

MESURES DE TEMPERATURES

Introduction

I) Repérage d'une température

II) Définitions de la température, grandeur mesurable

III) Mesure absolue d'une température

IV) Généralités sur les capteurs de température

V) Mesures optiques

VI) Mesures mécaniques

VII) Mesures électriques

Bibliographie

Sylvie Rainson

Septembre 2012

INTRODUCTION

Ce complément de cours vous permettra :

- de différencier les notions de repérage et mesurage sur l'exemple de la température
- de revoir les différentes définitions de la température conformément aux programmes des classes préparatoires 1^{ère} année
- de préparer les montages :

n°1: Mesure d'une température : capteur, conditionneur, amplificateur d'instrumentation. :

n°46: Régulation de température sur un système physique simple : identification, détermination et mise en œuvre d'un correcteur

en approfondissant les propriétés physiques de base des capteurs de température.

Pour plus de développements, on pourra se reporter à la bibliographie donnée à la fin du polycopié.

MESURES DE TEMPERATURES

Page

I) Repérage d'une température : 1

- 1) Première notion de température
- 2) Equilibre thermique
- 3) Principe zéro de la thermodynamique
- 4) Thermomètre
- 5) Echelle de température
- 6) Echelle affine de température
- 7) Echelle centésimale

II) Définitions de la température, grandeur mesurable : 2

1) Température cinétique

- a) Pour un gaz parfait monoatomique
- b) Equation d'état d'un gaz parfait monoatomique
- c) Cas d'un corps quelconque
- d) Température en degrés Celsius

2) Température thermodynamique

III) Mesure absolue : 3

1) Thermomètre à gaz à volume constant

- a) Température absolue
- b) Schéma du dispositif
- c) Protocole expérimental

2) Echelle internationale pratique de température

3) Instruments légaux d'interpolation

MESURES DE TEMPERATURES

	Page
<u>IV) Généralités sur les capteurs de température :</u>	6
1) Schéma général d'un capteur	
2) Qualités demandées à un capteur de température	
3) Différents types de capteurs de température	
4) Perturbations apportées par le capteur à la température à mesurer lorsqu'il y a contact	
<u>V) Mesures optiques :</u>	8
1) Principe	
2) Pyromètre optique monochromatique à disparition de filament	
3) Caméra thermique	
a) Rôle de la caméra thermique	
b) Principe de la mesure de la puissance rayonnée	
c) Performances d'une caméra thermique	
<u>VI) Mesures mécaniques :</u>	10
1) Dilatation d'un métal	
a) Bilame	
b) Pyromètre à dilatation	
2) Dilatation d'un liquide	

MESURES DE TEMPERATURES

Page

VI) Mesures électriques :

1) Thermistance	11
a) Présentation	
b) Thermistances CTN	
c) Thermistances CTP	
d) Performances	
2) Sonde à résistance de platine	13
a) Principe	
b) Constitution	
c) Loi $R(t)$	
d) Méthodes de mesure de R	
e) Précautions à prendre lors des mesures	
f) Performances	
3) Couples thermoélectriques	16
a) Effets thermoélectriques	
b) Loi des températures successives	
c) Loi des métaux intermédiaires	
d) Mesure d'une température inconnue avec un thermocouple	
e) Autres montages pratiques	
f) Thermocouples usuels	
g) précautions à prendre	
h) Performances	
i) Câbles d'extension	
4) Comparaison de la thermistance, de la sonde de platine, du thermocouple	23
5) Thermomètre à quartz	24
6) Thermomètre à diode	24
7) Capteur intégré	24

Bibliographie

ENS de Cachan. M2 FES physique appliquée.

Bibliographie pour le cours « mesures de température »

I) Repérage d'une température :

« Faroux » : Thermodynamique, 1^{ère} et 2^{ème} année de J-P Faroux et J Renault. Editions Dunod 1997

« Perez » : Thermodynamique, fondements et applications de J-P Pérez et A-M Romulus. Ed Masson 1993

II) Définitions de la température, grandeur mesurable :

« Faroux »

Thermodynamique 1ère année de J-M Brébec, J-N Briffaut, P Denève, T Desmarais, A Favier, M Ménétrier, B Noël, R.Noël, C Orsini. Ed Hachette 1996 ou 2003

Thermodynamique 1ère et 2ème année de S Olivier et H Gié. Ed Lavoisier Tec et Doc 1996

Etalons et unités de mesure. Brochure du BNM. 1996

III) Mesure absolue :

« Faroux » et « Perez »

IV) Généralités sur les capteurs de température

« Ash » : Les capteurs en instrumentation industrielle de Georges Ash et collaborateurs. Ed Dunod 1996

« Bert » : Physique des capteurs, capteurs de température de Jacques Bert. Ed Belin 1982

« Riout » : Le choix des capteurs industriels de J.Riout. Ed CETIM 1985.

« Grout » : Instrumentation industrielle. Spécification et installation des capteurs et des vannes de régulation de Michel Grout. Ed Dunod 2002.

Encyclopédie des Techniques de l'ingénieur, « Mesures et contrôle », volume R3. Article R2515 :

« Mesures des températures »

Génie électrique. IUT. BTS... de C.François. Ellipses 2004. Chapitre 34.

Guide pratique des capteurs de Noboru Ichinose et Tetsuji Kobayashi. Ed Masson 1990

V) Mesures optiques :

« Perez », « Bert », « Grout »

Encyclopédie des Techniques de l'ingénieur, « Mesures et contrôle », volume R3. Article R2610 : « Pyrométrie optique »

Les capteurs. Exercices et problèmes corrigés de P.Dassonville. Dunod.2005. Problèmes 19, 23.

Encyclopédie des Techniques de l'ingénieur, « Electronique ». Articles E405 : « Systèmes optroniques passifs.

Caméras thermiques » métallique »

VI) Mesures mécaniques :

« Bert », « Grout »

ENS de Cachan. M2 FES physique appliquée.

Bibliographie pour le cours « mesures de température »

VII) Mesures électriques :

« Ash », « Bert », « Riout », « Grout », «Perez»

Génie électrique. IUT. BTS... de C.François. Ellipses 2004. Chapitre 34.

Les capteurs. Exercices et problèmes corrigés de P.Dassonville. Dunod.2005.

Encyclopédie des Techniques de l'ingénieur, « Mesures et contrôle », volume R3. Articles R2570 :

« Thermomètres à résistance métallique » et R2590 : « Couples thermoélectriques »

« Paratte » : Systèmes de mesure de P-A Paratte et P.Robert. Ed Dunod 1986.

Des idées de montages dans :

* « Ash »

* Les capteurs. Exercices et problèmes corrigés de P.Dassonville. Dunod.2005.

* Capteurs : principes et utilisations par F.Baudoin et M.Lavabre. Casteilla 2007.

* Bulletin de l'Union des Physiciens : BUP

Octobre 1986 : Montage pour régulation de température

Février 1993 : réalisation d'un thermomètre électronique avec thermistance CTN (il y a aussi la réalisation d'un pHmètre électronique dans ce BUP)

Juin 1995 : réalisation d'un capteur de pression et d'un capteur de température (avec un LM 335)

Décembre 1995 : temps de réponse d'un capteur de température LM 35Z

Novembre 1998 : thermomètre à diode

Juin 2000 : régulation en tout ou rien avec une sonde de platine

MESURES DE TEMPÉRATURE.

I) Repérage d'une température :**1) Première notion de température :**

Elle est physiologique (toucher), mais cette estimation de la température manque de sensibilité et de fidélité.

Pour que la température soit repérable, il faut qu'on puisse définir l'égalité de deux températures et c'est ainsi qu'on définit l'équilibre thermique.

2) Equilibre thermique :

On dit qu'un système est en équilibre thermodynamique lorsque toutes ses variables d'état demeurent constantes au cours du temps et si, lorsqu'il n'est pas isolé, il n'y a aucun échange de matière, énergie, charge électrique avec le milieu extérieur.

Cette notion recouvre celles d'équilibres mécanique, électrique, chimique et la notion d'équilibre thermique associée à l'absence de transfert thermique entre le système et l'extérieur, qui se traduit par l'uniformité de la grandeur « température ».

3) Principe zéro de la thermodynamique :

Si deux systèmes sont en équilibre thermique avec un même troisième, ils sont en équilibre thermique entre eux.

On peut ainsi définir l'égalité de deux températures : la température est repérable, mais pas encore mesurable, car on n'a pas défini le rapport de deux températures.

On va donc utiliser des instruments pour repérer une température.

4) Thermomètre :

Une grandeur thermométrique est une grandeur qui varie toujours dans le même sens avec la température et qui peut servir à repérer une température (ex : volume d'une colonne de liquide à pression constante, résistance d'un conducteur...) Un système muni d'une grandeur thermométrique est un thermomètre.

5) Echelle de température :

Soit g la grandeur thermométrique.

$\theta = f(g)$ est l'équation thermométrique définissant l'échelle de température θ , caractérisée par la fonction f continue et monotone.

Le choix du système, de la grandeur g , de la fonction f sont arbitraires ; il existe donc un grand nombre d'échelles thermométriques différentes qui ne coïncident pas !

Toutes les échelles possèdent des « points fixes » qui correspondent à certaines conditions expérimentales que l'on peut reproduire facilement et auxquelles on attribue arbitrairement une certaine valeur de la température.

Puis habituellement, on divise l'intervalle entre deux points fixes en parties égales et on obtient ainsi une échelle affine de température.

D) 6) Echelle affine de température

On choisit f affine : $\theta = f(g) = a.g + b$

a et b sont déterminés par deux points fixes de température (le plus souvent des température de changement de phase de corps pur à pression P donnée)

Exemples : échelles Réaumur et Fahrenheit.

7) Echelle centésimale :

C'est une échelle affine de température avec :

$\theta = 0$ pour la fusion de la glace à $P = 1 \text{ atm}$; $\theta = 100$ pour l'ébullition de l'eau à $P = 1 \text{ atm}$

$$\text{d'où } \theta = \frac{100}{g_{100} - g_0} (g - g_0) \Leftrightarrow g = g_0 + \frac{g_{100} - g_0}{100} \theta$$

Deux échelles centésimales de température coïncident à 0 et à 100 mais n'ont aucune raison de coïncider aux autres températures. Cette température n'est pas mesurable, mais seulement repérable.

II) Définition de la température, grandeur mesurable :**1) Température cinétique :**

a) Pour un gaz parfait monoatomique :

Un gaz parfait est un gaz dans lequel les interactions entre molécules sont négligeables ; de plus pour un gaz parfait monoatomique, les molécules sont considérées comme ponctuelles.

La température cinétique est définie par :

$$T = \frac{m \cdot \langle v^2 \rangle}{3 \cdot k_B}$$

$$\langle E_c \rangle = \frac{3}{2} k_B T = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle$$

Avec : m = masse d'une molécule de gaz parfait ; k_B = constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

$\sqrt{\langle v^2 \rangle}$ = vitesse quadratique moyenne d'une molécule de gaz parfait (dans un volume mésoscopique). On la note souvent u .

L'unité de T est le kelvin.

Cette définition est théorique car $\langle v^2 \rangle$ est inaccessible à la mesure directe (on a pu mesurer des vitesses de jets atomiques sortant d'un four, mais cela reste une expérience très rare !)

b) Equation d'état d'un gaz parfait monoatomique :

On montre (cf cours de PCSI sur la pression cinétique) que, pour un gaz parfait monoatomique :

$$P = \frac{1}{3} \cdot \frac{N}{V} \cdot m \cdot \langle u^2 \rangle$$

Avec P = pression (au centre d'un volume mésoscopique) ;

N/V = nombre de molécules par unité de volume

On a donc $P \cdot V = N \cdot m \cdot u^2 / 3 = N \cdot k_B \cdot T = n \cdot R \cdot T$

Avec n = quantité de matière = N/N_a , $R = N_a \cdot k_B = 8,314 \text{ J/mol/K}$ et N_a = constante d'Avogadro

L'expérience indique que ceci est vrai pour un gaz réel (même non monoatomique) aux faibles pressions.

II) 1) c) Cas d'un corps pur quelconque :

La température d'un corps est définie à partir de son équilibre thermique avec un gaz parfait monoatomique.

d) Température en degrés Celsius :

C'est t définie par : $t = T - 273,15$

Cela donne expérimentalement $t = 0^\circ\text{C}$ pour la fusion de la glace à $P = 1 \text{ atm}$ et $t = 100^\circ\text{C}$ pour l'ébullition de l'eau à $P = 1 \text{ atm}$. Mais l'échelle Celsius actuelle n'est pas une échelle centésimale.

Nous venons de voir la définition cinétique de la température, qui est la première définition du cours de PCSI.

Mais la température légale (dans le système USI) est définie autrement : c'est la température thermodynamique.

2) Température thermodynamique :

Elle est définie à partir du deuxième principe de la thermodynamique. Ce peut être de différentes façons :

* (1) par $dS = \delta Q/T$ en calculant la variation infinitésimale d'entropie sur un chemin imaginaire réversible où le transfert thermique est δQ

* (2) par le cycle de Carnot avec $Q_1/Q_0 = -T_1/T_0$

* (3) par $T = \left(\frac{\partial U}{\partial S} \right)_V$

On montre qu'il y a identité de la température thermodynamique et de la température cinétique.

La démonstration la plus simple part de la formulation (3) (voir des livres de CPGE antérieurs à 2003)

Dans les programmes de CPGE actuels (MPSI, PCSI, PTSI, BCPST1) « l'équivalence entre les températures cinétique et thermodynamique est simplement affirmée. »

Et l'échelle légale est ainsi définie :

Le kelvin est la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau.

III) Mesure absolue d'une température :

1) Thermomètre à gaz à volume constant :

a) Température absolue :

Un gaz réel se comporte comme un gaz parfait ($P.V = n.R.T$) à basse pression, aussi peut-on écrire pour un gaz

$$\text{réel : } T = \frac{1}{R} \lim_{P \rightarrow 0} P.V_{\text{molaire}}$$

Ceci peut servir de définition de la température (température du gaz parfait) : c'est équivalent à la température cinétique puisque celle-ci aboutit à la loi des gaz parfaits et inversement. On peut alors définir le kelvin en posant $T = 273,16 \text{ K}$ au point triple de l'eau, ceci donne à R sa valeur numérique.

On peut appliquer cette définition de la température T pour construire un thermomètre.

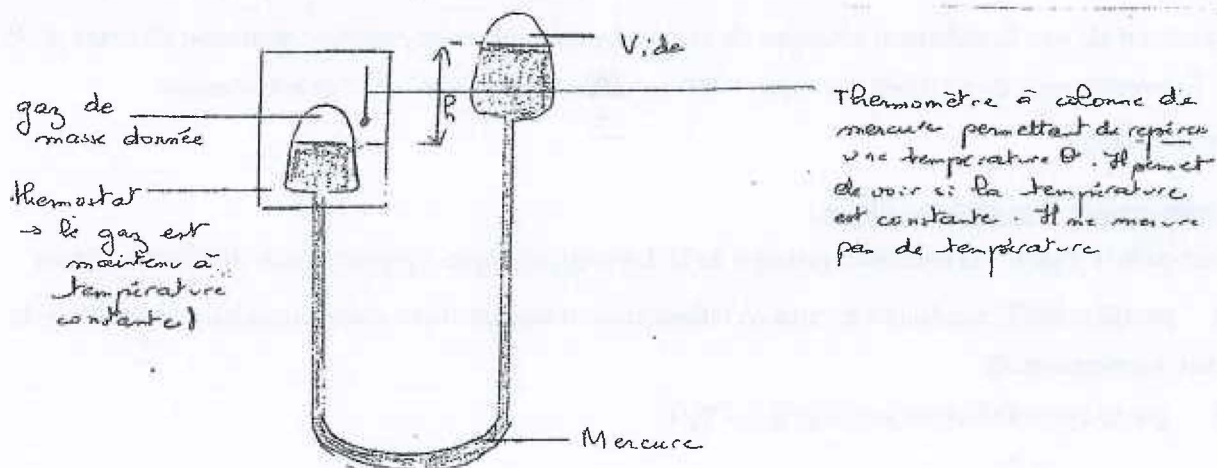
II) 1) *b) Schéma du dispositif (thermomètre à gaz à volume constant)*

Le réservoir contient du dihydrogène (ou de l'hélium aux très basses températures ou éventuellement du diazote à haute température). Sur le réservoir en platine, gradué, on lit le volume V du gaz. On peut assurer la constance du volume V en déplaçant verticalement le réservoir de droite.

La dénivellation h permet de connaître la pression P ($P = \rho_{Hg} \cdot g \cdot h$) du gaz.

h peut être mesurée à 10^{-6} m près.

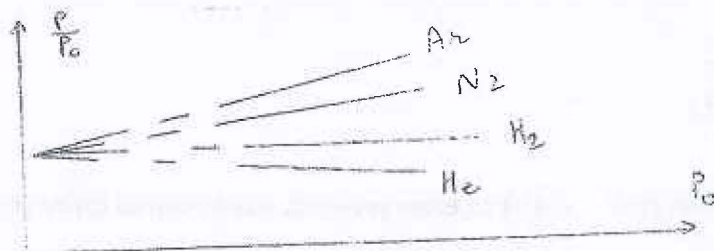
* Schéma de principe (d'après Faroux p 56)

c) *Protocole expérimental :*

On met le réservoir en équilibre thermique avec la glace fondante à $P = 1$ atm ($T_0 = 273,15$ K). On mesure la dénivellation du mercure qui correspond à la pression P_0 du gaz dans le réservoir.

Puis on met le réservoir en équilibre thermique avec un système de température T inconnue. La dénivellation du mercure donne la pression P du gaz dans le réservoir.

On recommence cette opération avec des quantités de matière de plus en plus petites dans le réservoir (donc P_0 diminue à chaque fois) et on trace P/P_0 en fonction de P_0 . On obtient :



On

extrapole, à pression nulle, cette courbe (de préférence pour le dihydrogène dont le comportement se rapproche le plus de celui du gaz parfait) et on obtient ainsi la température T cherchée par la relation :

$\frac{T}{T_0} = \lim_{(P_0 \rightarrow 0)} \frac{P}{P_0}$ car on travaille à volume constant, et pour un couple de mesures (P_0, P) la quantité de matière de gaz est constante.

Ce thermomètre à gaz est utilisé dans les **laboratoires de métrologie**.

III) 1) Cet instrument permet de déterminer les températures d'un certain nombre de points « fixes » (changements de phase de corps purs) entre 4 K et 1338 K (au-dessus de 1338 K, il y a en général ionisation des gaz et au-dessous de 4 K, il y a liquéfaction). Il faut plusieurs années pour arriver à déterminer un ensemble de points fixes, avec une incertitude de l'ordre du millikelvin.

2) Echelle internationale pratique de température (EIPT) ou « International Temperature Scale » (ITS)

L'EIPT est basée, d'une part, sur des valeurs de température d'un certain nombre d'états reproductibles : »les points fixes », d'autre part sur des instruments d'interpolation, qui permettent de déterminer des températures dans les intervalles séparant deux points fixes.

L'EIPT est remaniée périodiquement pour tenir compte des progrès de la métrologie. La plus récente date du 1^{er} janvier 1990. En voici un extrait :

Point triple du dihydrogène	-259,3467 °C
Point triple du néon	- 248,5939 °C
Point triple du dioxygène	-218,7916 °C
Point triple de l'argon	- 189,3442 °C
Point triple du mercure	- 38,8344 °C
Point triple de l'eau	0,01 °C
Congélation de l'étain à 1atm	231,928 °C
Congélation du zinc à 1 atm	419,527 °C
Congélation de l'aluminium à 1 atm	660,323 °C
Congélation de l'argent à 1 atm	961,78 °C
Congélation de l'or à 1 atm	1064,18 °C

3) Instruments légaux d'interpolation :

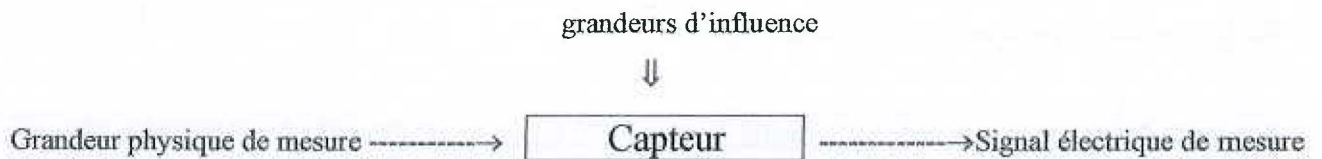
On les étalonne grâce aux points fixes de l'EIPT. Puis, ils permettent d'accéder à toute température entre les points fixes à l'aide de formules d'interpolation définies légalement. Exemples :

- * Entre 0,65 K et 5 K : thermomètre à pression de vapeur saturante d'hélium.
- * Entre 3 K et le point triple du néon : thermomètre à gaz à volume constant de l'hélium.
- * Entre le point triple du dihydrogène et le point de congélation de l'argent : thermomètre à résistance de platine.
- * Au-dessus du point de congélation de l'argent : pyromètre optique (avec la loi de rayonnement du corps noir).

Ces instruments d'interpolation permettent ensuite d'étalonner les thermomètres usuels d'emploi, beaucoup plus commodes mais évidemment moins précis.

IV) Généralités sur les capteurs de température :1) Schéma général d'un capteur :

cf Riout (généralités p 3)



Les grandeurs d'influence sont des grandeurs étrangères liées à l'environnement du capteur qui peuvent provoquer des perturbations et donc causer une erreur affectant le signal de sortie. Il peut s'agir de la température, la pression, des vibrations mécaniques, des chocs, de l'humidité, des perturbations électromagnétiques...

2) Qualités demandées à un capteur de température :

- ne pas modifier la grandeur à mesurer
- avoir un faible temps de réponse
- être fidèle, sensible, précis (*la sensibilité du capteur est le rapport entre la variation du signal de sortie et la variation de la grandeur mesurée*)
- être pratique d'emploi
- avoir une grande étendue de mesure, mais cela dépend de l'application
- on peut aussi souhaiter la linéarité, mais ce n'est pas indispensable

Ainsi, on choisit un capteur de température en fonction du domaine de température considéré, de la sensibilité du capteur (en V/K ou Ω /K ou...), de la plus petite variation de température que l'on souhaite détecter, de la précision souhaitée, de la valeur du temps de réponse, des dimensions, du poids, du prix du capteur, de son adaptabilité à l'environnement et des conditions de sécurité.

Il ne faut pas oublier que, derrière le capteur, il y a une chaîne de transmission et des organes de lecture ou d'enregistrement et que leurs qualités doivent être prises en compte en même temps que celles des capteurs. De plus, les principales qualités exigées seront différentes pour un thermomètre étalon ou un thermomètre d'usage courant.

3) Différents types de capteurs de température :

Ils sont optiques, mécaniques ou électriques.

Sauf pour les capteurs optiques, il faut un contact entre le corps dont on mesure la température et l'élément sensible à cette température et une mise en équilibre thermique entre le corps et l'élément sensible.

L'utilisation des radiations permet au contraire une mesure sans contact.

La finesse est la qualité exprimant l'aptitude d'un capteur à donner la valeur de la grandeur à mesurer sans modifier celle-ci par sa présence.

IV) 4) Perturbations apportées par le capteur à la température à mesurer lorsqu'il y a contact :

En ce qui concerne le capteur de température, de l'énergie est échangée entre le capteur et le milieu dont on mesure la température, mais aussi entre le capteur et l'environnement externe à température ambiante.

Il peut aussi y avoir une énergie dissipée dans le capteur lorsqu'il est parcouru par un courant de mesure (cas d'une thermistance ou d'une résistance de platine)

Ces transferts thermiques font que la température mesurée par le capteur n'est pas tout à fait égale à la température du milieu en l'absence de capteur.

Modèle simplifié : on ne tient compte que du transfert thermique entre le capteur et le milieu de température inconnue :

Soient C et C' les capacités thermiques respectives du capteur et du milieu.

Soient θ et θ' les températures respectives du capteur et du milieu.

La chaleur reçue par le capteur a été donnée par le milieu : $C.d\theta = -C'.d\theta'$

Dans le cas où le milieu est un fluide, le transfert thermique conducto-convectif est donné par la loi de Newton (cf cours sur les transferts thermiques de la première semaine de septembre) : $C.d\theta = K.(\theta' - \theta).dt$

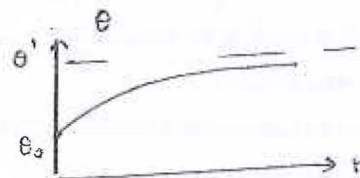
avec $K = h.S_{\text{contact}} = \text{constante}$

- Si $C' \gg C$, alors $d\theta' \ll d\theta$

On considère alors que la température θ' du milieu est constante. C'est effectivement le cas lorsque le capteur est très petit (thermistance, thermocouple). L'approximation est moins bonne pour la sonde de platine.

On résout alors l'équation : $C \cdot \frac{d\theta}{dt} + K \cdot \theta = K \cdot \theta'$ avec $\theta' = \text{constante}$

Si, $\theta_0 = 0$ en $t = 0$, la solution est : $\theta = \theta' + (\theta_0 - \theta') \cdot \exp\left(-\frac{K \cdot t}{C}\right)$



La constante de temps est $\tau = C/k$. τ est mesurable à partir du temps de réponse à 63 % (avec classiquement $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ et $\theta' = 100^\circ\text{C}$). Il faut préciser les conditions d'essai comme la nature du fluide dans lequel plonge le thermocouple (air ou eau) et la vitesse d'écoulement du fluide. Au bout de $(5 \cdot \tau)$ environ, dans ce modèle, la température du capteur est égale à celle que l'on voulait mesurer : θ'

- Si on ne néglige plus la variation de θ'

$C.d\theta = -C'.d\theta'$ donc $C \cdot \theta = -C' \cdot \theta' + \text{cste}$ d'où

$C \cdot (\theta - \theta_0) = -C' \cdot (\theta' - \theta'_0) \Leftrightarrow \theta' = -\frac{C}{C'} \cdot (\theta - \theta_0) + \theta'_0$ qu'on reporte dans $C.d\theta = K \cdot (\theta' - \theta).dt$

La résolution donne : $\theta = \frac{C'}{C+C'} \cdot \left(\frac{C \cdot \theta_0}{C'} + \theta'_0 - (\theta'_0 - \theta_0) \cdot \exp\left(-K \cdot \frac{C+C'}{C \cdot C'} \cdot t\right)\right)$

D'où lorsque $t \rightarrow \infty$ $\theta \rightarrow \frac{C \cdot \theta_0 + C' \cdot \theta'_0}{C+C'} \neq \theta'_0$ à mesurer

L'introduction du capteur a ainsi modifié la grandeur à mesurer.

IV) 4) En conclusion, il faut limiter les échanges (transferts thermiques conductifs ou conducto-convectifs) entre le capteur et le milieu de température inconnue. Pour cela, on a intérêt à avoir un capteur le plus petit possible (pour faire une mesure quasi-ponctuelle et en même temps essayer de diminuer C donc de diminuer le temps de réponse) avec des fils de raccordement petits et si l'on peut, effectuer une isolation thermique pour limiter les échanges entre le capteur et l'environnement.

V) Mesures optiques :

1) Principe :

Voir cours sur les transferts thermiques de la première semaine de septembre.

La matière chaude émet un rayonnement électromagnétique à spectre continu, dit « rayonnement thermique » et l'énergie ainsi rayonnée par un corps permet de calculer sa température.

L'émittance spectrale \mathcal{M}_λ est $\mathcal{M}_\lambda = \frac{d\phi}{d\lambda}$

où ϕ (en W/m^2) est la puissance surfacique rayonnée dans un hémisphère par unité de surface d'émetteur à longueur d'onde λ .

Selon l'équation de Planck : $\mathcal{M}_\lambda = \varepsilon \cdot \frac{C_1}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right)}$

avec : $C_1 = 2\pi \cdot h \cdot c^2 = 3,742 \cdot 10^{-16} W \cdot m^2$, $C_2 = h \cdot c / k_B = 1,4388 \cdot 10^{-2} m \cdot K$, ε est l'émissivité de la source

$\varepsilon = 1$ pour un « corps noir », corps idéal 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. C'est l'estimation du coefficient ε qui est la principale source d'erreur en pyrométrie optique.

Deux méthodes sont utilisées pour connaître la valeur de l'émissivité :

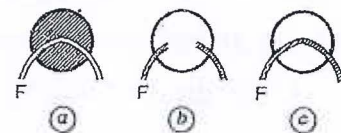
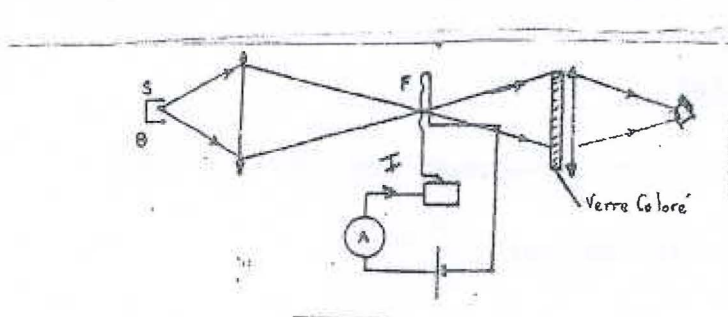
* se reporter aux tables publiées par les constructeurs.

* comparer les mesures effectuées avec le pyromètre optique et un autre moyen (thermocouple ou résistance) et rechercher quelle émissivité permet la concordance des deux mesures.

On a $\varepsilon \approx 0,85$ à $0,90$ pour la plupart des corps opaques non métalliques, $\varepsilon \approx 0,01$ à $0,5$ pour les corps métalliques non oxydés et non polis.

2) Pyromètre optique monochromatique à disparition de filament :

schéma d'après Perez p 339 ou Quaranta p 290 ou Techniques de l'ingénieur R2610



Le cercle représente l'image S' de la source S .

- (a) le filament F est plus lumineux que l'image S' de la source S
- (b) F et S' ont même luminance, disparition de F sur l'image S'
- (c) S' a une luminance supérieure à celle du filament

Fig. 3. - Images vues dans le pyromètre à disparition de filament.

V) 2). On cherche la température θ de la source. Le verre coloré (ou plutôt filtre interférentiel, rouge en général : $\lambda = 0,65 \mu\text{m}$) permet de travailler avec une lumière presque monochromatique.

La mesure peut être assez précise (à l'œil : $\Delta\theta \cong 2 \text{ K}$ pour $\theta \cong 1300 \text{ K}$ et avec un détecteur photoélectrique : $\Delta\theta \cong 0,5 \text{ K}$ pour $\theta \cong 10^4 \text{ K}$)

Les pyromètres optiques sont utilisés en métallurgie, verrerie, dans les industries chimiques. Ils permettent de faire des mesures sur des objets de haute température, éventuellement en mouvement, **sans contact**, à grande distance, parfois dans un environnement agressif. Il n'y a aucun échange de chaleur entre le capteur et l'objet dont la température est à mesurer.

Ils sont utilisés dans le domaine visible (**couleur rouge**) pour les températures élevées (au-dessus de $900 \text{ }^\circ\text{C}$ environ) et dans l'**infrarouge** ($0,8$ à $20 \mu\text{m}$) pour des températures moins élevées (-20 à $1500 \text{ }^\circ\text{C}$)

Il existe aussi des pyromètres bichromatiques (l'utilisation de 2 longueurs d'onde permet de mesurer $\ell_{\lambda_1}/\ell_{\lambda_2}$ et ainsi on s'affranchit de la connaissance de l'émissivité) ou des pyromètres à large bande, mesureurs d'énergie, utilisant l'ensemble du spectre du rayonnement thermique.

3) Caméra thermique :

a) Rôle de la caméra thermique

Une caméra thermique permet d'enregistrer un thermogramme : le détecteur mesure les puissances radiatives infrarouge émises par les différentes parties d'un objet et on peut ainsi en déduire la **répartition spatiale de température de l'objet**. En effet, la température T d'une zone de surface S est liée à la puissance qu'elle rayonne par la loi de Stefan (voir cours sur les transferts thermiques de la première semaine de septembre) :

$$\Phi = S \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad \text{où } \epsilon \text{ est l'émissivité de la zone (pouvant être mise en mémoire dans la caméra)}$$

Ainsi, on peut visualiser le contraste thermique entre un corps et son environnement, repérer des objets dans l'obscurité, inspecter une installation, détecter un foyer d'incendie...

Une caméra thermique sera utilisée dans le **montage n°35** « pertes dans les interrupteurs de l'électronique de puissance. Dimensionnement d'un dissipateur ».

b) Principe de la mesure de la puissance rayonnée :

Chaque pixel de la caméra thermique est un microbolomètre, qui sert de détecteur de rayonnement électromagnétique. Il comprend un détecteur métallique ou en semi-conducteur, dont la surface exposée au rayonnement est noircie. La résistance électrique de cet échantillon est liée à sa température, elle-même liée à la puissance radiative qu'il reçoit. Cette résistance peut être mesurée, par exemple, à l'aide d'un pont de Wheatstone. Par un bilan énergétique, on va déduire de la température de l'échantillon, la puissance radiative reçue (qui a été émise par l'objet étudié) : pour plus de détails voir, par exemple, le problème n°19 de « Capteurs » de Dassonvale.

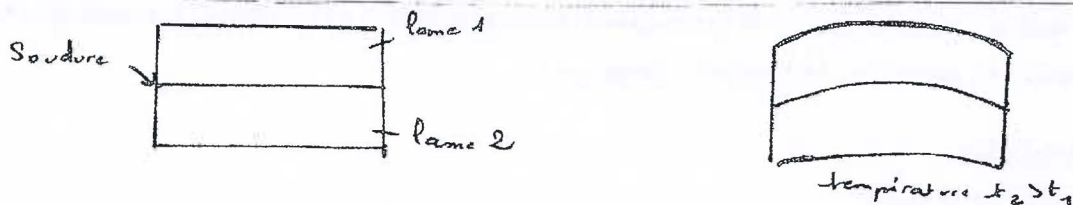
V) 3) c) Performances d'une caméra thermique

Une caméra thermique est caractérisée par sa résolution spatiale (quel est le plus petit objet visible ?) et sa résolution thermique (quelle est la plus petite différence de température perceptible ?). Pour la caméra Fluke Ti30, utilisée dans le montage n°33, le constructeur annonce une résolution thermique de 0,2 K et une incertitude sur la mesure de température de 2 à 3 K. La caméra est aussi caractérisée par le diamètre de sa pupille et les angles de vue balayés horizontalement et verticalement.

VI) Mesures mécaniques :

1) Dilatation d'un métal :

a) Bilame : il est constitué de deux lames métalliques soudées, ayant des coefficients de dilatation linéaire assez différents (ex $\alpha = 11,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pour Fe, $31 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pour Zn, 10^{-6} K^{-1} pour l'INVAR (fer avec 36 % de nickel).



A la température t_2 , une courbure apparaît (la concavité étant tournée vers le solide le moins dilatable : 2 sur le schéma)

L'élément métallique peut être enroulé en hélice, le métal possédant le plus grand coefficient de dilatation linéaire se trouvant à l'intérieur de l'hélice. Lorsqu'il y a une variation de température, l'extrémité libre de l'hélice pivote et entraîne la rotation de l'aiguille : voir schéma ci-dessous (Grout p239)

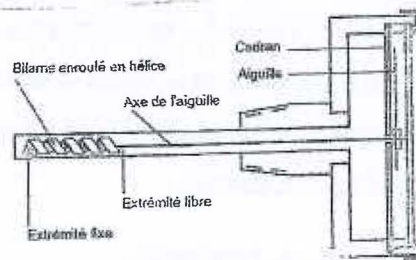
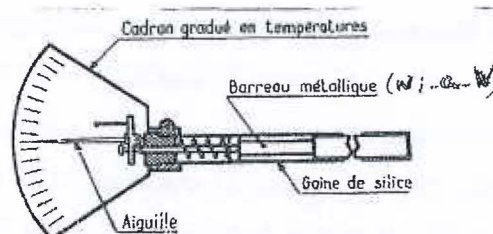
b) Pyromètre à dilatation :

schéma (d'après Bert p 55)

Ce pyromètre à dilatation utilise les variations de longueur d'un barreau métallique placé dans une gaine de silice (à très faible dilatation). Lors d'une élévation de température, le métal se dilate ce qui provoque le déplacement d'une aiguille par l'intermédiaire d'un levier. On peut suivre le déplacement de l'aiguille à l'aide d'une lunette de visée (pour une tige de fer de 0,500 m, l'allongement est d'environ 0,6 mm quand la température passe de 0 à 100 °C).

VI) 1) b) Le pyromètre à dilatation peut être employé de 200 à 1000 °C, on l'utilise dans les thermostats industriels.

Ces instruments à dilatation de métal ne servent pas de thermomètres, mais permettent de détecter une variation de température. On peut les incorporer à un thermostat ou un élément régulateur, par fonctionnement en « tout ou rien » dans un circuit électrique.

2) Dilatation d'un liquide :

Le liquide thermométrique (mercure le plus souvent) est enfermé dans un réservoir de verre monté sur une tige fine. On plonge le thermomètre dans la glace fondante et on trace un trait (zéro) sur la tige au niveau du mercure. On fait la même chose dans l'eau bouillante pour le trait cent. On divise l'intervalle entre les deux traits en 100 parties égales, on prolonge éventuellement au-dessous de 0 ou au-dessus de 100. On obtient ainsi une **échelle centésimale**. L'expérience indique qu'elle peut être assimilée à l'échelle Celsius avec une précision suffisante jusqu'à 200 °C.

L'avantage du mercure est qu'il a un ménisque très net, mais au-dessous de -39 °C , il se solidifie. On peut aussi utiliser de l'alcool coloré (solide à $-117,8\text{ °C}$) ou du toluène ou du pentane.

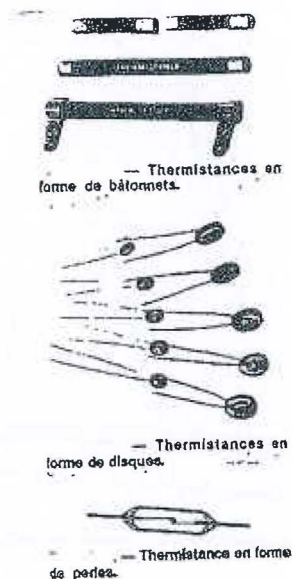
En fonction de la température à mesurer, on choisit le matériau constituant l'enveloppe du thermomètre, car elle doit se dilater le moins possible. Ainsi on utilise le verre d'Iena jusqu'à 450 °C, le verre Supremax jusqu'à 630 °C, la silice pure jusqu'à 1000°C.

Pour faire une mesure juste, il faut que la colonne de mercure soit complètement immergée dans le milieu de température inconnue, sinon on doit faire une « correction de colonne émergente »

VII) Mesures électriques :

1) Thermistance :

a) Présentation :

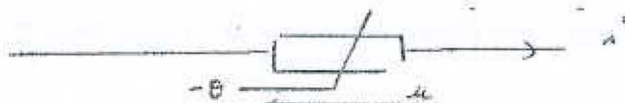


Leur résistance dépend de la température.

Cette résistance peut être mesurée par méthode *de pont* *de comparaison* *ampèremètre-voltmètre

VII) 1) b) Thermistances CTN :

La plupart des thermistances sont à coefficient de température négatif.



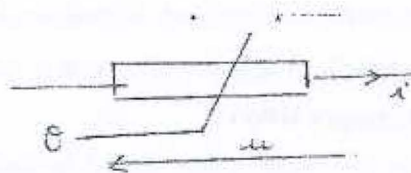
Elles sont constituées d'un mélange d'oxydes métalliques (NiO, Mn₂O₃, Fe₂O₃, MgCr₂O₄) réduits en poudre et agglomérés par frittage

La résistivité d'une thermistance CTN est de la forme $\rho = A \cdot \exp\left(\frac{B}{T}\right)$ A et B étant deux constantes

positives. Le coefficient de température est : $\alpha = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT} = - \frac{B}{T^2}$

$\alpha < 0$ et $|\alpha|$ diminue si T augmente. $\alpha \cong - 0,01 \text{ à } - 0,05 \text{ K}^{-1}$

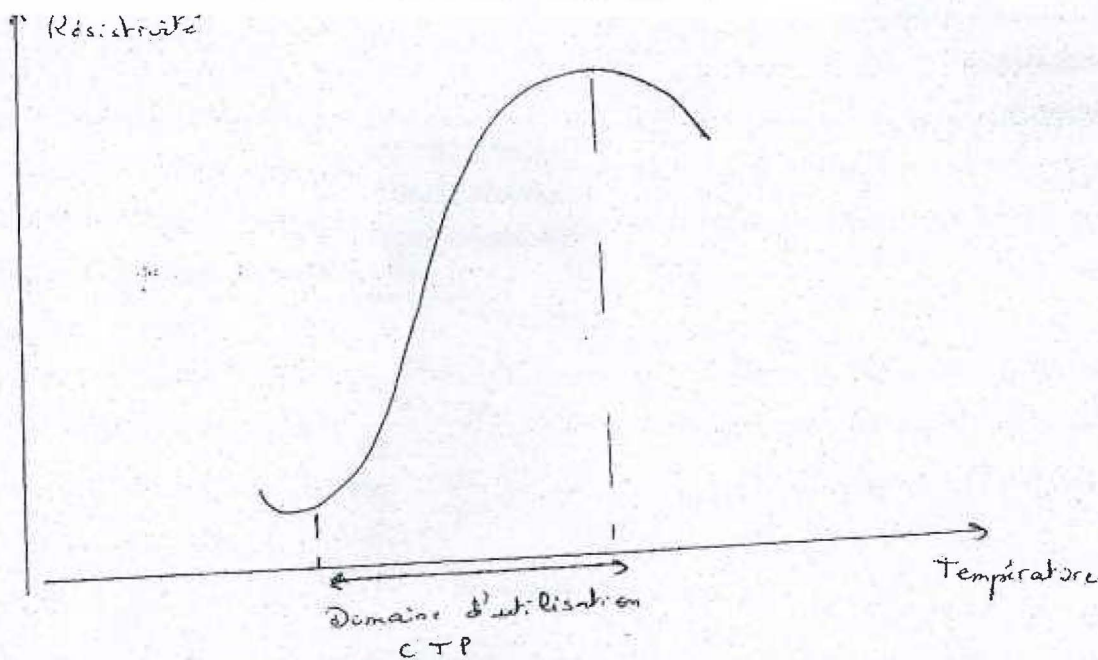
c) Thermistances CTP :



Il existe des thermistances à coefficient de température positif.

Elles sont constituées de silicium dopé ou de céramiques comme le titanate de baryum (BaTiO₃ qui est ferroélectrique).

Dans un certain domaine, la résistivité des thermistances CTP augmente avec la température :



α peut atteindre $0,6 \text{ K}^{-1}$

VII) 1) d) Performances :

le coefficient de température $\alpha = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT}$ est tel que $|\alpha| \cong 10^{-2} \text{ K}^{-1}$ ce qui est assez élevé : cela fait l'intérêt des

thermistances (pour un métal pur $\alpha \cong 4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ et pour un alliage c'est encore moins)

L'encombrement des thermistances est réduit, ce qui permet des mesures ponctuelles de température.

La capacité thermique des thermistances est assez faible (10^{-3} à 100 J/K) donc les thermistances, par leur introduction, modifient peu la température à mesurer.

La constante de temps est de l'ordre de 1s à 1 min (comparable à la résistance de platine, moins bien que le thermocouple).

Mais les thermistances sont sensibles à la corrosion, leur interchangeabilité est médiocre, et leurs caractéristiques dérivent au cours du temps.

Il faut les alimenter avec un courant de faible intensité pour éviter leur auto-échauffement.

Leur résistance est de l'ordre de 100Ω à $10 \text{ k}\Omega$, donc on peut négliger la résistance des fils de connexion devant celle de la thermistance.

Leur précision est plutôt médiocre (on atteint $\Delta T \cong 1 \text{ K}$)

Leur domaine d'utilisation s'étend de -100°C à 400°C .

Les thermistances sont utilisées assez couramment pour mesurer de faibles variations de température (car $|\alpha|$ grand) ou en régulation de température ou en protection contre les surintensités (cas des CTP), pour l'enclenchement des relais

VII) 2) Sonde à résistance de platine :

Il s'agit plus généralement d'étudier des résistances thermoélectriques ou R.T.D (Resistance Temperature Detector)

a) Principe :

La résistivité électrique d'un métal augmente avec la température (la conductivité diminue, car l'agitation thermique, par ses chocs, défavorise la conduction du courant, qui est un mouvement ordonné de charges).

La présence d'impuretés, de défauts ou de déformations accroît encore la résistivité. Pour cette raison, on utilise du platine quasiment pur, recuit et non contraint.

b) Constitution :

Un fil métallique (longueur de 10 cm en général, diamètre de 0,01 à 0,1 mm) le plus souvent en platine (pur à 99,999 %) est enroulé autour d'un support isolant électrique de céramique, mica, verre, alumine ou quartz et est entouré d'une gaine d'acier inoxydable.

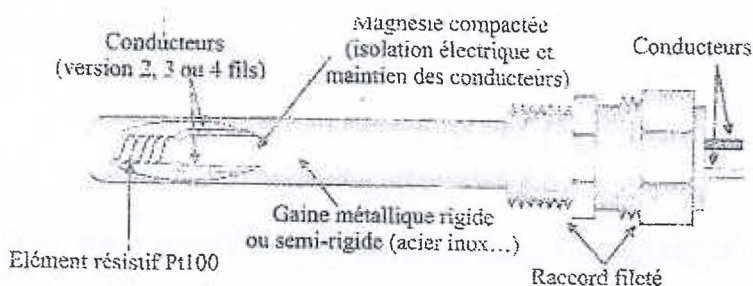


Figure 1.5 Sonde à résistance de platine chemisée à isolation minérale

Des s... ..

VII) 2) b) Il arrive qu'on utilise du nickel ce qui donne une sonde plus sensible mais moins fiable (à cause des impuretés).

Le cuivre a une résistivité qui est quasiment une fonction affine de la température, mais il s'oxyde très facilement.

Le platine a l'avantage d'être inoxydable, quasiment inaltérable. Il a un point de fusion élevé (1769°C) et peut être obtenu très pur.

c) loi $R(t)$:

La résistance d'un fil est de la forme $R = \frac{\rho \cdot l}{S}$.

La section S , la longueur l , la résistivité ρ dépendent de la température :

$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S}$, et c'est le terme $d\rho/\rho$ qui est le terme prépondérant

Le modèle utilisé pour la variation de résistance avec la température est le suivant :

$$R = R_0(1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot t^3 \cdot (t - 100))$$

avec $C = 0$ pour $t > 0$ °C

Pour la sonde « Pt 100 » (norme AFNOR) $R_0 = 100 \Omega$. On peut aussi avoir $R_0 = 1000 \Omega$, 500Ω , 50Ω

On définit le coefficient $\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0}$

$\alpha = 0,00385055 \text{ K}^{-1}$ pour la sonde Pt100 (norme AFNOR)

Pour l'étalonnage, on effectue des mesures de la résistance R à 4 points fixes de température ce qui permet de déterminer R_0 , A , B , C .

Ensuite la mesure de la résistance R , connaissant R_0 , A , B , C permet de connaître la température t .

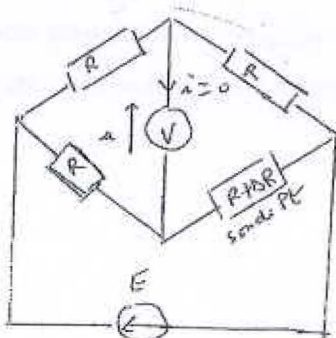
On obtient ainsi une incertitude $\Delta t = 0,1 \text{ K}$ industriellement et jusqu'à $\Delta t = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ K}$ en métrologie.

Remarque : Au 1^{er} ordre, $R = R_0(1 + A \cdot t)$ avec $A \cong \alpha \cong 4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

d) Méthodes de mesure de R :

La sonde peut être reliée à un ohmmètre ou faire partie d'un pont de Wheatstone. Au delà du pont, il peut y avoir un système d'affichage direct de la température.

Avec le pont de Wheatstone, on peut faire varier une résistance étalon pour rechercher l'équilibre ou mesurer la tension de déséquilibre aux bornes du détecteur. : voir schéma en page suivante :



On montre (par exemple avec le théorème de Thévenin) que $u \cong E \cdot \frac{\Delta R}{4 \cdot R}$

VII) 2) d) La qualité de l'appareillage fixe la tension u minimale décelable donc ΔR minimale décelable, donc la variation de température correspondante.

Exemple : au 1^{er} ordre $R = R_0(1 + A.t)$ d'où $\Delta R = R_0.A.\Delta t \Leftrightarrow \Delta t = \frac{\Delta R}{A.R_0} = \frac{4}{A} \cdot \frac{R}{R_0} \cdot \frac{u}{E}$

Or, $A \approx 4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Autour de 0°C , $R \approx R_0$. Soient $E = 2,0 \text{ V}$ et $u_{\text{mini}} = 1 \mu\text{V}$, on obtient alors $\Delta t = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}$. Mais pour atteindre une telle précision, il faut prendre certaines précautions.

e) Précautions à prendre lors des mesures :

- * **L'intensité du courant dans la sonde doit être réduite ($I < 10 \text{ mA}$)** pour limiter l'échauffement, donc la modification de la résistance. Les constructeurs indiquent souvent un coefficient d'auto-échauffement de la résistance : $\Delta T/P$ où ΔT est l'élévation de température, due au passage du courant, en régime établi et $P = R.I^2$
- * Pour mesurer la température d'un solide, il faut prévoir l'installation de la sonde dans un logement étroit ou l'éventuelle utilisation d'une graisse à haute conductivité thermique.
- * Il faut faire attention à la résistance des fils de câblage (facilement de l'ordre de $0,04 \Omega$ d'où $\Delta t = 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ pour une sonde Pt100) et bâtir un montage qui compense cette influence.

Pour s'affranchir de la résistance des fils de câblage, on utilise des sondes à 3 ou 4 fils.

Exemple : mesure à l'ohmmètre avec un montage 3 fils :



Les fils ayant même longueur $R_{\text{fil a}} = R_{\text{fil c}}$.

On mesure $R_{ab} = R_{\text{sonde}} + R_{\text{fil a}} + R_{\text{fil b}}$. Puis on mesure $R_{bc} = R_{\text{fil b}} + R_{\text{fil c}}$. On en déduit $R_{\text{sonde}} = R_{ab} - R_{bc}$

Exemple : pont de Wheatstone avec montage 3 fils : (schéma dans Techniques de l'ingénieur R2570)

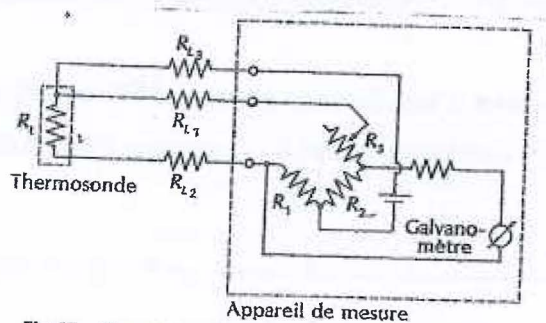


Fig. 17. - Montage avec câble trifilaire pour mesure au pont de Wheatstone.

A l'équilibre du pont, $R_t + R_{L2} = R_{L1} + R_3$ d'où $R_t = R_3$

f) Performances :

Les sondes de platine sont actuellement les capteurs de températures les plus stables.

On a vu que l'on obtient avec une résistance de platine une incertitude $\Delta t = 0,1 \text{ K}$ industriellement et jusqu' à $\Delta t = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ K}$ en métrologie.

VII) 2)_ Certains thermomètres à résistance de platine sont des instruments légaux d'interpolation, les autres sont largement utilisés dans les laboratoires de recherche ou dans l'industrie

La **constante de temps est de l'ordre d'une dizaine de secondes** (1s pour un fil nu dans l'eau, 50s pour le fil gainé dans l'air)

Leur **domaine d'utilisation courante s'étend de - 200 à 630 °C** (et même jusqu'à 1000 °C si l'enveloppe de protection le permet). A très basse température, il est nécessaire d'introduire des termes correctifs dans l'expression de $R(t)$

Remarque : pour mesurer une température en surface (d'un solide), on utilise des capteurs spéciaux (à grille de nickel par exemple)

3) Couple thermoélectrique :

D'après les normes, il faut dire « couple thermoélectrique », le mot « thermocouple » étant d'usage courant.

Le principe du thermocouple est basé sur l'existence d'une f.e.m lorsque deux soudures entre deux métaux différents sont à des températures différentes. Elle résulte de phénomènes thermoélectriques.

a) Effets thermoélectriques :

Les effets thermoélectriques consistent en deux phénomènes de transport simultanés : transfert thermique et transport de charges électriques.

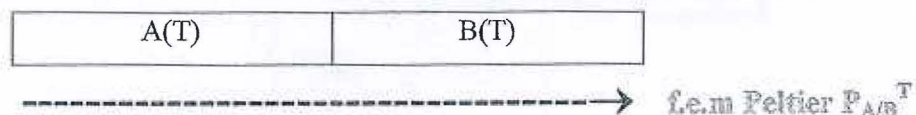
- **Effet Peltier :**

Il a été observé pour la première fois en 1834. On peut le définir de deux façons :

Première définition : **l'effet Peltier est la production ou l'absorption de chaleur au niveau de la jonction entre deux conducteurs différents** (métaux ou semi-conducteurs), **quand un courant les parcourt, la température étant maintenue constante.**

Un changement de sens du courant transforme la production de chaleur en absorption, ce qui distingue l'effet Peltier de l'effet Joule. Ainsi, le passage du courant dans une jonction peut entraîner l'absorption de chaleur puis un refroidissement. Ce phénomène est utilisé dans certains réfrigérateurs ou le refroidissement de circuits électriques.

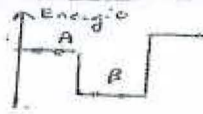
Deuxième définition : **l'effet Peltier est l'apparition d'une f.e.m au niveau de la jonction entre deux conducteurs différents à la même température** (indépendamment de l'existence d'un courant)



Exemple à 0°C : $P_{Bi/Cu} = 21 \text{ mV}$; $P_{Zn/Cu} = - 0,03 \text{ mV}$

En fait, cette f.e.m Peltier n'est pas mesurable directement, car pour la mesurer, il faudrait raccorder A et B à un voltmètre par des fils, ce qui créerait de nouvelles jonctions Peltier.

VII) 3) a) Explication microscopique : les métaux A et B ont des bandes d'énergie différentes

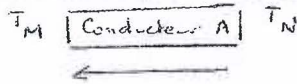


Sous l'effet de l'agitation thermique, les électrons libres migrent de A vers B, A se charge positivement et B négativement d'où l'apparition d'un champ électrique et d'une f.e.m Peltier

• **Effet Thomson**

Il a été observé pour la première fois par Thomson (lord Kelvin) en 1857.

L'effet Thomson est la production ou l'absorption de chaleur provoquée par le passage du courant dans une portion de conducteur en présence d'un gradient de température et l'existence d'une f.e.m entre deux points d'un même conducteur, en présence d'un gradient de température.



f.e.m Thomson $E_A^{TM} = \int h_A dT$ h_A étant fonction de T

Autour de 20°C, pour Cu : $h = 2,2 \mu V/K$, pour Fe $h = -8,4 \mu V/K$

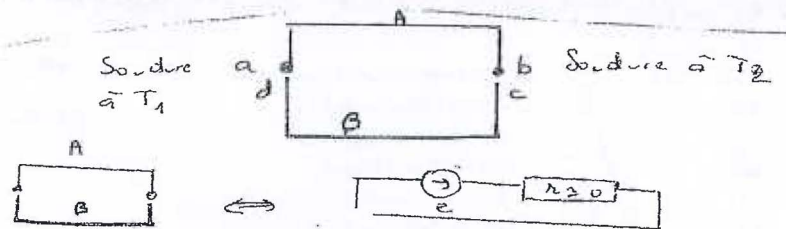
Explication microscopique : une variation de température entraîne une modification de la fonction de Fermi (probabilité de trouver un électron à un certain niveau d'énergie), ce qui entraîne une diffusion d'électrons

• **Effet Seebeck**

Il a été observé pour la première fois en 1821 par Seebeck.

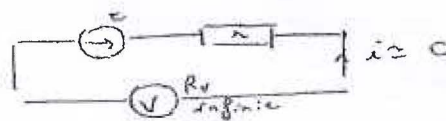
L'effet Seebeck résulte des effets Peltier et Thomson simultanés.

L'effet Seebeck est l'existence d'une f.e.m lorsque deux soudures entre deux métaux (ou alliages) différents sont à des températures différentes. L'ensemble des deux soudures constitue un thermocouple.



Pour mesurer cette f.e.m, il faut interrompre l'un des fils pour installer un voltmètre :

Pour mesurer e qui est très faible ($de/dT \cong$ quelques $\mu V/K$), on utilise un voltmètre de très grande résistance et éventuellement un amplificateur, avec des techniques poussées de réjection du bruit.



Dans un thermocouple, il y a à la fois effet Peltier (pour chacun des conducteurs métalliques ab et cd) et effet Thomson (pour les jonctions bc et da) d'où : $e = e_{ab} + e_{bc} + e_{cd} + e_{da}$

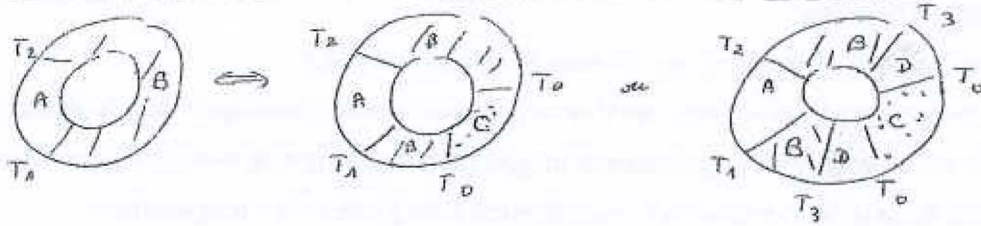
$$e = \int_{T1}^{T2} h_A dT + P_{A/B}^{T2} + \int_{T2}^{T1} h_B dT + P_{B/A}^{T1} = \int_{T1}^{T2} (h_A - h_B) dT + P_{A/B}^{T2} - P_{A/B}^{T1}$$

VII) 3) b) Loi des températures successives :

L'expression de e vue à la fin du paragraphe précédent permet de démontrer que $e(T_2, T_1) = -e(T_1, T_2)$ et que $e(T_2, T_1) = e(T_2, T_0) + e(T_0, T_1)$

VII) 3) c) Loi des métaux intermédiaires :

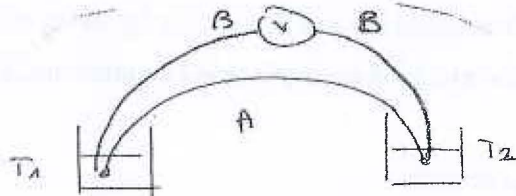
La f.e.m d'un thermocouple n'est pas modifiée si l'on intercale dans le circuit un ou plusieurs conducteurs intermédiaires pourvu que les nouvelles jonctions ainsi constituées soient maintenues à la même température.



La f.e.m développée entre M et M' est en effet $P_{B/C}^{T_0} + \int_{T_0}^{T_0} hc.dT + P_{C/B}^{T_0}$

Voyons maintenant comment déduire une température inconnue de la f.e.mmesurée.

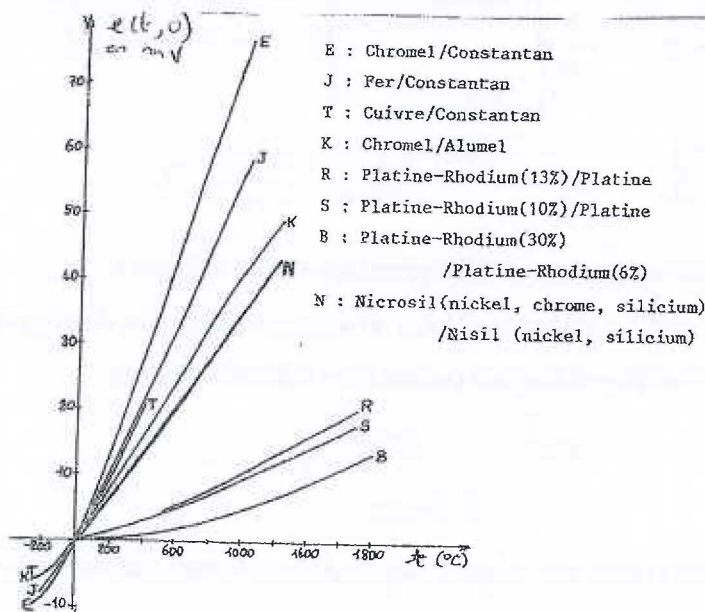
d) Mesure d'une température inconnue avec un thermocouple :



On étalonne d'abord l'instrument en maintenant la température T_1 constante (température de référence :

exemple 0°C avec un mélange eau+glace à $P = 1 \text{ atm}$) et en faisant varier T_2 . On mesure $e(T_1, T_2) = e(t, 0^\circ\text{C})$

On trace $e(t, 0)$ en fonction de t . on obtient une courbe telle que : (Ash page 272)



On constate que $e(t, 0)$ est quasiment représentée par une droite pour les thermocouples E, J, N, K : on a ainsi un détecteur presque linéaire dans un assez grand domaine de température

VII) 3) d) Voyons maintenant comment mesurer la température t_2 inconnue, si on ne dispose pas d'une source à 0°C , c'est à dire si la température t_1 est différente de 0°C .

Il faut pouvoir mesurer précisément t_1 (par exemple, avec un thermomètre précis, gradué de 0 à 100°C . Si $t_2 > 100^\circ\text{C}$, ce thermomètre ne peut être utilisé pour mesurer t_1 , c'est pourquoi on a recours au thermocouple)

On lit alors sur la courbe d'étalonnage du thermocouple $e(t_1, 0)$. Puis on mesure $e(t_2, t_1)$ au thermocouple.

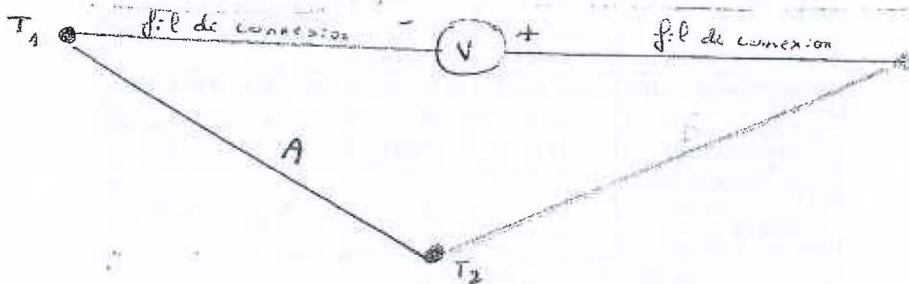
On calcule, grâce à la loi des températures successives $e(t_2, 0) = e(t_2, t_1) + e(t_1, 0)$. Cette addition s'appelle la correction de soudure froide.

Puis de $e(t_2, 0)$, avec la courbe d'étalonnage, on déduit t_2 .

En principe, un thermocouple possède deux soudures. Mais lorsqu'on observe un thermocouple industriel, on ne voit en général qu'une soudure (et encore... elle est cachée par la gaine du thermocouple) et pratiquement, il en a souvent trois.

e) Autres montages pratiques :

- Montage à trois soudures :



Le voltmètre mesure :

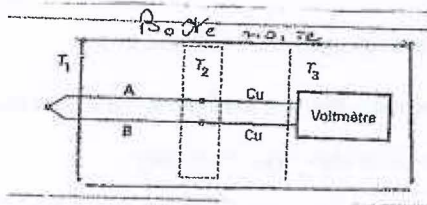
$$e = P_{\text{connexion}/A}^{T1} + \int_{T1}^{T2} h_A \cdot dT + P_{A/B}^{T2} + \int_{T2}^{T1} h_B \cdot dT + P_{B/\text{connexion}}^{T1}$$

$$e = P_{\text{connexion}/A}^{T1} + P_{B/\text{connexion}}^{T1} + P_{A/B}^{T2} + \int_{T1}^{T2} (h_A - h_B) \cdot dT \quad \text{d'où en utilisant la loi des métaux intermédiaires :}$$

$$e = P_{B/A}^{T1} + P_{A/B}^{T2} + \int_{T1}^{T2} (h_A - h_B) \cdot dT = P_{A/B}^{T2} - P_{A/B}^{T1} + \int_{T1}^{T2} (h_A - h_B) \cdot dT$$

donc les caractéristiques thermoélectriques des fils de connexion n'interviennent pas.

Montage à 1 soudure apparente : (Techniques de l'ingénieur R2590)



le voltmètre et un « boîtier de soudures froides » (A, fil de connexion) et (B, fil de connexion).

Il existe des appareils de ce type affichant directement la température inconnue. Ils contiennent un circuit

générant une « tension de compensation » due au fait que les soudures froides ne sont pas à 0°C (la température ambiante des soudures froides étant mesurée avec un sonde à résistance ou une thermistance ou une diode)

On peut avoir compensation logicielle ou matérielle.

VII) 3) f) Thermocouples usuels :



Symbole d'un thermocouple :

Dans la désignation d'un thermocouple, le premier conducteur cité correspond à la borne + du thermocouple lorsqu'il est utilisé au-dessus de 0 °C, la température de référence étant 0 °C

Ash page 278

- (1) Norme NF C-42-321
 (2) Norme NF E 18-001
 (3) Norme ANSI C 96-6

Thermocouples	Plage de température	E mV(1)	Précision (2)
Cuivre/Constantan Type T (diamètre 1,63 mm)	- 270 °C 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 °C à 800 °C	- 8,096 à 45,498	±3°C de 0°C à 400°C ±0,75% de 400 à 800°C
Chromel/Alumel Type K (diamètre 3,25 mm)	- 270 °C 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 °C 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 °C 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 °C 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 (3)
Platine-Rhodium(30%)/ Platine-Rhodium(6%) Type B (diamètre 0,51 mm)	0 °C à 1700 °C	0 à 12,426	±0,5% de 870°C à 1700°C (3)
Tungstène-Rhénium(5%)/ Tungstène-Rhénium(26%)	0 °C à 2760 °C	0 à 38,45	

Courbes d'étalonnage voir page 15 de ce photocopié.

$\frac{de}{dt}$ s'appelle le pouvoir thermoélectrique ou la sensibilité du thermocouple.

Pour Pt rhodié/Pt (types R ou S) : environ 6 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ à 0 °C et 12 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ à 1400 °C

Pour fer/constantan (type J) : 52,9 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ à 0 °C et 63,8 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ à 700°C

Les courbes d'étalonnage ne sont pas toujours fournies, il existe aussi des tables de valeurs, mais elles ne sont pas très commodes à utiliser, aussi on emploie souvent une expression mathématique de $e(t)$:

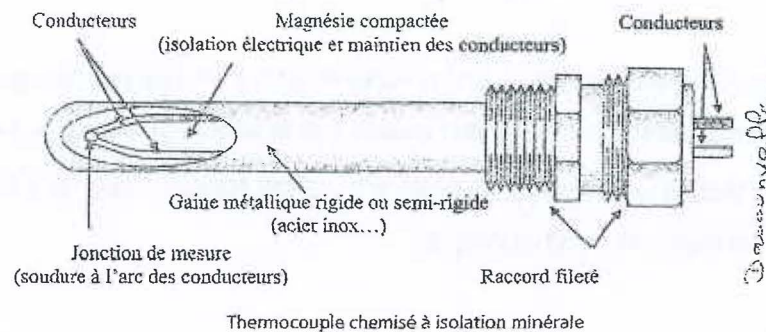
Pour chaque thermocouple, une norme définit une expression polynomiale : $e(t) = \sum_{i=0}^{8ou9} a_i t^i$ avec t en °C

Il y a éventuellement des polynômes différents suivant les domaines de température.

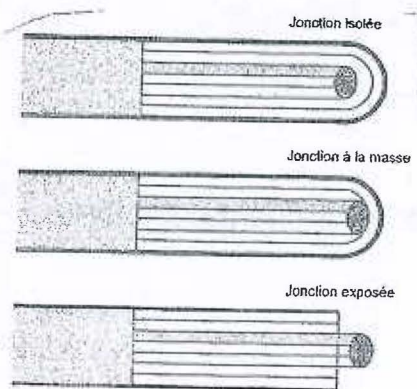
Afin d'éviter tout contact en dehors des jonctions de mesure, les fils sont placés à l'intérieur d'isolateurs (souvent en céramique ou plastique). De plus, il y a une protection par une gaine.

Un thermocouple chemisé est noyé dans un isolant électrique (souvent MgO) à l'intérieur d'une gaine étanche en acier allié ou en métaux spéciaux (pour des usages à très haute température) ou en céramique réfractaire (pour des usages à très haute température, en atmosphère oxydante) : voir schéma en page suivante

VII) 3) f)



La jonction à la masse a l'avantage de réduire le temps de réponse. La jonction isolée est mieux protégée électriquement. La jonction exposée ne s'utilise que si l'on souhaite un très faible temps de réponse, s'il n'y a aucun risque de corrosion et si la température est inférieure à 300 °C. Schémas de Grout page 246 :



g) Précautions à prendre :

Les soudures doivent être réalisées très soigneusement. Lors de la fabrication du thermocouple, il faut éviter les inhomogénéités qui pourraient provoquer l'apparition de f.e.m parasites.

Lorsqu'ils sont utilisés à très haute température (autour de 1000 °C), les thermocouples subissent des traitements thermiques qui causent des hétérogénéités (oxydations, contraintes mécaniques...)

h) Performances :

Les thermocouples sont les **instruments de températures les plus utilisés**, en particulier le **thermocouple K (chromel/alumel)**

Ils sont assez robustes, ils peuvent subir sans dégât des vibrations importantes (ce qui n'est pas le cas des sondes de platine), **mais sont moins stables à long terme que les résistances de platine.**

Ils ne subissent pas d'auto-échauffement (intensité du courant nulle lors de la mesure au voltmètre).

Ils sont moins coûteux que les sondes de platine et permettent des mesures ponctuelles..

L'incertitude sur la mesure de f.e.m peut atteindre 0,5 mV à cause des inhomogénéités et 0,07 mV à cause de l'incertitude sur la température de la jonction de référence, soit assez souvent $\Delta t \cong 1^\circ\text{C}$

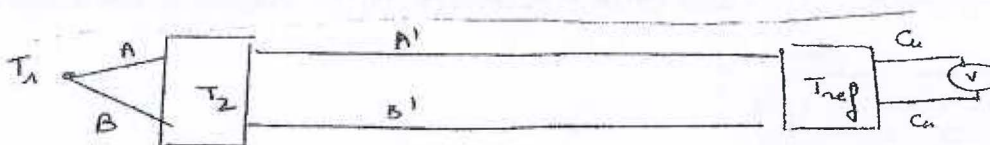
Les thermocouples sont donc moins précis que les résistances de platine. Le thermocouple platine rhodié/platine a été un instrument légal d'interpolation jusqu'à 1990. Puis il a été remplacé par la résistance de platine

Le temps de réponse d'un thermocouple est de l'ordre de 0,05 à 10 s suivant le type de jonction (exposée, à la masse ou isolée) Cet instrument est donc **plus rapide que la thermistance ou la sonde de platine.**

On peut utiliser des thermocouples (étalonnés) de 4 K à 3000 K (soit -269 °C à 2720 °C). Cette plage très étendue est un intérêt majeur des thermocouples.

VII) 3).i) Câbles d'extension :

On les utilise lorsque le voltmètre ne peut être approché de la soudure chaude. Il serait très onéreux de prolonger les conducteurs du thermocouple, aussi on les remplace par des câbles moins coûteux.



On montre que les câbles d'extension (dits aussi câbles de compensation) A', B' ne modifient pas la f.e.m du thermocouple à condition que :

- * Les jonctions AA' et BB' soient à la même température T_2
- * Les couples A'/B' et A/B aient même f.e.m Seebeck entre T_2 et T_{ref} .

Ainsi pour Pt rhodié/Pt, les fils d'extension sont en cuivre ou en cupronickel.

Remarque : on peut faire une étude plus approfondie du thermocouple avec les relations d'Onsager qui expriment les densités de courant électrique \vec{j}_{elec} et thermique \vec{j}_{th} en fonction de \overrightarrow{gradV} et \overrightarrow{gradT} (voir problèmes de physique de l'agrégation P.A en 2002 et 2008)

VII) 4) Comparaison de la thermistance, de la sonde de platine, du thermocouple :

Ces trois capteurs sont les capteurs de température les plus utilisés dans l'industrie ou les laboratoires

	Temps de réponse	Sensibilité relative	Précision	Domaine d'utilisation
Thermistance CTN	1 s à 1 min	$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT} = 10^{-2} \text{ K}^{-1}$	$\Delta t \cong 1 \text{ }^\circ\text{C}$	- 100 à + 400 °C
Sonde à résistance de platine	5 à 50 s	$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$	Δt (au mieux) = $0,3 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$ couramment : $\Delta t \cong 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$	- 200 à + 1000 °C
Thermocouple	0,5 s à 1 min	$\frac{1}{e} \cdot \frac{de}{dT} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$	Δt (au mieux) = $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$ couramment : $\Delta t \cong 1 \text{ }^\circ\text{C}$	- 270 °C à + 2720 °C

5) Thermomètre à quartz :

Un cristal de quartz (SiO_2) a la forme d'un prisme, aux extrémités pyramidales et de section droite hexagonale. Les propriétés physiques du quartz sont anisotropes. Dans le cristal sont taillées des lames carrées, rectangulaires ou circulaires ; leurs propriétés dépendent de leur géométrie, leurs dimensions, leur orientation cristallographique.

Schéma (Ash p 301) :

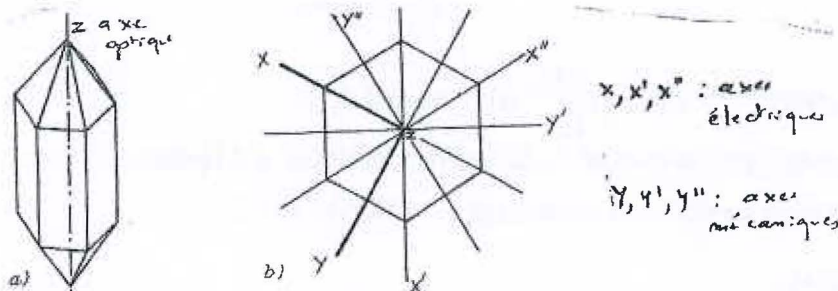
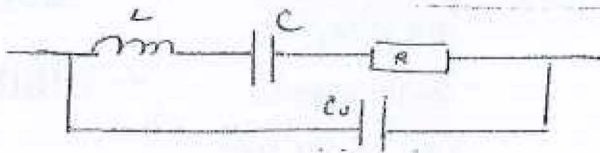


Fig. 6.34. Cristal de quartz : a) forme générale ; b) section droite perpendiculaire à l'axe optique.

Le quartz est **piézoélectrique**. Dans le cas d'une lame dont les faces sont perpendiculaires à un axe électrique, on observe :

- l'apparition de charges de signe contraire sur chacune des faces lorsqu'on exerce sur elles une force perpendiculaire : c'est l'effet piézoélectrique direct ;
- une variation d'épaisseur de la lame, dilatation ou contraction suivant le signe de la d.d.p appliquée entre les faces. C'est l'effet piézoélectrique inverse.

Une lame peut être le siège de divers modes de vibrations mécaniques (avec résonance électromécanique par effet piézoélectrique). Un quartz est un oscillateur de très grande stabilité, en particulier thermique. Autour de l'une de ses fréquences de résonance mécanique, la lame de quartz équivaut au circuit électrique suivant :



$L =$ quelques H à 10^4 H

$C =$ quelques 10^{-2} à 10^{-1} pF

$R =$ quelques k Ω

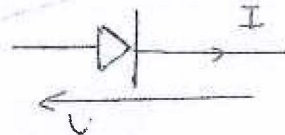
Les valeurs de R, L, C dépendent de la température (et de la coupe de la lame)

On peut donner une lame de quartz une orientation cristallographique particulière pour que la fréquence de l'oscillateur soit quasiment une fonction linéaire de la température. On obtient ainsi un capteur de température sensible et précis.

Un thermomètre à quartz comprend une lame de quartz, un boîtier d'acier, un quartz de référence et un ensemble de composants électroniques, permettant de déterminer la fréquence d'oscillation et d'en déduire la température. Il y a peu de bruit lors du transfert d'information par le support d'une fréquence. La conversion du signal sous forme numérique est aisée.

On pourra utiliser le quartz dans des circuits de régulation de température (de -100 à 250 °C).

6) Thermomètre à diode (ou transistor monté en diode en reliant base et collecteur) :



En polarisation directe, $I \approx I_0 \cdot \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$ où I_0 dépend de T.

V est la grandeur de sortie du capteur. V dépend de T de façon non linéaire.

Ce détecteur est assez sensible. On l'utilise entre -50 °C et 150 °C.

7) Capteur intégré :

Ils comprennent une paire de transistors et leur signal de sortie (tension ou intensité) est fonction affine de la température. Exemples : capteur LM135 ou LM 335