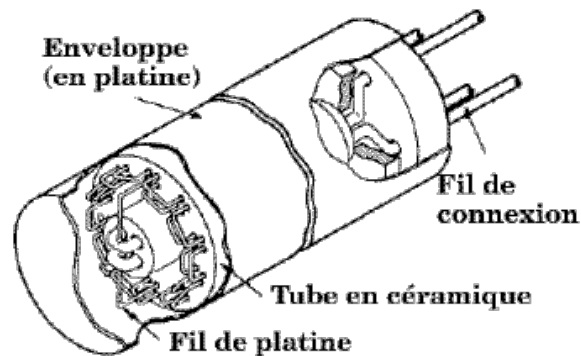
$$R = R_0(1 + a\theta + b\theta^2 + c\theta^3)$$

avec θ la température en °C, R_0 la résistance à 0 °C, a , b et c des coefficients positifs, spécifiques au métal.

Métaux utilisés :

Métal	Résistivité à 0°C en $\mu\Omega$	Point de fusion en °C	Domaine d'emploi en °C	$\frac{R(100^\circ\text{C})}{R(0^\circ\text{C})}$
Cuivre	7	1 083	-190 à 250	1,427
Nickel	6,38	1 453	-60 à 180	1,672
Platine	9,81	1 769	-250 à 1100	1,392

C'est le platine qui est le matériaux le plus utilisé. La sonde Pt100 est une sonde platine qui a une résistance de 100 Ω pour une température de 0 °C. (138,5 Ω pour 100 °C).



3.2.2. Thermomètres à thermistance

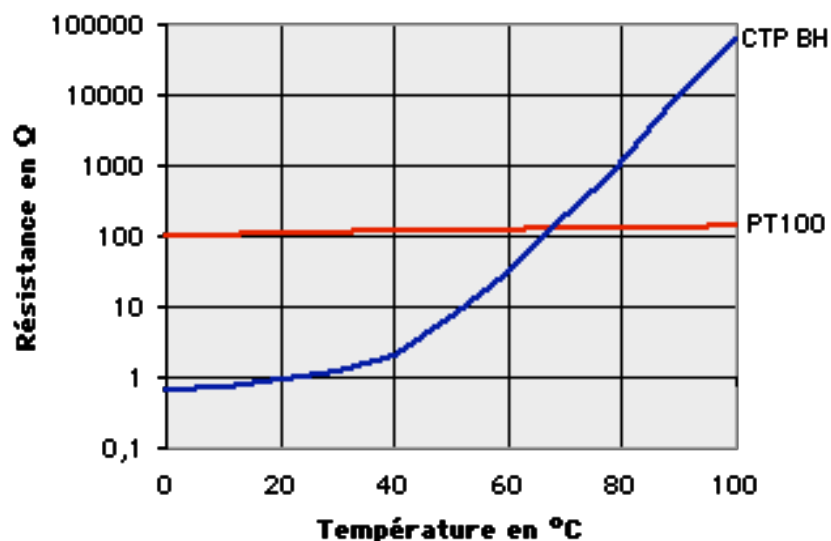
Une thermistance est un agglomérat d'oxydes métalliques frittés, c'est-à-dire rendus compacts par haute pression exercée à température élevée, de l'ordre de 150 bars et 1000 °C.

La composition d'une thermistance peut-être, par exemple :

- Fe_2O_3 (oxyde ferrique) ;
- MgAl_2O_4 (aluminat de magnésium) ;
- Zn_2TiO_4 (titane de zinc).

La résistance électrique d'une thermistance est très sensible à l'action de la température. Il existe deux types de thermistance, les CTN à coefficient de température négatif, et les CTP à coefficient de température positif. La loi de variation est de la forme :

$$R = a \times \exp \frac{b}{\theta}$$



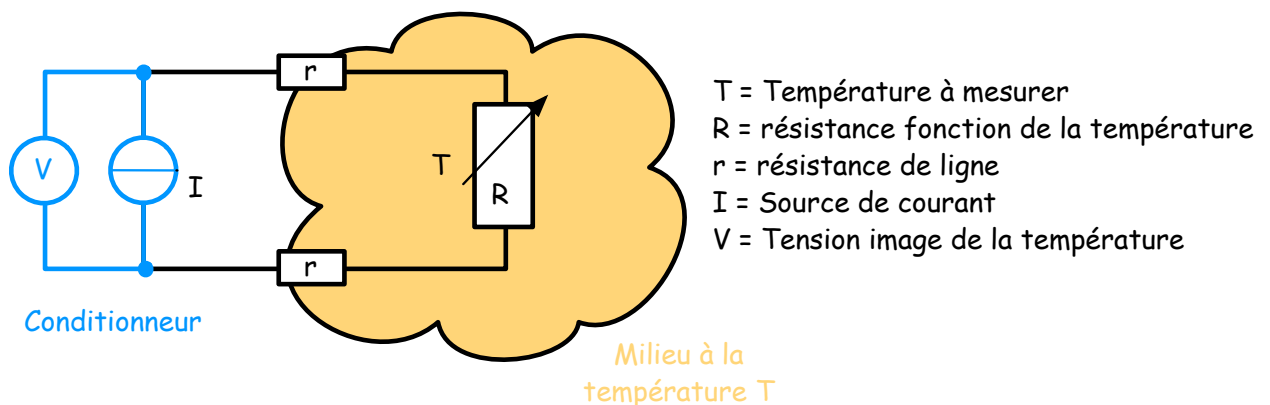
Un second avantage des thermistances est leur faible encombrement. On les fabrique sous forme de petits cylindres ($d = 1$ à 12 mm, $L = 5$ à 50 mm) de disques, de perles. La variation de résistance des thermistances dépend des matériaux utilisés. Leur domaine d'utilisation va de -80°C à $+700^{\circ}\text{C}$ avec une précision de $0,1$ à $0,5^{\circ}\text{C}$. Les thermistances ne présentent pas le phénomène de polarisation et peuvent être traversées indifféremment par un courant continu ou alternatif.



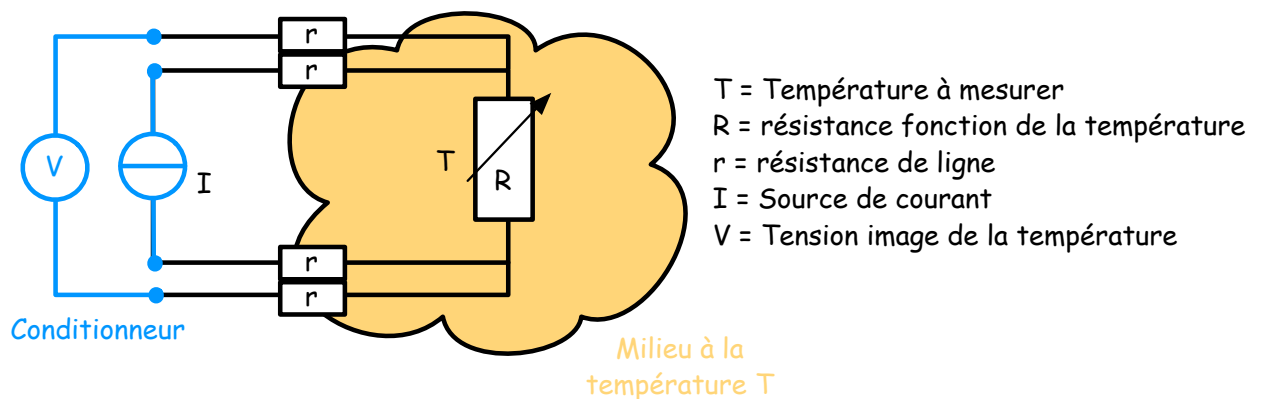
L'emploi des thermistances a donc des avantages de sensibilité et de faible encombrement, mais la loi de variation de la résistance en fonction de la température n'est pas linéaire.

3.2.3. Montage de mesure

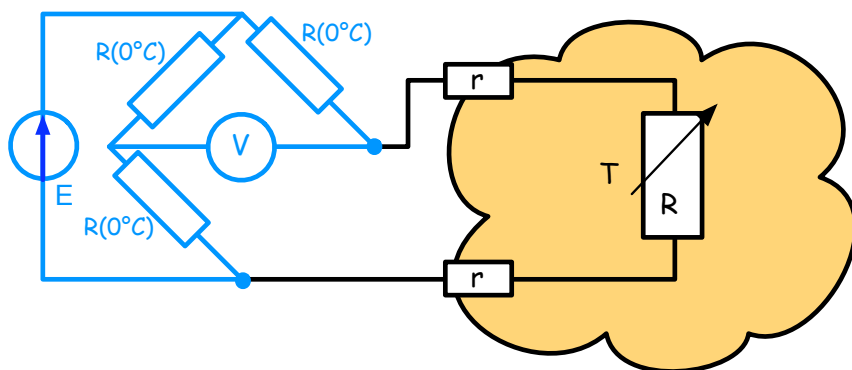
La mesure de la température se ramène donc à une mesure de résistance. La méthode la plus simple, consiste à alimenter la résistance avec un courant I et de mesurer la tension aux bornes de la résistance (on rappelle : $U = R \times I$).



Dans le montage précédent, la tension V dépend aussi des résistances de ligne r . Pour éviter cela, on ajoute deux fils aux bornes de la résistance, on utilise alors une résistance avec quatre fils.



Les deux montages précédents ne permettent pas de supprimer simplement la composante continue $R(0^\circ\text{C})$ de la résistance de mesure R . On préfère généralement utiliser un montage utilisant un pont de Wheatstone.

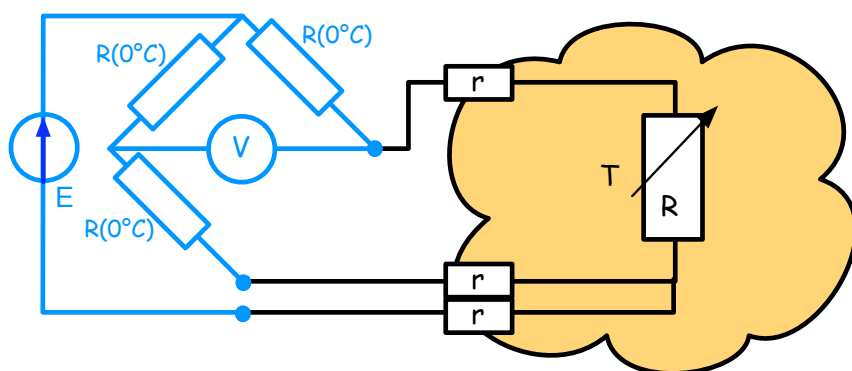


T = température à mesurer
 R = résistance fonction de la température
 $R(0^\circ\text{C})$ = valeur de R à 0°C
 r = résistance de ligne
 E = Source de tension
 V = Tension image de la température

Si on néglige les résistances r par rapport $R(0^\circ\text{C})$ et que l'on note $R(T) = R(0^\circ\text{C}) + \alpha T$ on démontre :

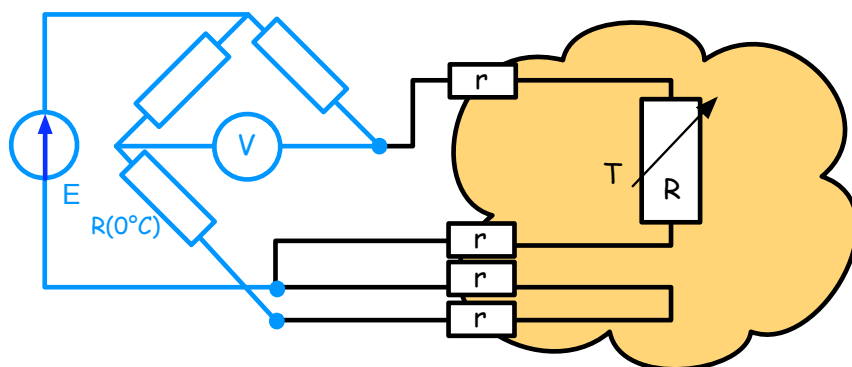
$$V = \frac{\alpha T}{2R_0 + \alpha T} \times \frac{E}{2}$$

Pour diminuer encore plus l'influence des résistances de ligne, on utilise un montage trois fils,



T = température à mesurer
 R = résistance fonction de la température
 $R(0^\circ\text{C})$ = valeur de R à 0°C
 r = résistance de ligne
 E = Source de tension
 V = Tension image de la température

ou mieux un montage quatre fils.



T = température à mesurer
 R = résistance fonction de la température
 $R(0^\circ\text{C})$ = valeur de R à 0°C
 r = résistance de ligne
 E = Source de tension
 V = Tension image de la température

On trouve d'après la norme CEI 751 les schémas de connections du tableau :

2 fils	3 fils	4 fils	4 fils - Boucle aveugle

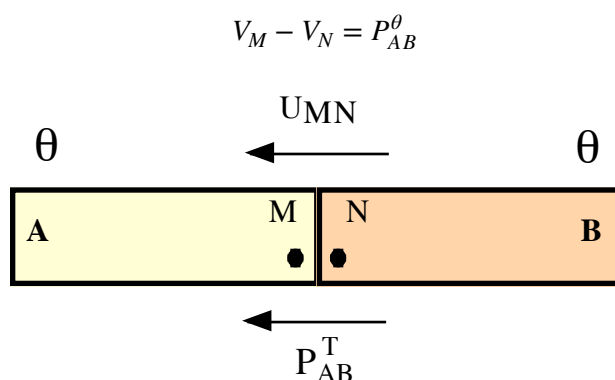
La recherche d'une bonne sensibilité de mesure conduit à faire traverser la résistance par un courant relativement important. Cependant, celui-ci risque alors de provoquer par effet Joule un échauffement du capteur qui peut cesser d'être négligeable et qui en tous cas doit pouvoir être estimé et minimisé : c'est pourquoi les courants de mesure sont généralement de l'ordre du mA et rarement supérieurs à 10 mA.

3.3. Thermocouples

3.3.1. Principes

Les phénomènes thermoélectriques dans les chaînes de conducteurs métalliques ou semi-conducteurs décrivent les conversions d'énergie qui s'opèrent en leur sein, effet Joule mis à part, entre énergie d'agitation thermique et énergie électrique des charges en mouvement.

À la jonction de deux conducteurs A et B différents mais à la même température, s'établit une différence de potentiel qui ne dépend que de la nature des conducteurs et de leur température θ (effet Peltier).



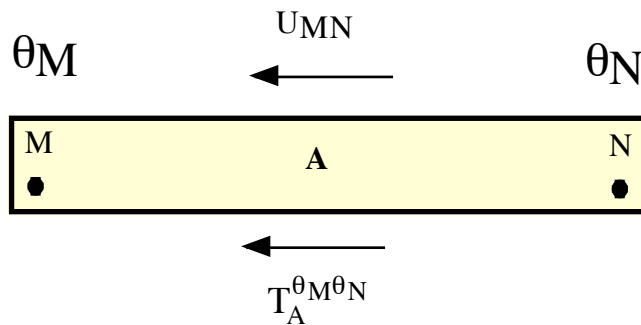
La loi de Volta nous dit que dans un circuit isotherme, constitué de conducteurs différents, la somme des f.e.m. de Peltier est nulle. On a donc :

$$P_{AB}^\theta + P_{BC}^\theta = P_{AC}^\theta$$

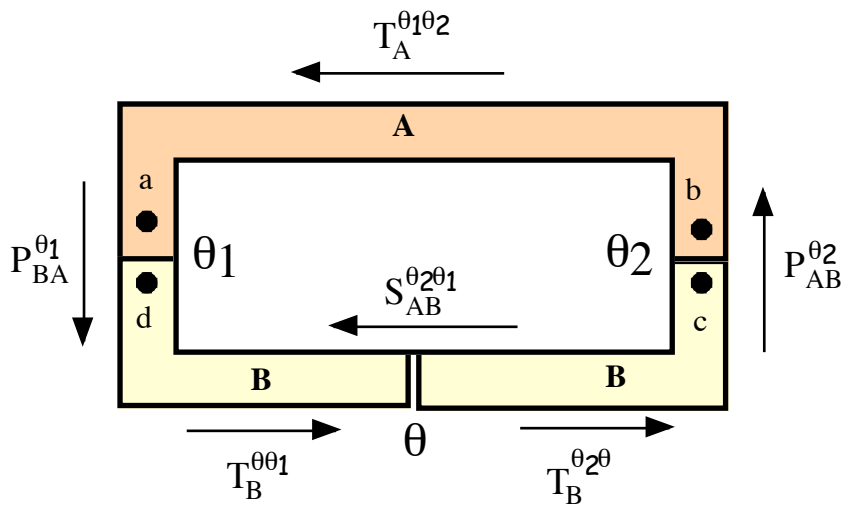
Entre deux points M et N à température différente, à l'intérieur d'un conducteur homogène A s'établit une force électromotrice qui ne dépend que de la nature du conducteur et des températures au points M et N (Effet Thomson) :

$$T_A^{\theta_M \theta_N} = \int_{\theta_N}^{\theta_M} h_A \times d\theta$$

C'est la force électromotrice de Thomson. h_A le coefficient de Thomson du conducteur A est une fonction de la température.



Soit un circuit fermé, constitué de deux conducteurs A et B dont les jonctions sont à des températures θ_1 et θ_2 . Ce circuit constitue un couple thermoélectrique. Ce couple est le siège d'une force électromotrice dite de Seebeck qui résulte des effets de Peltier et de Thomson qui s'y produisent.



$$S_{AB}^{\theta_2 \theta_1} = T_B^{\theta \theta_2} + P_{AB}^{\theta_2} + T_A^{\theta_1 \theta_2} + P_{BA}^{\theta_1} + T_B^{\theta \theta_1}$$

$$S_{AB}^{\theta_2 \theta_1} = T_B^{\theta_2 \theta_1} - T_A^{\theta_2 \theta_1} + P_{AB}^{\theta_2} - P_{AB}^{\theta_1}$$

On démontre (lois de composition) :

$$S_{AC}^{\theta_2 \theta_1} = S_{AB}^{\theta_2 \theta_1} + S_{BC}^{\theta_2 \theta_1}$$

$$S_{AB}^{\theta_3 \theta_1} = S_{AB}^{\theta_3 \theta_2} + S_{AB}^{\theta_2 \theta_1}$$

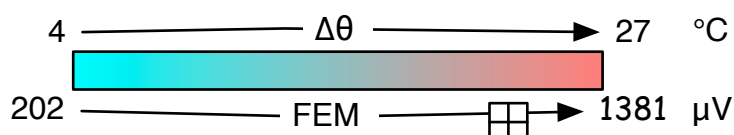
3.3.2. Application

Un thermocouple fournit une tension qui est fonction de **deux températures** et de **deux conducteurs**. Pour les thermocouples normalisés, on dispose de tables de références qui fournissent S_{AB} pour une soudure à la température θ , l'autre à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pour déterminer la tension fournie par un thermocouple, on utilisera donc la table correspondante et la formule de compositions des températures.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	50	101	151	202	253	303	354	405	456
10	507	558	609	660	711	762	814	865	916	968
20	1019	1071	1122	1174	1226	1277	1329	1381	1433	1485

On cherche la FEM fournie par le thermocouple pour le couple de température : ($4^{\circ}\text{C}; 27^{\circ}\text{C}$).

On peut représenter les données comme sur la figure (Attention : la relation est de type complexe, elle est représentée ici par un tableau).



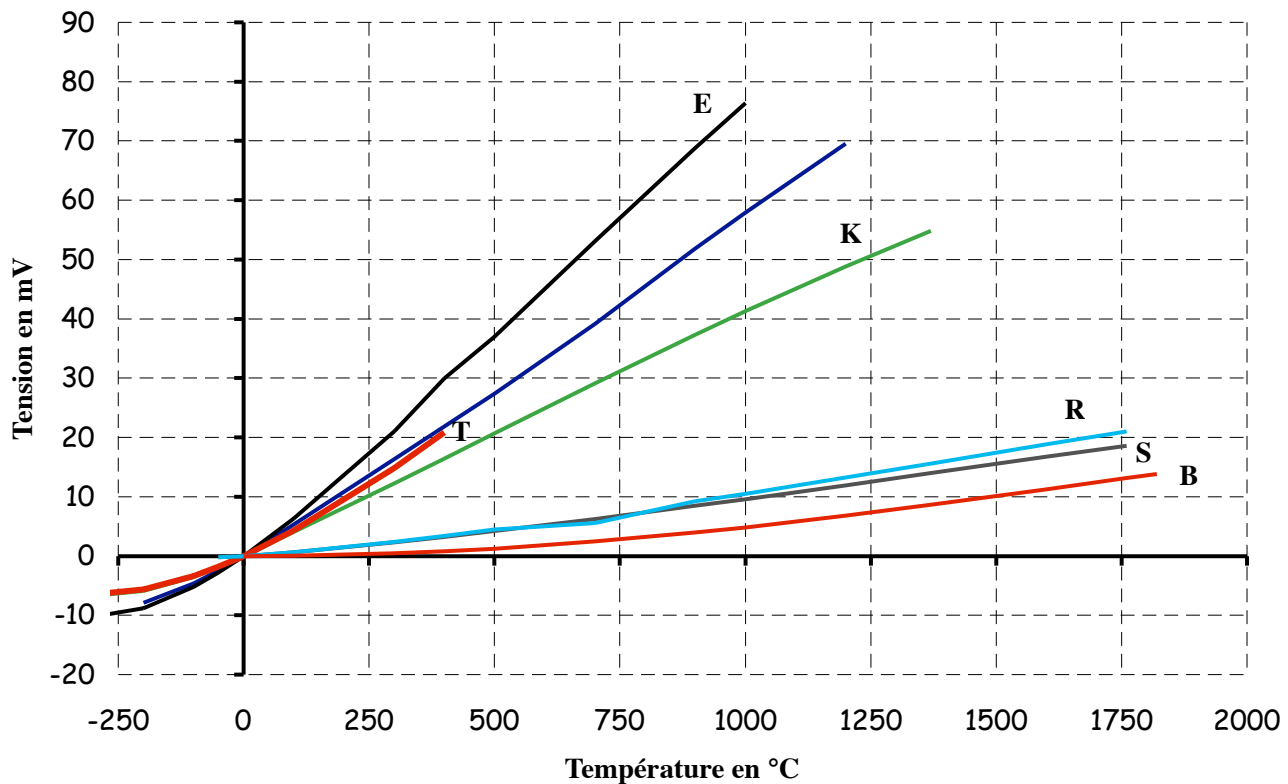
La FEM est égale à $(1381\text{ }\mu\text{V} - 202\text{ }\mu\text{V})$ soit $1179\text{ }\mu\text{V}$.

3.3.3. Les différents types de thermocouples

Pour la réalisation d'un couple thermoélectrique on choisit des fils utilisables dans la zone de température attendue pour la mesure et présentant des caractéristiques de précision et de sensibilité convenables. On tient compte également de l'action corrosive du milieu ambiant (atmosphère oxydante, réductrice, sulfureuse, etc...) sur les constituants du couple pour arrêter son choix.

Le tableau suivant donne les caractéristiques simplifiée des thermocouples les plus courants définies par la norme CEI 584.1.

Code littéral	Couple		Usage continue Usage intermittent	Précision en %	Remarques
K	Nickel - Chrome Nickel - Aluminium	Vert (+)	0°C à 1100°C	1,5	Bien adapté aux milieux oxydants
		Blanc (-)	180°C à 1300°C		
T	Cuivre Cuivre - Nickel	Brun (+)	-185°C à 300°C	0,5	
		Blanc (-)	-250°C à 400°C		
J	Fer Cuivre - Nickel	Noir (+)	20°C à 700°C	1,5	Pour milieu réducteur
		Blanc (-)	-180°C à 750°C		
E	Nickel - Chrome Cuivre - Nickel	Violet (+)	0°C à 800°C	1,5	Utilisation sous vide ou milieu légèrement oxydant
		Blanc (-)	-40°C à 900°C		
R	Platine - 13% Rhodium Platine	Orange (+)	0°C à 1600°C	1	
		Blanc (-)	0°C à 1700°C		
S	Platine - 10% Rhodium Platine	Orange (+)	0°C à 1600°C	1	Résistance à l'oxydation à la corrosion
		Blanc (-)	0°C à 1700°C		

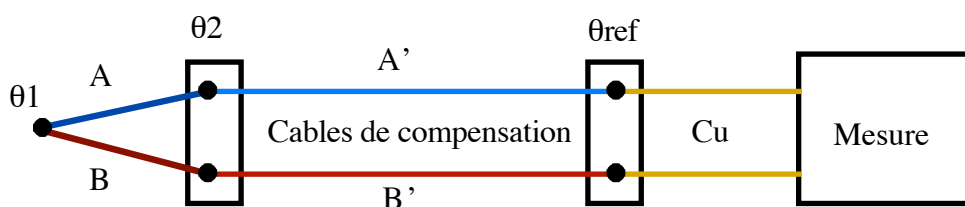


3.3.4. Câbles de compensation

On utilise les câbles de compensation dans deux cas :

- Lorsque les métaux formant le couple sont d'un prix très élevé (métaux précieux notamment) ;
- Lorsque la distance entre la prise de température et la jonction de référence est grande.

Il convient alors de réduire la résistance du circuit lorsque la résistance interne de l'appareil de lecture est plus élevée (galvanomètre). Le schéma de câblage de principe est représenté ci-dessous :



On limite au minimum la longueur des fils A et B du thermocouple. La liaison entre la jonction intermédiaire à température θ_2 et la jonction de référence à température θ_{ref} est assurée par les câbles de compensation A' et B' associés aux métaux A et B respectivement. La condition à respecter est que la force électromotrice aux bornes des conducteurs A' et B' réunis en couple soit la même que celle du couple (A,B). Cette condition s'exprime par l'équation :

$$S_{AB}^{\theta_2 \theta_{ref}} = S_{A'B'}^{\theta_2 \theta_{ref}}$$

En conclusion, les câbles de compensation A' et B' ne modifient pas la tension délivrée par le couple AB à condition que :

- Les jonctions AA' et BB' soient à même température θ_2 ;
- Les couples A'B' et AB aient la même force électromotrice de Seebeck entre θ_2 et 0°C .

Au-delà de la jonction de référence et jusqu'à l'appareil de mesure, la liaison peut être assurée par des fils de cuivre moins résistants et beaucoup moins chers que les fils du thermocouple et les câbles de compensation eux-mêmes. Il est important évidemment d'associer convenablement les câbles de compensation et les thermocouples correspondants. Une erreur sur les polarité introduirait une erreur systématique considérable puisque la compensation ne jouerait pas. La nature des câbles de compensation les plus courants est indiquée au tableau ci-dessous en regard des thermocouples correspondants.

Fils de compensation		Fils thermocouples	
Positif	Négatif	Positif	Négatif
Cuivre	Constantan T	Cuivre	Constantan
Fer	Constantan J	Fer	Constantan
Cuivre	Constantan V	Chromel	Alumel
Cuivre	Cupronickel	Platine Rhodié 10 %	Platine

Pour le couple [Fer/Constantan], on utilise des câbles de compensation en [Fer/Constantan] qui sont meilleur marché que les thermocouples car l'objet d'une sélection moins sévère. Il suffit en effet que les câbles de compensation aient la FEM convenable dans la plage limitée où se situera θ_2 .

3.3.5. Méthodes de mesure

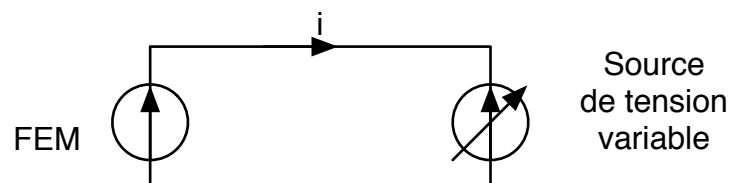
C'est la FEM de Seebeck dont le thermocouple est le siège qui fournit l'information de température cherchée. Elle ne peut être connue avec précision que si l'on minimise la chute ohmique de tension due à la circulation d'un courant dans les éléments du thermocouple et les fils de liaison : leur résistance est en effet généralement mal connue car fonction de la température ambiante d'une part et de la température à mesurer d'autre part.

Deux méthodes sont généralement employées :

- La mesure à l'aide d'un millivoltmètre qui permet de minimiser la chute ohmique si sa résistance interne est élevée.
- La méthode d'opposition qui autorise une mesure rigoureuse puisque dans ce cas le courant traversant le thermocouple est annulé.

Méthode d'opposition :

On place une source de tension variable face à la FEM à mesurer. Quand le courant est nul, la source variable a la même tension que la FEM à mesurer.



3.3.6. Comparaison avec les thermomètres à résistance

Le thermocouple a une capacité calorifique plus faible (temps de réponse plus court) et une température de fonctionnement (jusqu'à 2700 °C) plus élevée que les capteurs à variation de résistance. De plus, grâce à la mesure par opposition, le thermocouple est utilisé pour les basses températures.

4. Les pyromètres optiques

4.1. Présentation

La pyrométrie optique est une méthode de mesure de la température basée sur la relation entre la température d'un corps et le rayonnement optique (infrarouge ou visible) que ce corps émet. Les capteurs utilisés sont donc des capteurs optiques, photo-électriques ou thermiques. L'intérêt de la pyrométrie optique est de permettre la détermination d'une température sans contact avec l'objet ; c'est donc une méthode appropriée quand les conditions expérimentales n'autorisent pas l'utilisation de capteurs thermométriques classiques :



- Température très élevée (supérieure à 2000 °C) ;
- Mesures à distance ;
- Environnement très agressif ;
- Pièce en mouvement ;
- Localisation des points chauds.

4.2. Lois du rayonnement thermique du corps noir

Tout corps émet spontanément et en permanence un rayonnement électromagnétique dont le spectre continu a une répartition énergétique fonction de la température : c'est le rayonnement thermique. Les lois de cette émission sont d'abord établies pour un corps idéal, le corps noir, caractérisé par une absorption totale de tout rayonnement incident ; le rayonnement thermique d'un corps réel, selon son pouvoir absorbant, se rapproche plus ou moins de celui du corps noir.

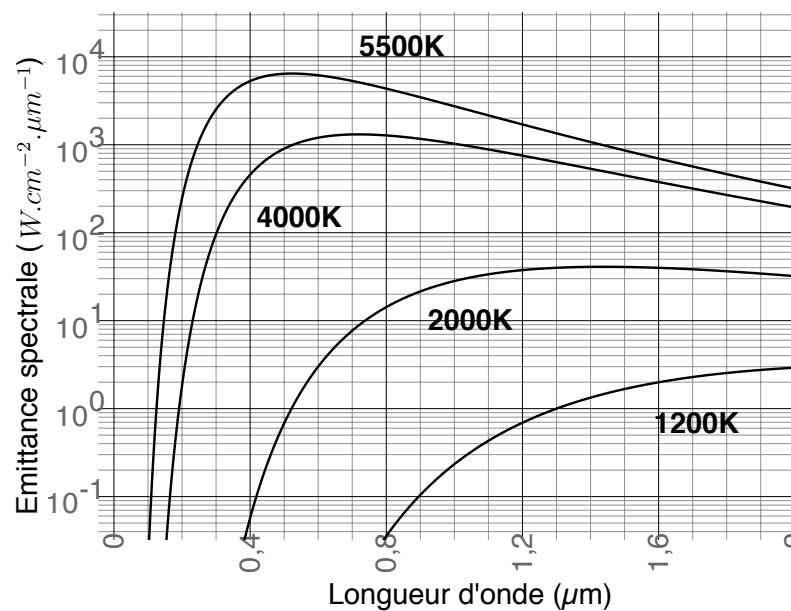
- L'émittance E_n : C'est la puissance totale rayonnée dans un hémisphère, par unité de surface de l'émetteur.
- L'émittance spectrale $E_{\lambda,n}$: C'est la densité spectrale de puissance rayonnée dans un hémisphère, par unité de surface de l'émetteur, à une longueur d'onde λ ;

La loi, de Planck est la loi fondamentale de l'émission thermique ; elle donne l'émittance spectrale d'une source (en $\text{W.m}^{-3}.\text{sr}^{-1}$) qui est un corps noir en fonction de la longueur d'onde et de la température absolue θ de cette source :

$$E_{\lambda,n}(\theta) = \frac{1}{\pi} \times \frac{C_1 \times \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda\theta}\right) - 1}$$

avec :

- $C_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^2$ et $C_2 = 14,4 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$;
- h : constante de Planck = $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$;
- c : vitesse de la lumière = $2,99 \cdot 10^8 \text{ m/s}$;
- k : constante de Boltzmann = $1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$;

Émittance spectrale en fonction de la longueur d'onde pour diverses températures :

Sur la figure ci-dessus, on remarque l'augmentation rapide de l'émittance avec la température et le déplacement du spectre de l'infrarouge vers le visible (de 0,4 μm à 0,8 μm) au fur et à mesure que la température augmente.

- En dessous de 500 °C, le rayonnement thermique est quasi totalement dans le domaine infrarouge ;
- Dans le cas du soleil, ($T = 5500 \text{ K}$) E_{max} correspond au maximum de sensibilité de l'oeil.

4.3. Rayonnement thermique d'un corps réel

L'émittance spectrale d'une cible réelle E , est liée à l'émittance spectrale du corps noir $E_{\lambda,n}$ par la relation :

$$E_{\lambda}(\theta) = e(\lambda, \theta) \times E_{\lambda,n}(\theta)$$

Avec $e(\lambda, \theta)$ est l'émissivité à la longueur d'onde λ et à la température θ du matériau constituant la cible.

L'émissivité d'un corps est égale à son coefficient d'absorption (loi de Kirchhoff) : sa valeur, égale à 1 pour le corps noir, est inférieure à 1 pour un corps réel et dépend, en particulier, de sa nature et de son état de surface. L'incertitude sur les valeurs exactes de $e(\lambda, \theta)$ est l'une des principales sources d'erreurs potentielles en pyrométrie optique.

4.4. Principes généraux des pyromètres optiques

Suivant qu'on utilise les grandeurs spectrales à une longueur d'onde déterminée ou les grandeurs intégrales sur l'ensemble du spectre visible et infrarouge, les résultats obtenus n'ont pas la même signification physique.

On doit distinguer :

- Les pyromètres monochromatiques ;
- Les pyromètres bichromatiques ;
- Les pyromètres mesureurs d'énergie.

Un dispositif optique forme l'image de la source S sur la surface S' du récepteur avec juxtaposition d'une source de référence dans les appareils de zéro.

4.5. Le pyromètre optique à disparition de filament

Il s'agit d'un pyromètre monochromatique ($\lambda = 0,65 \mu\text{m}$). L'image du filament de tungstène d'une lampe à incandescence est superposée à l'image de la cible. Le courant de chauffage I_f du filament est ajusté de façon que les deux images se confondent.

Un étalonnage préalable au moyen d'un corps noir ($I_f = F(0,65 \mu\text{m}, \theta)$) permet connaissant l'émissivité $e(0,65 \mu\text{m}, \theta)$ de la cible d'en déduire la température θ par la relation précédente.

Limite d'emploi des capteurs photoélectrique en pyrométrie optique :

Capteurs	Température inférieure mesurable
Photodiodes Si	600 °C
Photodiodes Ge	200 °C
Photorésistance Pb S	100 °C
Photorésistance Pb Se	50 °C
Photorésistance In Sb	0 °C
Photorésistance Hg Cd Te	-50 °C

4.6. Pyromètres bichromatiques

Ce pyromètre peut être considéré comme un double pyromètre monochromatique exploitant deux plages voisines du rayonnement thermique centrées sur des longueurs d'onde λ_1 et λ_2 et de même largeur $d\lambda$.

Si l'on note $s(\lambda)$ la sensibilité du capteur à la fréquence λ , $k(\lambda)$ le coefficient d'absorption du milieu, l'énergie électrique fournie par le détecteur est :

Pour la plage centrée sur λ_1 : $E_{e1}(\lambda_1) = s(\lambda_1) \times p(\lambda_1) \times e(\lambda_1) \times E_{\lambda_1, n}(T)$

Pour la plage centrée sur λ_2 : $E_{e1}(\lambda_2) = s(\lambda_2) \times p(\lambda_2) \times e(\lambda_2) \times E_{\lambda_2, n}(T)$

Dans la mesure où les longueurs d'onde λ_1 et λ_2 sont voisines :

$$e(\lambda_1, \theta) \times s(\lambda_1) \times p(\lambda_1) = e(\lambda_2, \theta) \times s(\lambda_2) \times p(\lambda_2)$$

$$\text{Le rapport des signaux délivrés par le détecteur devient : } \frac{E_{\lambda_1}(\theta)}{E_{\lambda_2}(\theta)} = \frac{E_{\lambda_1, n}(\theta)}{E_{\lambda_2, n}(\theta)} = \frac{\lambda_2^5}{\lambda_1^5} \times \frac{\exp(\frac{C_2}{\lambda_2 \theta} - 1)}{\exp(\frac{C_2}{\lambda_1 \theta} - 1)}$$

Ce rapport, ne dépend que de la température θ de la cible. C'est le grand intérêt de ce type de pyromètre.

4.7. Pyromètres mesureurs d'énergie

L'ensemble du spectre de rayonnement thermique de la cible (en fait une grande partie) est reçu par un détecteur à large bande, de type thermique. En pratique le pyromètre est étalonné dans ses conditions d'emploi à l'aide d'un thermocouple lorsque cela est possible.