

LA TEMPÉRATURE

PRESQUE PARTOUT

La température est presque partout ! *Puuff... qu'est-ce qu'il fait chaud ! Brrr... On grelotte ici ! Tu serais pas malade ? Prends ta température. Au-dessus des normales de saison... Mets ton chapeau, il fait pas chaud. Pousse le chauffage, il va geler demain.*

Dans la voiture : température du liquide de refroidissement, d'huile, des freins, de la culasse, etc.

Les avions ne sont pas en reste : température extérieure, de la cabine, des étages réacteur, du carburant, des soutes, des équipements, des freins, etc.

Dans de nombreux actes quotidiens, la notion de température est là. On n'y prête même plus attention tellement c'est devenu un phénomène courant, banal et « transparent ».

ÉVALUER UNE TEMPÉRATURE

La température n'est pas une *grandeur* au sens strict du terme, comme le sont la plupart des autres unités de mesure.

En effet, une grandeur est tout ce qui est susceptible d'augmentation ou de diminution comme, par exemple, une longueur, une surface, une puissance, etc. Mesurer une grandeur G (quelle que soit son espèce), c'est la comparer à une autre grandeur U, de même espèce, choisie pour unité. Le résultat de la mesure est un nombre entier (par exemple 5) si l'unité U est contenue un nombre entier de fois dans la grandeur G considérée (5 fois ici). Une grandeur est directement mesurable quand nous pouvons définir le rapport ou l'égalité ou la somme de deux valeurs de cette grandeur. Une longueur, une surface sont des grandeurs mesurables. En revanche, une température repérée au moyen de l'échelle thermométrique Celsius n'est pas une grandeur mesurable ; nous pouvons définir l'égalité de deux températures mais nous ne pouvons pas en faire la somme.

On devrait donc dire : évaluer, comparer, marquer, indiquer les températures et non pas *les mesurer* au sens propre du terme.

La température, au sens ordinaire du mot, se présente à nous comme une valeur susceptible d'augmentation ou de diminution, caractérisant l'état d'un corps au point de vue des échanges possibles de chaleur entre ce corps et les corps extérieurs. Nos sens nous donnent la notion de corps chauds et de corps froids. Quand un corps froid est mis en présence d'un corps chaud, le premier s'échauffe, le second se refroidit : il y a transmission de chaleur du second au premier.

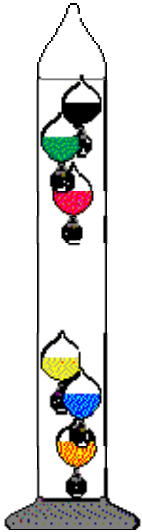
Cette transmission ne cesse - *si les deux corps sont seuls en présence* - que quand ils sont arrivés, au point de vue calorifique, au même état : on dit qu'ils sont alors à la même température. Un corps plus chaud est dit à température supérieure. On a ainsi défini l'égalité et l'inégalité de température.

Mais pour apprécier cette égalité ou cette inégalité avec quelque précision, nos sens sont insuffisants, et l'on a recours à des instruments spéciaux : les thermomètres.



Le premier thermomètre

Galilée fut, semble-t-il, le premier inventeur d'un système d'évaluation de la température. Imaginé pour la première fois vers 1593, le *thermomètre* de Galilée est un objet simple basé uniquement sur la modification de volume d'un liquide en fonction de la température (*dilatation*). Le premier *thermomètre de Galilée* était sans doute très proche de celui à spirale en verre représenté sur la photo ci-contre. Ce thermomètre contient de l'alcool et le long tube de verre est gradué afin de pouvoir comparer des températures. En fonction de la température, l'alcool se contracte - *le niveau baisse* - ou se dilate - *le niveau augmente*. Il fut utilisé lors d'expériences de l'Accademia del cimento (Académie de l'expérience), fondée en 1650 par Viviani, disciple et biographe de Galilée. Les thermomètres à alcool actuels (niveau de couleur bleu ou rouge) fonctionnent exactement selon ce même principe. La seule différence est que l'on sait actuellement fabriquer des tubes très fins ce qui n'était pas le cas du temps de l'Accademia del cimento.



Un autre type de *thermomètre de Galilée* existe toujours, mais plutôt comme objet de décoration. Ce thermomètre repose sur le principe d'Archimède du à la variation de densité des liquides en fonction de leur température. Sensible à l'évolution de la température d'une pièce, le liquide contenu dans le cylindre se dilate ou se contracte. Chaque boule a été pesée très précisément afin que sa masse soit en équilibre avec la densité du liquide lorsque la température indiquée sur son médaillon est atteinte. Lorsque c'est le cas, la boule est immobile, en suspension. Lorsque la température ambiante diminue, le liquide devient plus dense et les boules, plus légères, commencent à migrer une par une vers le haut. Lorsque la température augmente, le phénomène inverse se produit.

La différence entre les boules tient à leurs masse : entre la boule indiquant 20 °C et celle montrant 21 °C il y a une différence d'environ 1 milligramme. La température ambiante est indiquée par la sphère la plus proche du fond sans toutefois le toucher. Dès que les boules atteignent le fond, la température sera indiquée par la boule immédiatement au dessus. Toutes les ampoules internes au tube ont le même volume mais ont toutes des masses différentes de telle sorte que le poids de l'ampoule de masse m_i est juste compensé par la poussée d'Archimède exercée par le fluide à la température T_i . En principe, ce genre de thermomètre est limité dans une plage de 16 à 30 °C.

Masse volumique et densité

La Densité est le rapport exprimé en nombre décimal de la masse volumique de ce corps à celle d'un corps pris pour référence : en général, l'eau pour les solides et les liquides et l'air pour les gaz. C'est un nombre abstrait anciennement nommé *densité relative*. À ne pas confondre avec la *Masse Volumique* qui, elle, s'exprime en kg/m^3

LES UNITÉS DE TEMPÉRATURE

Il existe actuellement, dans le Système International, deux unités de température :

- Le **kelvin**, symbole **K** : Degré de l'échelle thermodynamique des températures absolues dans laquelle la température du **point triple** de l'eau est 273,16 K
- Le **degré Celsius**, symbole **°C** : La température Celsius t correspondant à la température thermodynamique T est définie par l'équation $t = T - T_0$ dans laquelle $T_0 = 273,15$ K.
Un intervalle ou une différence de température peut aussi s'exprimer en degré Celsius.

Dans les siècles passés, plusieurs échelles de mesure des températures furent définies, basées sur deux points fixes ou plus.

Le degré Fahrenheit

La première échelle à être *universellement* reconnue, fut celle de **Gabriel Fahrenheit**, un Hollandais, qui, au début du XVIII^e siècle, fabriqua des thermomètres au mercure qui permettaient de mesurer les températures de manière fiable et répétitive. Son échelle reposait sur deux points :

- Le point bas représentait la température la plus basse que Fahrenheit pouvait reproduire et qu'il nomma "zéro degré". Elle était donnée par un mélange de glace et de sel. Cette température correspond à environ - 17,8 °C.
- Le point haut représentait la température du sang humain qu'il nomma "96 degrés". Cette température correspond à environ 35,5 °C.

Pourquoi 96 et pas 100 degrés ? Sans doute parce que beaucoup d'unités anglaises étaient sur une base dodécadécimale et que le système métrique en était à ses premiers balbutiements. Quoi qu'il en soit, dans la glace fondante, un thermomètre Fahrenheit indique 32 °F et 212 °F à l'ébullition de l'eau.

Le degré Celsius

Le physicien suédois **Anders Celsius** (1701-1744) fit construire en 1741 un thermomètre à mercure, qui marquait 0 degré au point d'ébullition et 100 au point de congélation de l'eau et qui fut utilisé de 1742 à 1750 à l'observatoire scandinave d'Uppsala (Upsal en français). En 1745, Linné présenta à l'Académie suédoise des sciences un thermomètre à mercure à échelle centésimale ascendante ayant le zéro au point de congélation de l'eau. À la même époque, le secrétaire perpétuel de l'Académie des beaux-arts de Lyon, Jean-Pierre Christin (1683-1755), faisait construire par l'artisan lyonnais Pierre Casati un thermomètre à mercure à échelle centésimale ascendante, qu'il présenta le 19 mars 1743 à l'assemblée publique de cette académie.

Le thermomètre suédois et le thermomètre de Lyon n'auraient eu qu'une utilisation restreinte si la Révolution Française n'avait donné au monde moderne le système métrique, et si la Commission des poids et mesures,

créée par la Convention, n'avait décidé en 1794 que « le degré thermométrique sera la centième partie de la distance entre le terme de la glace et celui de l'eau bouillante ». En octobre 1948, à la suite d'une décision de la IXe Conférence des poids et mesures, le degré centésimal a pris le nom de degré Celsius.

Le kelvin

William Thomson, connu sous le nom de lord **Kelvin** contribua, de manière durable à la thermodynamique. Après la dissertation de S. Carnot sur la chaleur et les travaux expérimentaux de J. Joule, la première loi de la thermodynamique put être explicitée, et, en 1850, R. Clausius fut conduit à poser pour principe que la chaleur ne peut d'elle-même passer d'un corps froid à un corps chaud. Thomson montra qu'en se fondant sur le système de Carnot il était possible de définir une échelle opératoire de température, indépendante des propriétés du système mis en œuvre. Ainsi fut construite l'échelle thermométrique « absolue » ou graduation Kelvin.

Il faut noter que le kelvin doit être utilisé ni avec le mot degré, ni avec le symbole ° ; on dit "un kelvin" et non pas un degré kelvin.

Le degré Rankine

L'échelle Rankine (°R) n'est que la transposition en degré Fahrenheit de l'échelle des températures absolues Kelvin, nommée ainsi en l'honneur d'un pionnier de la thermodynamique : William John Macquorn Rankine (1820-1872). Le °R est égal à la température en °F + 459,67.

Le degré Réaumur

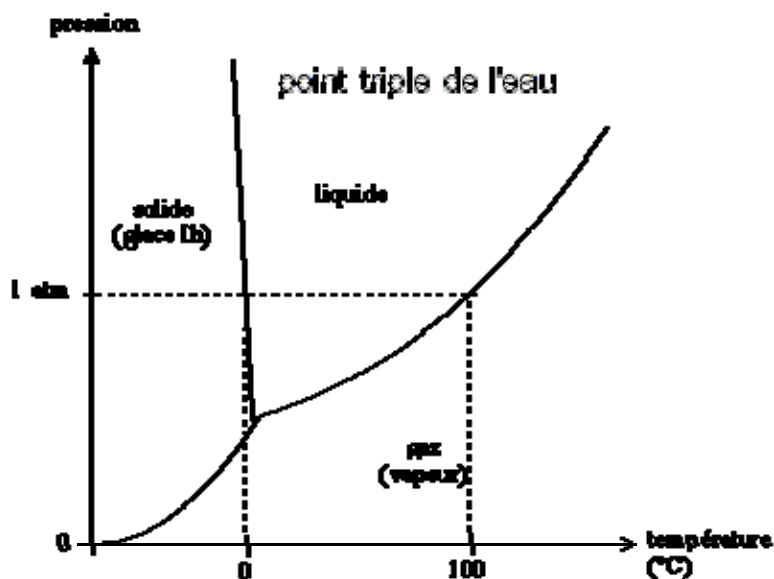
Citons, pour mémoire, **René Antoine Ferchault de Réaumur** (1683-1757) qui fut amené à inventer, vers 1730, à cause de l'imprécision des mesures employées, le thermomètre à alcool qui porte son nom. Bien qu'il ait été détrôné plus tard par le thermomètre Celsius, il constitua un notable progrès au XVIIIe siècle. Son échelle fut fixée, en 1732 à zéro degrés pour la température de fusion de la glace et à 80 degrés pour l'ébullition de l'esprit-de-vin (alcool).

Pendant une certaine période, le thermomètre de Réaumur a désigné des instruments où la température d'ébullition de l'eau se trouvait à une division comprise entre 80 et 100 degrés Réaumur. Cette constatation conduisit, en 1772, le physicien genevois Jean-André Deluc (1727-1817) à proposer une division en 80 parties de l'intervalle fondamental du thermomètre Réaumur dans les pays l'ayant adopté. Les constructeurs français normalisèrent peu à peu leur échelle suivant cette proposition, mais le renom laissé par Réaumur était alors si grand qu'ils lui donnèrent son nom. Son usage dura jusqu'au tout début du XXe siècle en Allemagne méridionale, en Espagne, en Russie et en Amérique du sud.

Vers la graduation centésimale

Durant le siècle qui a suivi l'invention du thermomètre, une soixantaine de graduations différentes avaient vu le jour, ainsi que le précise le physicien batave Jan Hendrik Van Swinden (1746-1823) dans la *Dissertation sur la comparaison des thermomètres*, publiée en 1778. La normalisation allait bientôt se réaliser en Europe continentale suivant une graduation centésimale.

Points fixes de température et points-triples



L'ITS (*International Temperature Scale*) a établi dix-sept points de référence de température, basé sur le phénomène physique du point triple de différents matériaux.

Le **point triple** est le point des intersections des courbes d'évaporation, de sublimation et de fusion d'un matériau. C'est Josiah W. Gibbs (1839-1903) qui reconnaît et énonce la règle des phases : les trois états, solide, liquide et gazeux ne coexistent qu'en un point unique de l'espace des paramètres thermodynamiques, le point triple. On pourra trouver ensemble de la vapeur, du liquide et du solide à une température et une pression uniques, parfaitement définies.

Points fixes de température ITS-90				
Élément	Symbole	Type	K	°C
Hélium	He	Pression de vapeur	5	-268.15
Hydrogène	H ₂	Point triple	13.8033	-259.3467
Hydrogène	H ₂	Pression de vapeur	17	-256.15
Hydrogène	H ₂	Pression de vapeur	20.3	-252.85
Néon	Ne	Point triple	24.5561	-248.5939
Oxygène	O ₂	Point triple	54.3584	-218.7916
Argon	Ar	Point triple	83.8058	-189.3442
Mercure	Hg	Point triple	234.315	-38.8344
Eau	H ₂ O	Point triple	273.16	0.01
Gallium	Ga	Fusion	302.9146	29.7646
Indium	In	Congélation	429.7485	156.5985
Étain	Sn	Congélation	505.078	231.928
Zinc	Zn	Congélation	692.677	419.527
Aluminium	Al	Solidification	933.473	660.323
Argent	Ag	Congélation	1234.93	961.78
Or	Au	Congélation	1337.33	1064.18
Cuivre	Cu	Congélation	1357.77	1084.62

Diversité des mesures à effectuer

Bien que pouvant suffire dans beaucoup de cas de mesures de températures, certains types étant précis à mieux que le dixième de °C, - *thermomètre médical par exemple* - les thermomètres à alcool sont limitée à une plage comprise d'environ - 35 °C à + 70 °C.

Pour effectuer des mesures de température :

- Avec une large étendue de mesure,
- Dans des endroits éloignés,
- Supérieure à la température d'ébullition de l'alcool,
- Hors de la vue de l'expérimentateur,
- Dans des endroits dangereux ou nocifs,
- etc.

Il est nécessaire d'utiliser d'autres systèmes tels que :

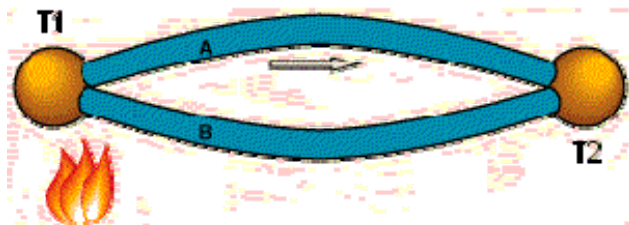
- Les Thermocouples
- Les RTD (Resistance Temperature Detector) ou Sondes Platine
Également nommé PRTD (Platin Resistance Temperature Detector)
- Les Thermistances
- les Capteurs intégrés

Tous ces systèmes de mesure sont utilisés en aéronautique :

- Sondes platine : évaluations des températures d'air extérieur, d'air de la cabine, d'huile des moteurs
- Thermocouples : températures des différents étages des réacteurs
- Capteurs intégrés : températures internes des équipements
- Thermistances : seuils d'alarme de niveau de carburant

LES THERMOCOUPLES

Étymologie et Historique : Du grec *therme* signifiant chaleur, et couple désignant deux choses de même espèce, mais avec des différences. 1905 thermo-couple (Répertoire général des sciences pures et appliquées, no 12, p. 586). L'anglais thermocouple est attesté en 1890.



Dans un circuit fermé constitué de deux conducteurs de nature différente, il circule un courant lorsqu'on maintient entre les deux jonctions une différence de température.

Ce phénomène est en relation avec les trois effets thermoélectriques dans les métaux :

L'effet Seebeck

Thomas Johann Seebeck (1770-1831) est le premier à avoir mis en évidence les effets thermoélectriques de production de courants qui se manifestent dans un circuit constitué de deux métaux dont les deux soudures se trouvent à des températures différentes. Il ne manqua pas de noter le phénomène provoqué par une différence de température le long d'un conducteur homogène ; phénomène qui sera redécouvert trente ans plus tard par William Thomson et qu'on appellera Effet Thomson.

L'effet Peltier

Jean Charles Athanase Peltier, physicien français (1785-1845), abandonne la profession d'horloger à l'âge de trente ans pour se consacrer à la recherche en physique ; il est connu pour sa découverte en 1834 de l'effet Peltier : lorsqu'un courant électrique passe dans une jonction de deux conducteurs de métaux différents, on observe une augmentation ou une baisse de température selon le sens du courant ; la quantité de chaleur dégagée ou absorbée étant proportionnelle à l'intensité du courant. C'est, en quelque sorte, l'inverse de l'effet Seebeck. Le passage d'un courant peut donc absorber de la chaleur ; on utilise cet effet dans certains petits réfrigérateurs ou pour le refroidissement de circuits électriques.

L'effet Thomson

Découvert par lord Kelvin (alors sir William Thomson) - *mais déjà noté par Seebeck* -, qui en a reconnu l'existence par expérience après l'avoir démontré théoriquement. C'est une sorte d'effet Peltier, mais entre des portions contiguës d'un même barreau de métal. L'effet Thomson se rapporte à la production - ou à l'absorption - de chaleur provoquée par le passage d'un courant dans une portion de conducteur, en présence d'une différence de température entre les extrémités du tronçon.

Il est utilisé pour la réalisation de sondes thermométriques très précises. La force électromotrice qui apparaît dans le circuit dépend de la nature des deux conducteurs et des températures des deux jonctions: celles-ci sont appelées respectivement :

Soudure chaude

Jonction de l'ensemble thermocouple soumis à la température à mesurer : c'est la jonction Capteur.

Soudure froide

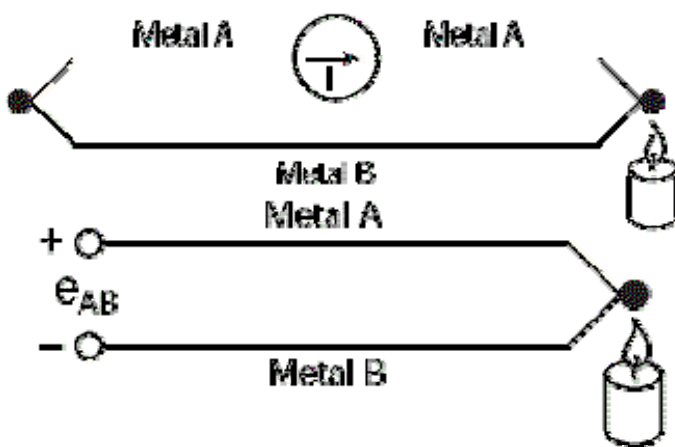
Jonction de l'ensemble thermocouple maintenu à une température connue ou à 0 °C : c'est la jonction Référence.

Le thermocouple le plus précis est constitué de platine et d'un alliage platine + 10% de rhodium (couple Le Chatelier); la sensibilité est de l'ordre de 10 microvolts par degré. D'autres couples métalliques fournissent jusqu'à 70 microvolts par degré, mais les jonctions entre des corps tels que tellure ou bismuth, ainsi que les couples formés de cristaux de germanium dopés n et p, délivrent des forces électromotrices beaucoup plus considérables; ils sont toutefois difficilement manipulables. Le thermocouple le plus réfractaire (utilisable jusqu'à 2 800 °C) est formé de tungstène et d'un alliage de tungstène et de 26% de rhénium. Dans le domaine cryogénique, on peut atteindre 1 K (environ) avec certains couples, formés, par exemple, d'alliages or-cobalt.

Historique

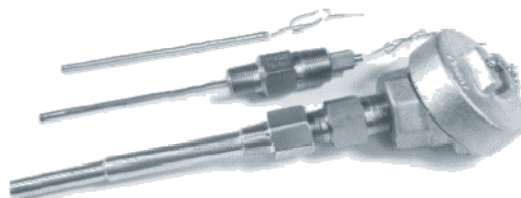
En 1822-1823, Thomas Seebeck décrit, dans un mémoire à l'Académie des sciences de Prusse, un phénomène qui correspond bien à la découverte du courant thermoélectrique se produisant dans un circuit fermé, formé de conducteurs différents et dont les jonctions sont à des températures différentes. L'explication par Seebeck de ce phénomène est erronée, mais les classements de matériaux qu'il a établis en fonction de ce que, actuellement, on nomme le pouvoir thermoélectrique sont tout à fait corrects. Seebeck ne manque pas de noter le phénomène provoqué par une différence de température le long d'un conducteur homogène; ce phénomène sera redécouvert trente ans plus tard par William Thomson. Vers 1834, Jean Charles Athanase Peltier publie dans les Annales de physique et chimie un article sur les anomalies de température observées aux jonctions de conducteurs de nature différente. Les expériences de Peltier sont confirmées, en 1838, par Antoine-César Becquerel et surtout Heinrich Lenz, mais les explications de Peltier concernant le phénomène découvert sont incorrectes. Il faut attendre 1857 pour avoir, avec Thomson, une vue d'ensemble convenable des trois effets thermoélectriques (effet Peltier, effet Seebeck et effet Thomson) et une formulation encore admise aujourd'hui. Le calcul des propriétés des circuits thermoélectriques a été, pour la première fois, effectué d'une manière satisfaisante par E. Altenkirch en 1909.

Explications Générales



Lorsque deux fils composés de métaux différents sont raccordés à leurs extrémités et que l'une d'elles est chauffée, il se produit une circulation de courant continu dans le circuit. C'est l'effet Thermoélectrique.

Circuit coupé et en chauffant la jonction des deux métaux différents A et B, une tension e_{AB} apparaît ; elle est fonction de la température de la jonction et de la composition des deux métaux. Tous les métaux dissemblables présentent cet effet.



Types de thermocouples les plus courants						
Type	Métal A (+)	Métal B (-)	Limites théoriques	Coef. Seebeck α ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) à $T^\circ\text{C}$	Erreur standard	Erreur Mini
B	Platine 30% Rhodium	Platine 6% Rhodium	0 à 1820°C	5,96 μV à 600°C	0,5%	0,25%
E	Nickel 10% Chrome	Constantan	-270 à 1000°C	58,67 μV à 0°C	1,7% à 0,5%	1% à 0,4%
J	Fer	Constantan	-210 à 1200°C	50,38 μV à 0°C	2,2% à 0,75%	1,1% à 0,4%
K	Chromel	Alumel	-270 à 1372°C	39,45 μV à 0°C	2,2% à 0,75%	1,1% à 0,2%
N	Nicrosil	Nisil	-270 à 1300°C	25,93 μV à 0°C	2,2% à 0,75%	1,1% à 0,4%
R	Platine 13% Rhodium	Platine	-50 à 1768°C	11,36 μV à 600°C	1,5% à 0,25%	0,6% à 0,1%
S	Platine 10% Rhodium	Platine	-50 à 1768°C	10,21 μV à 600°C	1,5% à 0,25%	0,6% à 0,1%
T	Cuivre	Constantan	-270 à 400°C	38,75 μV à 0°C	1% à 0,75%	0,5% à 0,4%

Normalisation

Les métaux et les alliages utilisés, aux caractéristiques éprouvées, sont normalisés au niveau international, en ce qui concerne les matériaux, les courbes de transfert, les symboles, les tolérances et les codes de couleur suivant des normes :

- CEI 584-1 (ex NF C 42-321) Tables de référence - $e = f(\Theta)$
- CEI 584-2 (ex NF C 42-322) Tolérances
- CEI 584-3 (ex NF C 42-323) Identification des couples thermoélectriques et des câbles de compensation
- CEI 584-4 (ex NF C 42-324) Câbles d'extension et de compensation pour couples thermoélectriques. Composition, nature des matériaux, essais de fabrication.
- CEI 584-5 (ex NF C 42-325) Câbles et thermocouples dits "chemisés"

Vu les prix demandés par le site **AFNOR**, (Normes en ligne), par exemple 102 Euros HT pour les tables de référence, ou sur le site **IEC**, 252 Francs suisses (162 Euros) pour la norme CEI 60584-1, je ne me suis pas procuré ces normes.

On peut trouver *gratuitement* les tables de référence ITS-90 (International Temperature Standard) pour les principaux types de thermocouples sur le site **NIST ITS-90 Thermocouple databases**.

Quelques valeurs normalisées					
Type	Couleurs CEI 584-3 (+ / -)	Couleurs NF C 42-323 1985 (+ / -)	Plages utilisation	Tolérances NF EN 60-584 Classe 1	Tolérances NF EN 60-584 Classe 2
B	Gris / Blanc	Jaune / Gris	+600 à +1700°C	-	$\pm 0.0025 \cdot \Theta$ de 600 à +1700°C
E	Violet / Blanc	Jaune / Orange	-40 à +900°C	$\pm 1.5^\circ\text{C}$ de -40 à +375°C $\pm 0.0004 \cdot \Theta$ de 375 à 800°C	$\pm 2.5^\circ\text{C}$ de -40 à +333°C $\pm 0.0075 \cdot \Theta$ de 333 à 900°C
J	Noir / Blanc	Jaune / Noir	-40 à +750°C	$\pm 1.5^\circ\text{C}$ de -40 à +375°C $\pm 0.004 \cdot \Theta$ de 375 à 750°C	$\pm 2.5^\circ\text{C}$ de -40 à +333°C $\pm 0.0075 \cdot \Theta$ de 333 à 750°C
K	Vert / Blanc	Jaune / Violet	-40 à +1200°C	$\pm 1.5^\circ\text{C}$ de -40 à +375°C $\pm 0.004 \cdot \Theta$ de 375 à 1000°C	$\pm 2.5^\circ\text{C}$ de -40 à +333°C $\pm 0.0075 \cdot \Theta$ de 333 à 1200°C
N	Rose / Blanc	-	-40 à +1200°C	$\pm 1.5^\circ\text{C}$ de -40 à +375°C $\pm 0.004 \cdot \Theta$ de 375 à 1000°C	$\pm 2.5^\circ\text{C}$ de -40 à +333°C $\pm 0.0075 \cdot \Theta$ de 333 à 1000°C
R	Orange / Blanc	Jaune / Vert	0 à +1600°C	$\pm 1.0^\circ\text{C}$ de 0 à +1100°C $\pm 1 + 0.003 \cdot (\Theta - 1100)$ de 1100 à 1600°C	$\pm 1.5^\circ\text{C}$ de 0 à +600°C $\pm 0.0025 \cdot \Theta$ de 600 à 1600°C
S	Orange / Blanc	Jaune / Vert	0 à +1600°C	$\pm 1.0^\circ\text{C}$ de 0 à +1100°C $\pm 1 + 0.003 \cdot (\Theta - 1100)$ de 1100 à 1600°C	$\pm 1.5^\circ\text{C}$ de 0 à +600°C $\pm 0.0025 \cdot \Theta$ de 600 à 1600°C
T	Brun / Blanc	Jaune / Bleu	-40 à +350°C	$\pm 0.5^\circ\text{C}$ de -40 à +125°C $\pm 0.004 \cdot \Theta$ de 125 à 350°C	$\pm 1.0^\circ\text{C}$ de -40 à +133°C $\pm 0.0075 \cdot \Theta$ de 133 à 350°C

Constantan

Alliage de cuivre et de nickel caractérisé par une résistance électrique pratiquement indépendante de la température, et convenant donc à la construction de résistances électriques. Le cuivre et le nickel étant deux métaux parfaitement isomorphes, ils sont donc miscibles à l'état liquide en toutes proportions. La courbe des conductivités de l'alliage, en fonction de la proportion de cuivre et de nickel, présente un aspect typique avec un minimum très accentué autour du point 50%, et une croissance très rapide lorsqu'on approche des métaux purs. Dans la pratique, on utilise généralement un alliage à 60% de cuivre et 40% de nickel, d'une résistance spécifique de 0,5 $\Omega/\text{mm}^2/\text{m}$. Ces deux métaux peuvent également former un alliage par simple diffusion sans passer par la phase liquide. L'expérience a été réalisée par Bruni, qui chauffait un fil de cuivre sur lequel avait été déposée une couche de nickel. La résistance de l'ensemble augmentait très nettement par suite de la formation du constantan.

ATTENTION : *Constantan est le nom générique des alliages de cuivre et de nickel et ne donne pas un pourcentage précis des deux métaux. Le Constantan utilisé dans les thermocouples de type T (Cuivre/Constantan) n'est pas le même que celui des thermocouples de type J (Fer/Constantan).*

Thermocouple de type B

Bien qu'ils soient donnés pour une plage théorique de 0 à 1820°C, les thermocouples de type B présentent une zone de difficulté de calcul et d'incertitude entre 0 °C et 100 °C pour laquelle la tension thermoélectrique fluctue entre -0.003 mV et +0.003 mV (0 à 50 °C) puis croît très doucement jusqu'à 0.033 mV à 100 °C. Pour pouvoir effectuer des calculs avec certitude et obtenir une précision de 1 °C dans cette zone, il serait nécessaire de disposer d'un moyen de mesure d'une résolution d'au moins 0.01 μV pour une précision de 0.1 μV , mais la table ITS-90 pour le type B ne donne qu'une précision de 1 μV .

La plage d'utilisation *normalisée* est de +600 à +1700°C

Les limites basses seront donc de 100 °C ou 0.033 mV pour les calculs effectués dans les pages suivantes.

Les thermocouples de type B sont communément nommés : Thermocouples 18%.

Explication : 30% Rhodium (Positif) + 6% Rhodium (Négatif) égale 36% qui divisé par deux donne 18%.

Voir incertitudes des résultats par table et par calcul.

Il existe d'autres types de thermocouples, comme ceux à base de Tungstène (W) allié avec du Rhénium (Re) pour le rendre un peu plus malléable. Ils sont utilisés pour les très hautes températures dans le vide ou en atmosphère inerte. Ce sont les type C (W-5%Re/W-26%Re), type D (W-3%Re/W-25%Re) et type G (W/W-26%Re).

Pour de petits changements de température, la variation de tension est proportionnelle à la variation de température : $\Delta e_{AB} = \Delta \alpha T$ - α est appelé: coefficient de Seebeck.

Un des thermocouples le plus utilisé est le Chromel-Alumel ou Thermocouple de Type K. Il possède une plage de mesure étendue (-100 à + 1370 °C), une force électromotrice importante (41310 μV à 1000 °C avec soudure froide à 0°C) et une courbe que l'on sait très bien linéariser pour obtenir sur toute l'étendue de mesure des précisions meilleures que 0,2%.

Alumel

Alliage composé de 95% de nickel, 2% d'aluminium, 2% de manganèse et 1% de silicium.

Chromel

Alliage composé de 80% de nickel et 20% de Chrome.

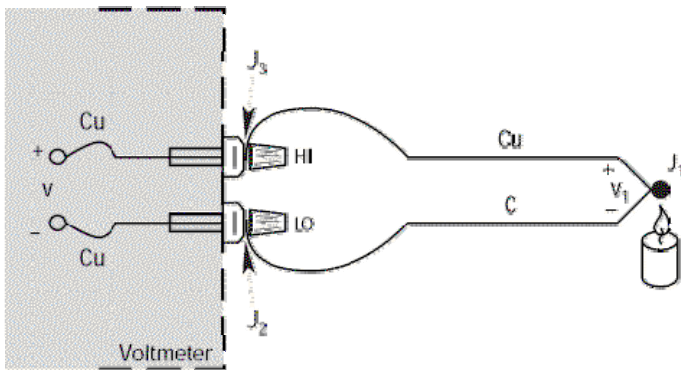
MESURER LA TENSION PRODUITE PAR UN THERMOCOUPLE

Maintenant que nous savons qu'un thermocouple génère une tension dont la valeur est fonction de la température et du coefficient de Seebeck (α) de la jonction des deux métaux dissemblables, il ne reste plus qu'à mesurer celle-ci à l'aide d'un voltmètre puis d'exprimer, par calcul, la tension mesurée en température.

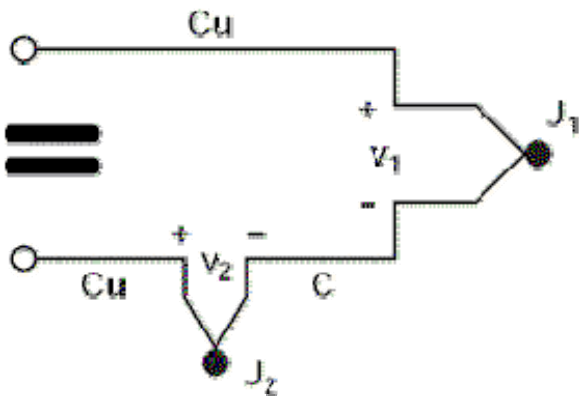
Connexion sur un voltmètre

Connectons un thermocouple Cuivre/Constantan (Type T) sur les bornes d'un voltmètre et, après calcul d'après $\alpha = 38,75\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, nous trouvons une valeur de température qui n'a rien à voir avec l'ambiance dans laquelle se trouve le thermocouple.

Nous avons commis des erreurs ou des oublis



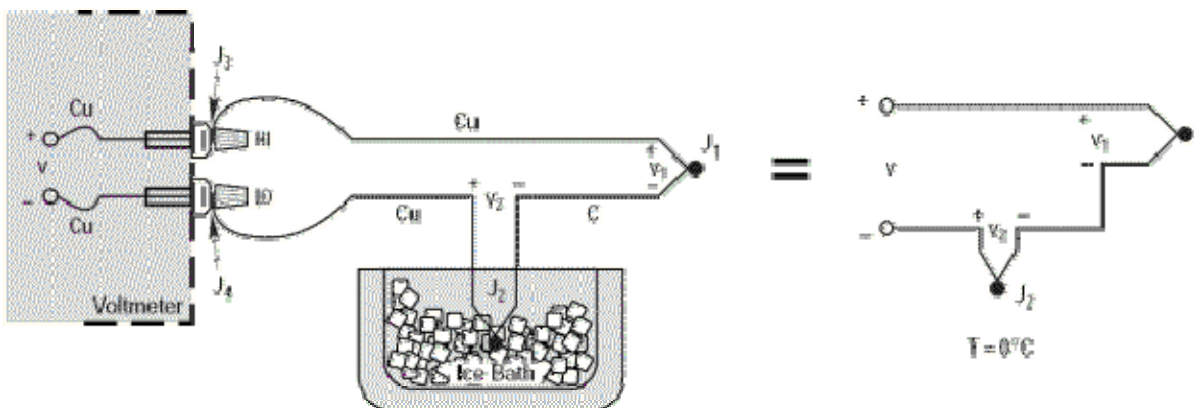
En connectant le thermocouple Cuivre/Constantan sur les bornes en cuivre du voltmètre, nous avons créé deux nouvelles jonctions métalliques : J_3 , jonction cuivre sur cuivre qui ne crée pas de tension thermoélectrique et J_2 qui, étant constituée de deux métaux différents (Cuivre/Constantan) génère une tension thermoélectrique (V_2) qui vient en opposition avec la tension V_1 que nous voulions mesurer.



En fin de compte, en se référant au schéma équivalent (=), la tension résultante mesurée par le voltmètre est égale à $V_1 - V_2$, c'est-à-dire qu'elle est proportionnelle à la différence de température entre J_1 et J_2 .

Nous ne pourrions trouver la température de J_1 que si nous connaissons celle de J_2

Référence de la jonction externe



Une manière simple de déterminer exactement et facilement la température de la jonction J_2 est de la plonger dans un bain de glace fondante, ce qui force sa température à 0°C (273,15 K). On pourra alors considérer J_2 comme étant la **jonction de référence**.

Le schéma a donc maintenant une référence 0°C sur J_2 .

La lecture du voltmètre devient: $V = (V_1 - V_2)$ équivalent à $\alpha (t_{J_1} - t_{J_2})$.

Écrivons la formule avec des degrés Celsius : $T_{J_1} (^\circ\text{C}) + 273,15 = t_{J_1}(\text{K})$.

Et la tension V devient : $V = V_1 - V_2 = \alpha [(t_{J_1} + 273,15) - (t_{J_2} + 273,15)] = \alpha (T_{J_1} - T_{J_2}) = \alpha (T_{J_1} - 0) = \alpha T_{J_1}$

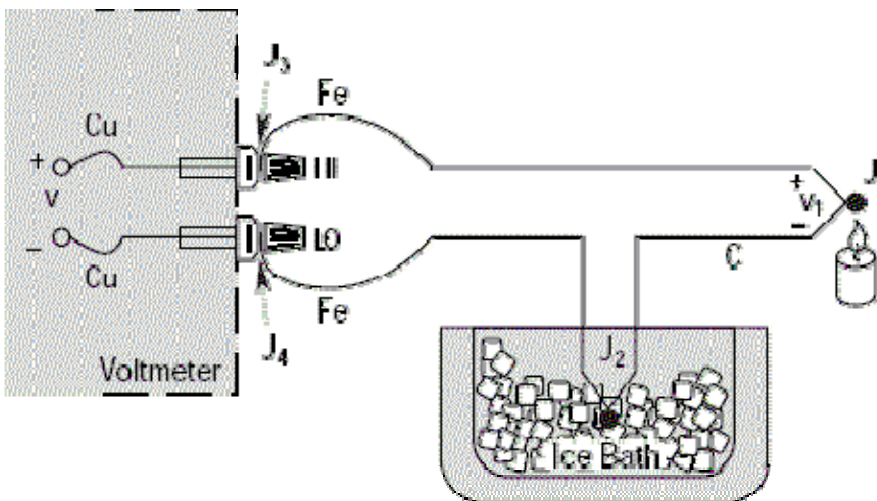
Nous avons utilisé ce raisonnement pour souligner que la tension V_2 de la jonction J_2 , dans le bain de glace, **n'est pas zéro volt**. C'est une fonction de la température absolue. Cette méthode est très précise car la température 0°C (Point de fusion de la glace), peut être facilement et précisément contrôlée.

Le point de fusion de la glace est utilisé par les organismes de normalisation comme point de référence fondamental pour leurs tables de tension de thermocouple. Ainsi, à la lecture de ces tables, nous pourrions convertir directement la tension V_1 en température T_{J_1} .

La tension de la jonction J_2 dans le bain de glace fondante n'est pas zéro volt.
C'est une fonction de la température absolue.

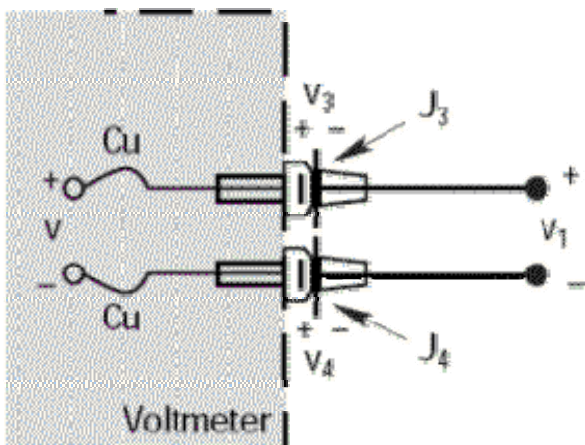
Et avec un autre type de thermocouple ?

Les exemples précédents ont été présentés avec un thermocouple Cuivre/Constantan (Type T), qui peut sembler d'une utilisation facile pour les démonstrations car le cuivre est également le métal des bornes du voltmètre et cela n'induit qu'une seule jonction parasite.



Effectuons le même exemple avec un thermocouple Fer/Constantan (Type J) à la place du Cuivre/Constantan.

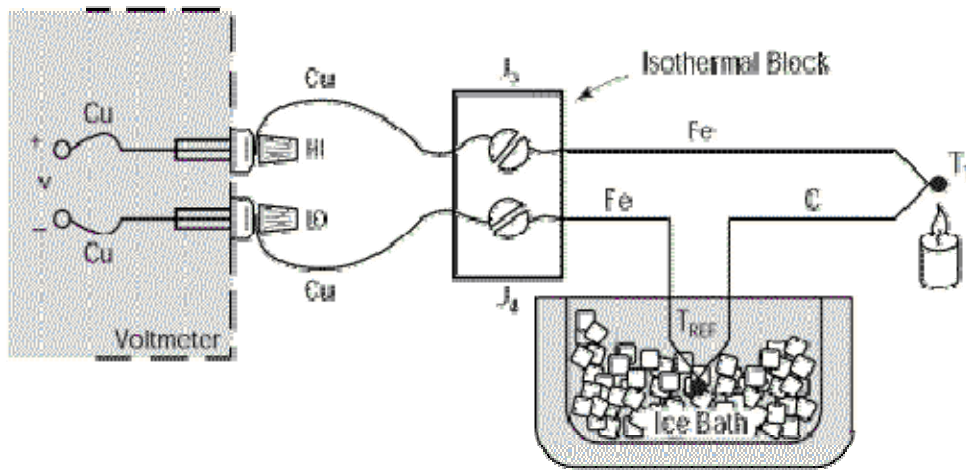
Le nombre de jonctions métalliques dissemblables augmente car les deux bornes du voltmètre sont maintenant composées de jonctions thermoélectriques Fer/Cuivre.



Le voltmètre indiquera une tension V égale à V_1 seulement si les tensions thermoélectriques V_3 et V_4 sont identiques, puisqu'elles sont en opposition ; c'est-à-dire si les jonctions parasites J_3 et J_4 sont à la même température.

S'affranchir du problème des bornes du voltmètre

Pour éviter toute dérive de mesure, il est indispensable que les bornes de connexion du voltmètre soient à la même température.



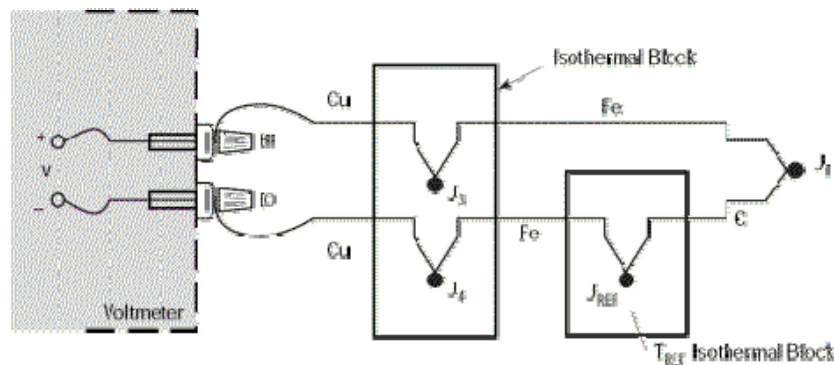
On peut éliminer ce problème en rallongeant les fils de cuivre pour ne les raccorder qu'au plus près du thermocouple avec un bloc de jonction isothermique.

Un bloc de ce type est un isolant électrique mais un bon conducteur de la chaleur de manière à maintenir, en permanence, les jonctions J_3 et J_4 à une température identique.

En procédant ainsi, nous pourrions, très facilement et sans problèmes, éloigner le thermocouple du moyen de mesure. La température du bloc isothermique n'a aucune importance puisque les tensions thermoélectriques des deux jonctions Cu-Fe sont en opposition.

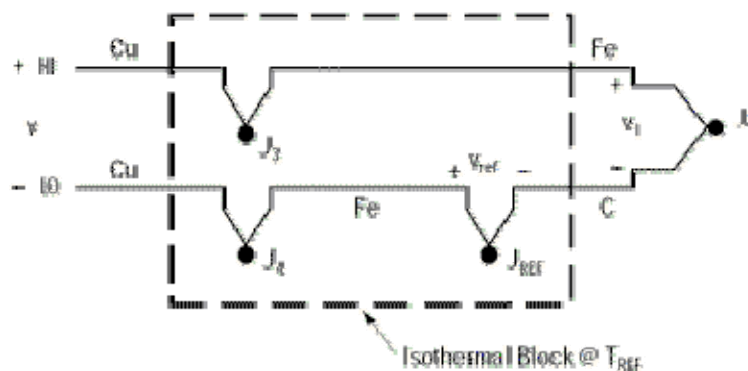
Nous aurons toujours : $V = \alpha(T_{J1} - T_{REF})$

Éliminer le bain de glace fondante



Le circuit précédent nous permet d'effectuer des mesures précises et fiables loin du thermocouple, mais quelle riche idée ce serait d'éliminer la nécessité du bain de glace fondante.

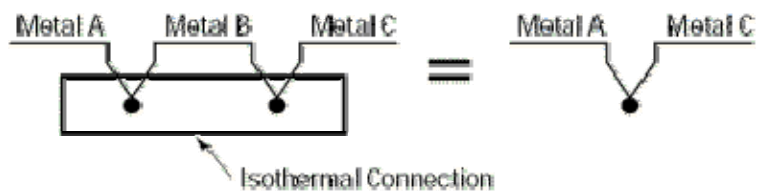
Commençons par remplacer le bain de glace fondante par un autre bloc isothermique que l'on maintiendra à la température T_{REF} .



Puisque nous avons vu précédemment que la température du bloc isothermique supportant les jonctions J_3 et J_4 n'avait aucune importance - à condition que ces deux jonctions soient à la même température - rien ne nous empêche de réunir les deux blocs en un seul qui sera maintenu à la température T_{REF}

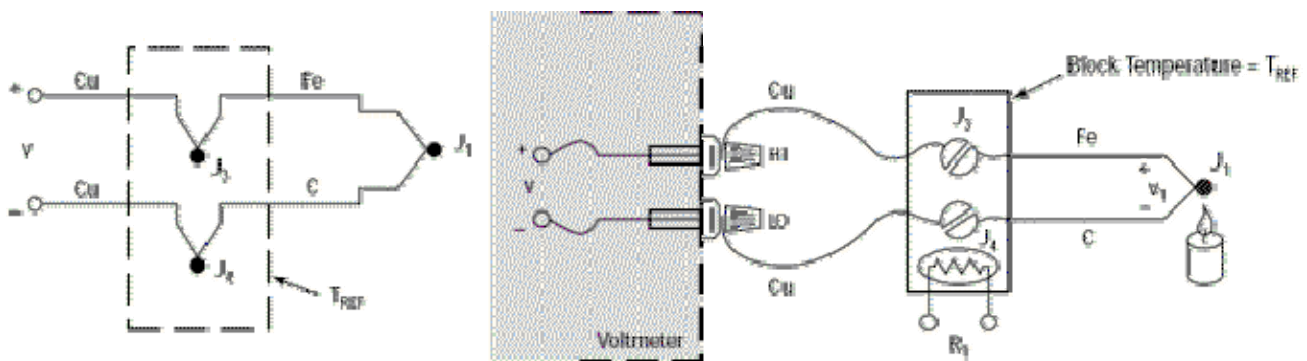
Nous aurons toujours : $V = \alpha(T_{J1} - T_{REF})$

Ce nouveau circuit présente, quand même, l'inconvénient de demander la connexion de deux thermocouples.



Nous pouvons très bien éliminer le thermocouple supplémentaire en combinant les jonctions Cu-Fe (J_4) et Fe-C (J_{REF}). Ceci est possible grâce à la **loi des métaux intermédiaires**. Cette loi empirique stipule qu'un troisième métal (en l'occurrence du Fer) inséré entre les deux métaux différents d'un thermocouple n'a aucune influence sur la tension générée à condition que les deux jonctions formées par le métal additionnel soient à la même température.

Nous en arrivons donc au circuit équivalent ci-dessous dans lequel nos deux jonctions J_3 et J_4 deviennent la **Jonction de Référence** et, pour lequel, la relation : $V = \alpha(T_{J1} - T_{REF})$ est toujours vérifiée.



Récapitulatif

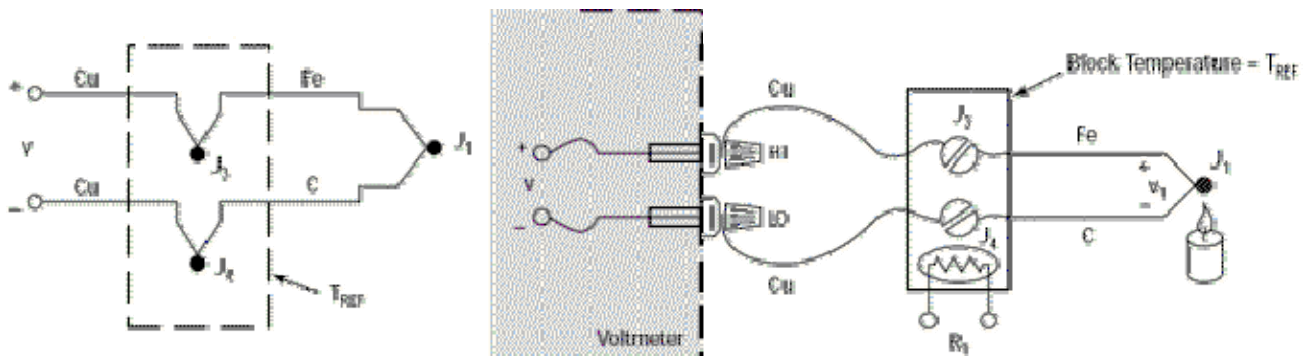
Nous avons, dans l'ordre :

1. Créé une Jonction de Référence,
2. Montré que $V = \alpha(T_{J1} - T_{REF})$,
3. Mis la Jonction de Référence dans un bain de glace fondante,
4. Supprimé le problème des bornes du voltmètre,
5. Combiné le circuit de référence,
6. Éliminé le bain de glace fondante,

Pour en arriver à un circuit simple, facile à mettre en œuvre, fiable et performant. Néanmoins, il nous faut connaître, avec précision, la température T_{REF} du bloc de jonction isothermique pour appliquer la relation : $V = \alpha(T_{J1} - T_{REF})$ et ainsi pouvoir calculer la température de la jonction J_1 , ce qui est toujours notre objectif.

MESURER LA TEMPÉRATURE DE T_{REF}

Reprenons le circuit équivalent précédent avec sa **Jonction de Référence** et, pour lequel, la relation : $V = \alpha(T_{J_1} - T_{REF})$ est toujours vérifiée.



Il nous faut donc évaluer la température du bloc isothermique, ce qui sera effectué à l'aide du dispositif R_T .

À l'aide d'un multimètre, nous pourrons :

1. Mesurer R_T pour calculer T_{REF}
2. Convertir T_{REF} en tension équivalente de jonction V_{REF}
3. Mesurer V et y ajouter V_{REF} pour trouver V_1
4. Convertir V_1 en température T_{J_1}

Compensation logicielle (Software Compensation)

Cette manière de procéder se nomme *Compensation logicielle (Software Compensation)* parce qu'elle procède par calcul pour compenser le fait que la **soudure froide** (ou jonction de référence) n'est pas à zéro degré. Le détecteur de température du bloc isothermique peut être n'importe quel dispositif qui comporte une caractéristique proportionnelle à la température absolue : une RTD (Resistor Température Detector), une Thermistance ou un capteur intégré.

Il semble logique de poser la question suivante : Nous utilisons un matériel (Thermistance, sonde platine ou circuit intégré) déjà capable de mesurer une température, pourquoi alors utiliser un thermocouple qui nécessite une compensation de la jonction de référence ?

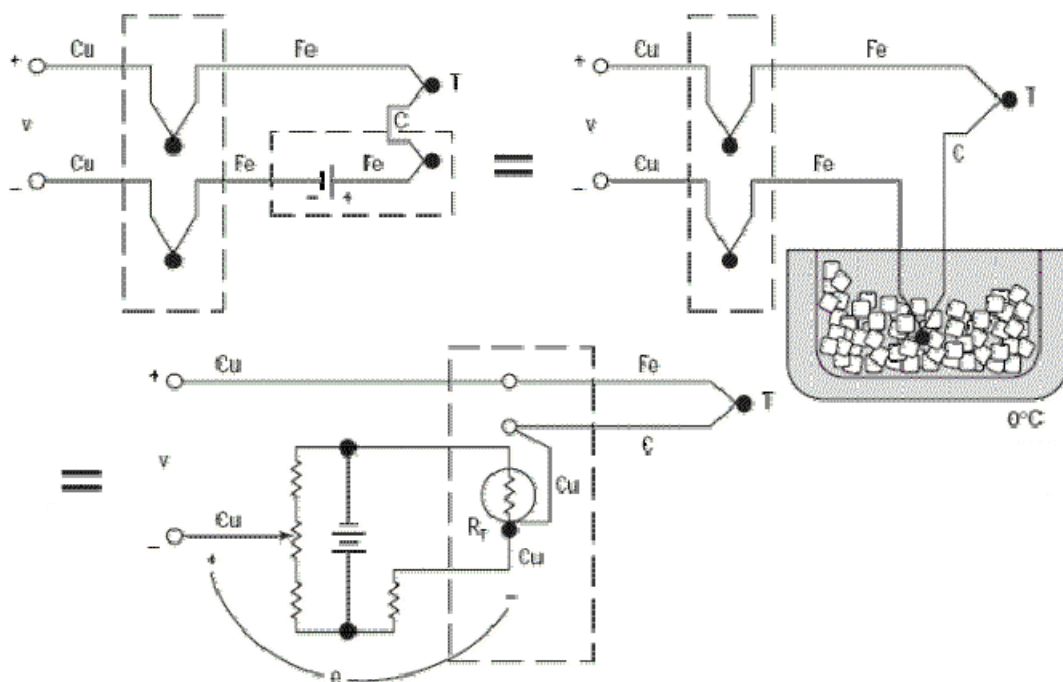
La réponse est simple. Les thermistances, sondes platine ou circuits intégrés ont des plages de mesure limitées alors que les thermocouples :

1. Ont des plages de température très étendues,
2. Ont des formes et des tailles très diverses,
3. Sont utilisés dans des atmosphères explosives ou nocives,
4. Peuvent être soudés sur le métal dont on veut mesurer la température,
5. Et même serrés sous des vis.

En résumé, les thermocouples sont les moyens de mesure de température les plus universels qui soient et, la compensation logicielle est non seulement la plus simple à mettre en œuvre mais aussi la plus efficace et la plus fiable. Mesurer une température avec un thermocouple est aussi simple que de connecter une paire de fils dans une prise électrique.

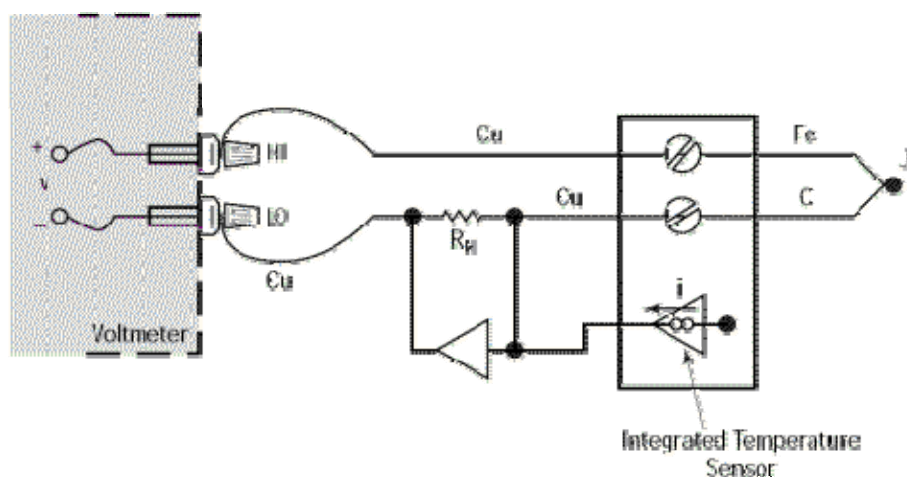
Compensation matérielle (Hardware Compensation)

Plutôt que de mesurer la température de la jonction de référence puis d'effectuer des calculs pour réaliser une compensation logicielle, nous pouvons insérer un dispositif, du genre pile électrique, pour annuler la tension de décalage. L'association de cette compensation matérielle et de la jonction de référence sera alors équivalente à une jonction maintenue à zéro degré.



La tension de compensation, e , est une fonction de la température du capteur R_T et la tension V , qui est maintenant référencée à 0°C , pourra être lue directement puis convertie en température en utilisant les tables de correspondance, par exemple celles fournies par le NIST (National Institute of Standard and Technology) et que l'on peut trouver à : **NIST ITS-90 Thermocouple Database**. Vous en trouverez quelques unes dans les annexes de cette rubrique.

Un moyen pratique d'effectuer une compensation matérielle est d'utiliser les circuits intégrés spécialisés qui existent pour tous les types de thermocouples et sont également appelés : *Référence 0°C électronique*.



La compensation matérielle présente l'avantage d'éliminer les calculs de la température de la jonction de référence, mais nécessite un circuit spécifique par type de thermocouple.

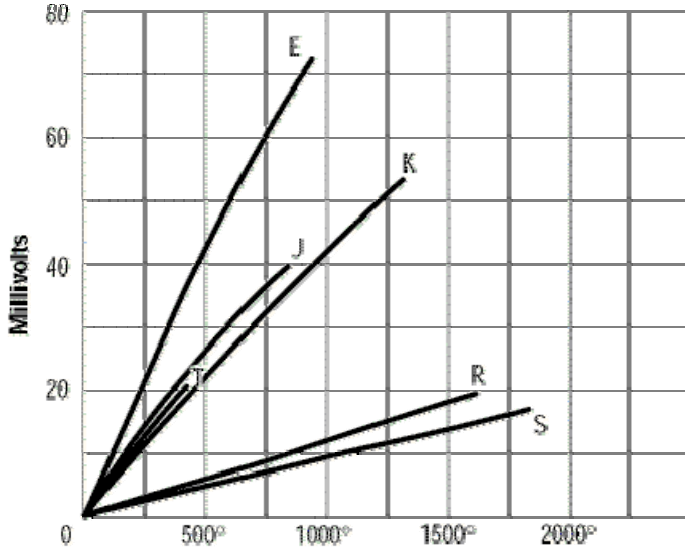
La compensation logicielle est polyvalente et très facilement adaptable à n'importe quel type de thermocouple ; de plus, elle permet une excellente *linéarisation* des relations tension/température pour tous les types de thermocouple.

CONVERTIR LA TENSION EN TEMPÉRATURE

Maintenant que nous avons utilisé soit la compensation logicielle, soit la compensation matérielle, afin d'obtenir une jonction de référence à 0°C, nous devons convertir la tension V mesurée en température.

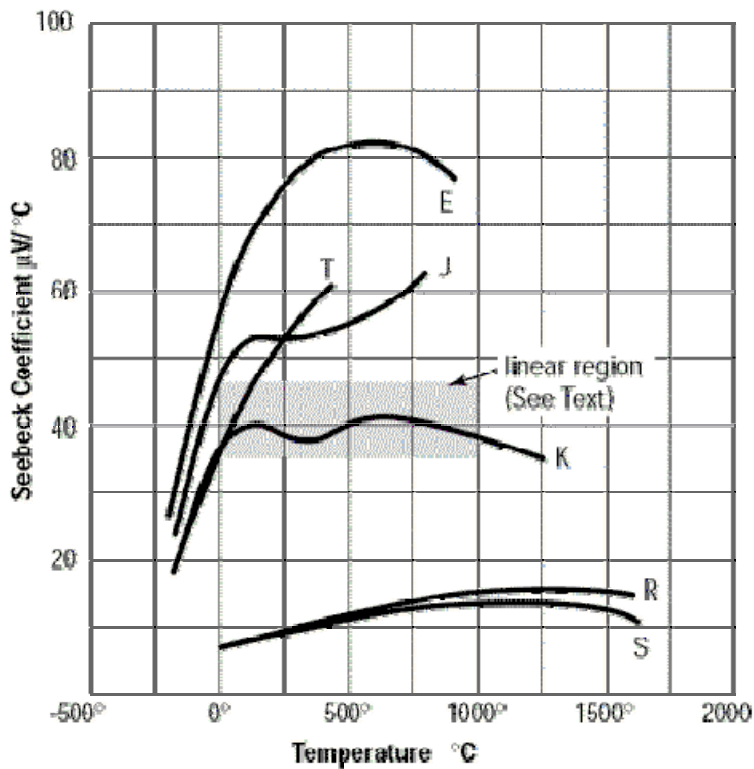
Malheureusement, les relations entre tension et température des thermocouples ne sont pas linéaires.

Tension des thermocouples en fonction de la température



Type	Métal A (+)	Métal B (-)
E	Chromel	Constantan
J	Fer	Constantan
K	Chromel	Alumel
R	Platine	Platine 13% Rhodium
S	Platine	Platine 10% Rhodium
T	Cuivre	Constantan

Coefficient de Seebeck (α) en fonction de la température



Notons que le thermocouple de type K présente une partie presque linéaire entre 0 °C et 1000 °C avec un coefficient de Seebeck α fluctuant autour de 40 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Ainsi, ce type de thermocouple peut être directement exploité avec un voltmètre multiplicateur et une référence 0 °C pour afficher la température avec une précision moyenne.

Calcul à partir des tables

Après avoir lu la valeur de la tension **V**, par exemple **8,35687 mV**, avec un thermocouple de type K (Chromel/Alumel), regardons dans la table ITS-90 :

Table ITS-90 pour Thermocouple de Type K Tension thermoélectrique en mV											
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
190	7.739	7.779	7.819	7.859	7.899	7.939	7.979	8.019	8.059	8.099	8.138
200	8.138	8.178	8.218	8.258	8.298	8.338	8.378	8.418	8.458	8.499	8.539
210	8.539	8.579	8.619	8.659	8.699	8.739	8.779	8.819	8.860	8.900	8.940

Nous pouvons voir que cette valeur est située entre T_{inf} 205 °C (8,338 mV) et T_{sup} 206 °C (8,378 mV)

Effectuons un calcul par interpolation entre les valeurs 205 et 206 °C:

$8,35687 - 8,338 = 0,01887$ mV (Reliquat de tension au dessus de 205 °C)

$8,378 - 8,338 = 0,040$ mV pour une différence de 1 °C

$0,01887 / 0,040 = 0,471$ °C en plus

La température est donc de $205 + 0,471 = 205,471$ °C

L'équation est :

$= 205 + [(8,35687 - 8,338) / (8,378 - 8,338)] = 205,471$ °C

$$T^{\circ C} = T^{\circ C}_{inf} + \frac{V - V_{inf}}{V_{sup} - V_{inf}}$$

Calcul par équation polynomiale

Il est possible de calculer la température à partir de la tension thermoélectrique en ayant recours à une équation polynomiale :

$T_{90} =$ Température en °C $T_{90} = c_0 + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3 + c_4x^4 + \dots + c_nx^n$

x = Tension en mV c = Coefficients polynomiaux n = Ordre maximum de l'équation polynomiale

Exemple de coefficients pour les thermocouples de type K

Température (°C)	-200 à 0	0 à 500	500 à 1372
Tension (mV)	-5.891 à 0.000	0.000 à 20.644	20.644 à 54.886
c ₀	0	0.000000E+00	-1.318058E+02
c ₁	2.5173462E+01	2.508355E+01	4.830222E+01
c ₂	-1.1662878E+00	7.860106E-02	-1.646031E+00
c ₃	-1.0833638E+00	-2.503131E-01	5.464731E-02
c ₄	-8.9773540E-01	8.315270E-02	-9.650715E-04
c ₅	-3.7342377E-01	-1.228034E-02	8.802193E-06
c ₆	-8.6632643E-02	9.804036E-04	-3.110810E-08
c ₇	-1.0450598E-02	-4.413030E-05	0
c ₈	-5.1920577E-04	1.057734E-06	0
c ₉	0	-1.052755E-08	0
Erreur (°C)	-0.02 à 0.04	-0.05 à 0.04	-0.05 à 0.06

Les coefficients des autres types de thermocouples sont indiqués à la fin des tables ITS-90 en annexes

Au lieu d'utiliser l'équation polynomiale et ainsi éviter les exponentielles, on peut recourir à une transposition par la méthode de Horner sous forme d'imbrication des coefficients, par exemple de quatrième ordre :

$$T_{90} = c_0 + x (c_1 + x (c_2 + x (c_3 + c_4 x)))$$

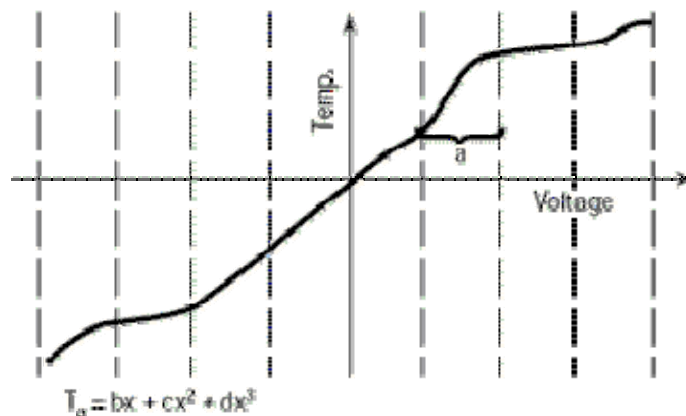
Reprenons la valeur de tension utilisée précédemment, soit **8.35687 mV**, et calculons la température correspondante par l'équation avec les coefficients du type K ci-dessus, le résultat est : **205.441 °C** (205.471 °C à partir des tables).

TEMPÉRATURE DES DIFFÉRENTS THERMOCOUPLES POUR UNE TENSION DE 8.35687 mV

Température calculée en °C							
Type	Par table ITS-90	Imbriquée (Horner)	Écart en %	Polynomiale Petits nombres en 1er	Écart en %	Polynomiale Grands nombres en 1er	Écart en %
B	1346.352	1346.365	0.001	1346.365	0.001	2595.736	92.798
E	129.683	129.682	-0.001	129.682	-0.001	142.543	9.917
J	156.288	156.296	0.005	156.296	0.005	165.334	5.788
K	205.471	205.441	-0.015	205.441	-0.015	209.620	2.019
N	271.968	271.975	0.003	271.975	0.003	323.324	18.883
R	832.836	832.849	0.002	832.849	0.002	1244.016	49.371
S	891.739	891.756	0.002	891.756	0.002	1238.282	38.861
T	182.305	182.303	-0.001	182.303	-0.001	216.677	18.854

Les valeurs de la colonne *Écart* sont calculées par rapport aux tables ITS-90.

L'utilisation de l'équation *imbriquée (Méthode de Horner)*, permet d'obtenir une excellente précision. En revanche, il faut faire très attention dans la manière de calculer l'équation polynomiale. Il faut commencer par les opérations sur les plus petits nombres, sinon on peut s'exposer à de grands écarts, comme on peut le constater dans le tableau ci-dessus avec les cases grises.



Il est possible de réduire le quantième d'ordre des équations en découpant la courbe tension-température en un plus grand nombre de segments et en effectuant une mesure de tension préalable au choix du segment idoine. De ce fait, les équations de chaque segment sont limitées au deuxième ou troisième ordre.

CONVERSION TEMPÉRATURE EN TENSION

C'est, en quelque sorte, la fonction *réciproque ou inverse* de l'équation de conversion d'une tension en température :

Pour tous les types de thermocouples :

$$\sum_{i=0}^n c_i (t_{90})^i$$

Pour les thermocouples de type K et pour les températures supérieures à 0 °C :

$$\sum_{i=0}^n c_i (t_{90})^i + a_0 e^{a_1 (t_{90} - a_2)^2}$$

C_i = Coefficients de C_0 à C_n

t_{90} = Température du thermocouple en °C

a_0 à a_2 = Coefficients spécifiques d'exponentiation uniquement pour les thermocouples de type K et pour les températures supérieures à 0 °C

e = constante des logarithmes naturels : 2.71828...

Exemple de coefficients pour thermocouple de type K

Température (°C)	-270 à 0	0 à 1372
c_0	0	-0.176004136860e-1
c_1	0.394501280250e-1	0.389212049750e-1
c_2	0.236223735980e-4	0.185587700320e-4
c_3	-0.328589067840e-6	-0.994575928740e-7
c_4	-0.499048287770e-8	0.318409457190e-9
c_5	-0.675090591730e-10	-0.560728448890e-12
c_6	-0.574103274280e-12	0.560750590590e-15
c_7	-0.310888728940e-14	-0.320207200030e-18
c_8	-0.104516093650e-16	0.971511471520e-22
c_9	-0.198892668780e-19	-0.121047212750e-25
c_{10}	-0.163226974860e-22	
Coefficients d'exponentielle pour les températures supérieures à 0 °C		
a_0	0.1185976	
a_1	-0.1183432e-3	
a_2	0.1269686e+3	
Les coefficients des autres types de thermocouples sont indiqués à la fin des tables ITS-90 en annexes		

Tension des différents thermocouples pour une température de 350 °C

Tension calculée en mV

Type	Par table ITS-90	Tension	Écart en %
B	0.596	0.596	-0.018
E	24.964	24.964	0.001
J	19.090	19.090	0.002
K	14.293	14.293	0.001
N	11.136	11.136	0.002
R	2.896	2.896	0.007
S	2.786	2.786	-0.008
T	17.819	17.819	-0.002

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Précision de la mesure

Il est indispensable d'utiliser des moyens de mesure de tension sensibles et de grande précision

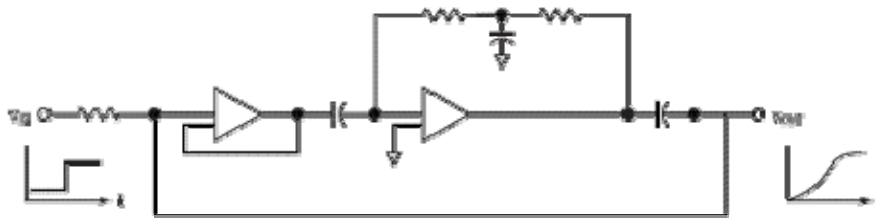
Sensibilité du moyen de mesure

Type de Thermocouple	Coefficient de Seebeck à 25 °C ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)	Sensibilité pour 0,1°C (μV)
E	61	6.1
J	52	5.2
K	40	4.0
R	6	0.6
S	6	0.6
T	41	4.1

Pour un thermocouple très utilisé, comme le type K, le voltmètre doit avoir une précision de $4 \mu\text{V}$ pour détecter une variation de $0,1^\circ\text{C}$. Ce qui veut dire que le voltmètre doit avoir une résolution d'au moins $0,4 \mu\text{V}$ (*dix fois plus faible que la précision demandée*) pour pouvoir garantir, avec justesse et récurrence, la précision nécessaire.

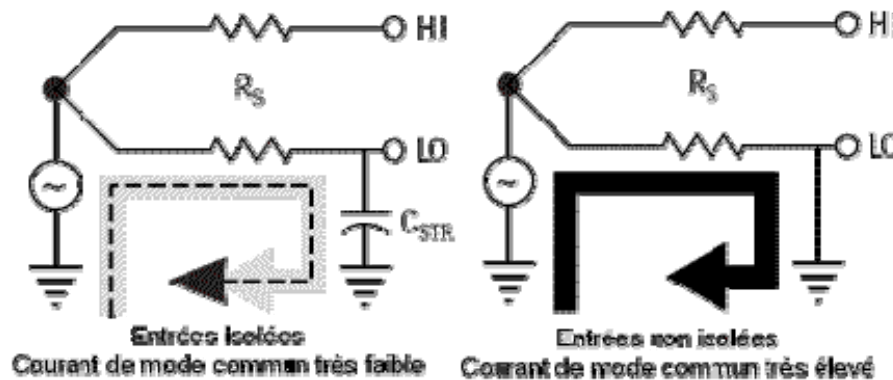
C'est encore plus nécessaire pour les voltmètres utilisés avec les thermocouples de type R ou S qui, pour détecter une variation de $0,1^\circ\text{C}$, doivent avoir une résolution d'au moins $0,06 \mu\text{V}$.

Réjection du bruit, filtrage et techniques de "garde"

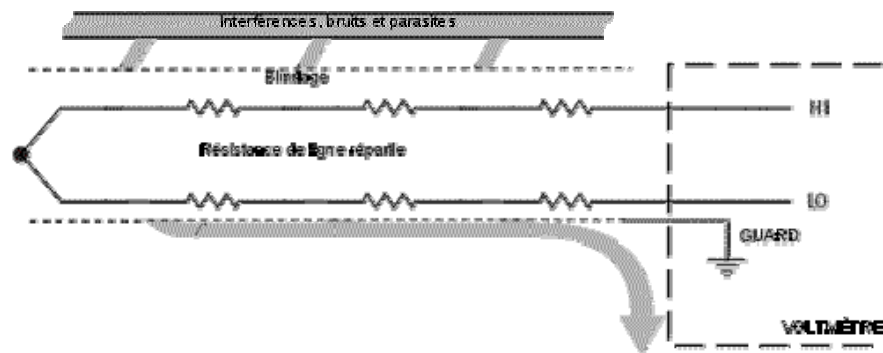


Ces grandes résolutions demandent à ce que les moyens de mesures employés soient équipés de systèmes de réjection de bruits électriques perfectionnés et efficaces. On peut utiliser un système de filtrage analogique qui réduit énormément les interférences et les bruits parasites mais induit un temps de réponse plus important. En principe, les variations de températures étant lentes, ceci n'a que très peu d'inconvénients.

Les convertisseurs analogiques numériques utilisent la technique de l'intégration avec une période plus petite que celle de la tension alternative d'alimentation, ce qui permet d'éliminer pratiquement tous les bruits dus à l'alimentation.



Pour éviter le *bruit de mode commun* il est recommandé d'utiliser un voltmètre avec des entrées isolées qui, par la haute impédance entre les entrées, permet la réjection du bruit de mode commun.

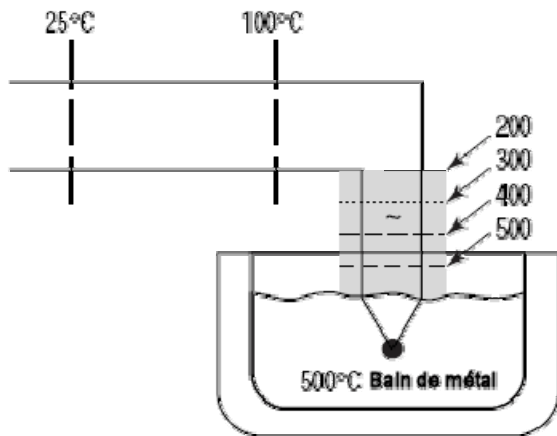


Un meilleur moyen d'isolement et de réjection du bruit est d'utiliser un voltmètre qui, en plus des entrées isolées, comporte un point de *garde (Guard)*, d'utiliser des câbles de liaison thermocouple blindés et de relier le blindage à la garde du voltmètre. Les interférences et les bruits seront captés par le blindage et évacués par la garde du voltmètre.

Qualité du raccordement des deux métaux

La jonction entre les deux fils d'un thermocouple peut être effectuée de plusieurs façons : soudure à l'étain, brasure à l'argent, soudure, soudure électrique, etc. Ces différents procédés limitent les températures maximum admissibles par la jonction. Une soudure, effectuée avec une température élevée, peut dégrader la qualité des matériaux et permettre la diffusion de gaz dans les métaux ; ce qui change les caractéristiques du thermocouple. Les thermocouples de bonne qualité sont soudés électriquement par décharge capacitive, ce qui, vu le coût de telles machines, n'est pas à la portée de l'amateur.

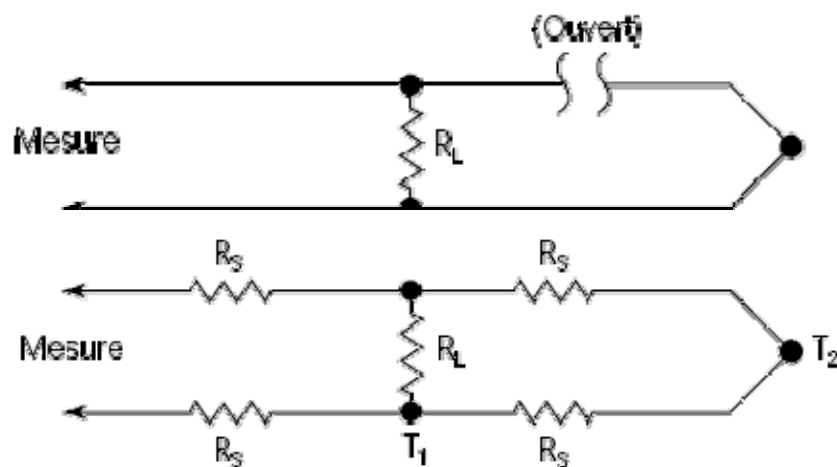
Décalibration



La « décalibration » est un phénomène critique, la lecture de la température semblant correcte. La décalibration est, entre autres, le résultat de la diffusion de particules atmosphériques ou métalliques dans les métaux des thermocouples, principalement causé par de hautes températures.

Une autre cause de décalibration provient d'un défaut d'isolement des fils du thermocouple entre-eux ou par rapport au milieu dans lequel il est plongé. En fonction de l'endroit où se situe le ou les défauts d'isolement, la température indiquée ne sera pas celle du bain de métal (500 °C) mais soit celle de l'endroit du défaut, soit une « moyenne » entre gradients de température des défauts.

Jonction virtuelles



Les isollements entre fils peuvent être dégradés par usure ou par la température, provoquant des « jonctions virtuelles ». Dans certains cas il est difficile de détecter de tels défauts car la jonction virtuelle est suffisante pour créer une continuité du circuit. Ces jonctions virtuelles provoquent des mesures erronées.

PRÉCAUTIONS À PRENDRE

- Utiliser le « bon » calibre de fils pour ne pas « pomper » la chaleur de la zone à mesurer.
- Utiliser des fils fins uniquement dans la zone à mesurer et les prolonger par des fils de plus gros calibre en dehors de la zone à gradient de température.
- Éviter les contraintes et les vibrations.
- Utiliser des liaisons torsadées blindées.
- Éviter les gradients de température.
- Utiliser le bon type de thermocouple en fonction des plages de températures à mesurer.

QUELQUES CONSIDÉRATIONS SUR LES THERMOCOUPLES

Au fil des années, de nombreux types de thermocouples ont été développés pour résoudre des problèmes de mesure.

Métal « noble »

Les thermocouples en métal « noble », types B, R, et S, à base de platine ou les thermocouples platine/platine-rhodium partagent des caractéristiques similaires.

Diffusion

La diffusion de vapeur métallique à températures élevées peut changer le calibrage des fils de platine, par conséquent, ils ne devraient être employés qu'à l'intérieur d'une gaine non métallique telle que la céramique de grande pureté. Une exception à cette règle est une gaine elle-même en platine, mais cette option est prohibitivement coûteuse.

Stabilité

Les couples à base de platine sont, de loin, les plus stables de tous. Le type S est si stable qu'on l'emploie comme « étalon » pour le calibrage de la température entre le point de solidification de l'antimoine ($630,74^{\circ}\text{C}$) et celui de l'or ($1064,43^{\circ}\text{C}$).

Type B :

Le thermocouple B est le seul thermocouple commun qui montre une ambiguïté de double évaluation. (Voir **Annexe 1 Type B**)

Les thermocouples de métal non « précieux »

À la différence des thermocouples en métal noble, les couples de métal non précieux n'ont aucune composition chimique bien précisée. On peut employer n'importe quelle combinaison des métaux qui fait que les résultats de la courbe de température est dans les limites des erreurs standard. Ceci mène à quelques combinaisons plutôt intéressantes. Le Constantan, par exemple, comme vu précédemment, n'est pas un alliage avec des proportions bien définies, mais un nom générique pour des alliages de cuivre-nickel.

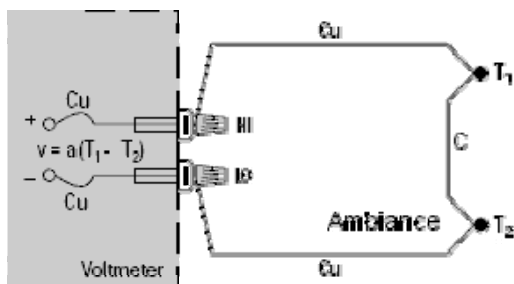
Type E :

Le thermocouple du type E est approprié aux mesures de basses températures en raison de son coefficient de Seebeck élevé ($58 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$), de sa basse conductivité thermique et de sa résistance à la corrosion. Le coefficient de Seebeck pour le type E est le plus grand de tous les thermocouples standards, qui le rend utile pour détecter de petits changements de température.

Type J :

Le fer, l'élément positif dans un thermocouple J est un métal peu coûteux, mais rarement très pur. Les thermocouples J sont sujets à des dispersions de caractéristiques en raison des impuretés dans le fer. Néanmoins, le thermocouple J est populaire en raison de son coefficient de Seebeck élevé et son bas prix. Le thermocouple de J ne devrait jamais être utilisé au-dessus de 760°C à cause d'une transformation magnétique brusque qui peut causer la décalibration même lors du retour à de plus basses températures.

Type T

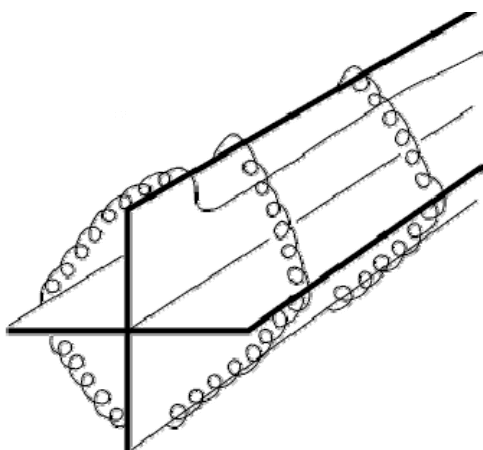


Le type T a la particularité d'avoir un fil de cuivre. Avantage important qui permet, dans des cas de surveillance de différence de température, de s'affranchir de la compensation de soudure froide en montant deux thermocouples de type T en série.

Types K et N

Le type K a toujours été un thermocouple très employé. Il convient à des mesures de température élevée grâce à sa résistance à l'oxydation. Le thermocouple du type N gagne en popularité en remplacement du type K. Il a un résultat légèrement inférieur (coefficient de Seebeck plus faible) que le type K, mais une résistance encore plus élevée à l'oxydation. La courbe de rendement de thermocouple du type N dépend de la taille de fil, et il y a deux courbes caractéristiques distinctes de Nicrosil-Nisil suivant la taille du fil.

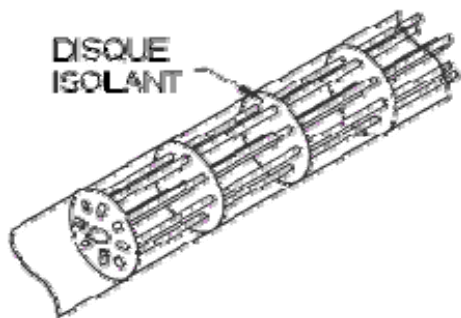
Les RTD (Resistance Temperature Detector)



La même année que Seebeck découvrit la thermo-electricité, **Humphrey Davy** (1778-1829) annonça que la résistivité des métaux montrait une dépendance marquée à la température. Cinquante ans après, William Siemens utilise du platine dans un thermomètre à résistance. Son choix propice est prouvé par l'utilisation du platine comme élément principal dans les thermomètres à résistance de grande précision. En fait, le capteur de température à résistance de platine, ou PRTD (Platinum Resistance Temperature Detector), est employé aujourd'hui du point triple de l'hydrogène (-259,34 °C) au point de congélation de l'argent (961,78°C). Le platine convient particulièrement, car il peut supporter cette grande plage de températures tout en maintenant une excellente stabilité et une altération quasiment nulle.

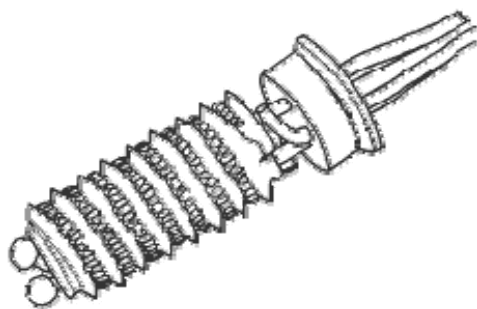
RTD de Meyers

En 1932, C.h. Meyers proposa la construction d'un capteur de température à résistance (RTD) composé d'un enroulement hélicoïdal de platine sur un support croisé de mica, le tout à l'intérieur d'un tube de verre. Ce système réduit au minimum la contrainte sur le fil tout en maximisant la résistance. Bien que cette construction produise un élément très stable, le contact thermique entre le platine et le point à mesurer est de mauvaise qualité avec, comme conséquence, un temps de réponse thermique important. La fragilité de la structure limite, aujourd'hui, son utilisation à celle d'un outil de laboratoire.



RTD « cage d'oiseau »

Un autre outil de laboratoire a remplacé la conception de Meyer. C'est l'élément en « cage d'oiseau » proposé par Evans et Burns. Les contraintes induites de résistances provoquées par le temps et la température sont ainsi réduites au minimum et la « cage d'oiseau » devint la norme de laboratoire. Sa structure fragile et sa sensibilité aux vibrations ne la destine pas aux environnements industriels.



RTD hélicoïdale



RTD haute température



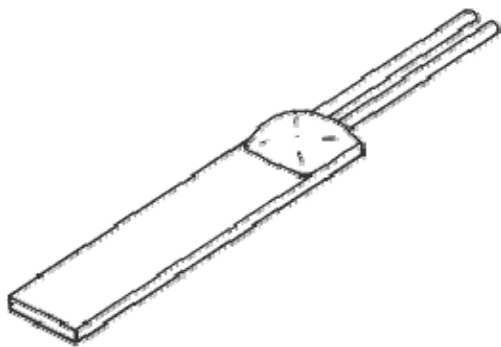
RTD industrielle

Des techniques de construction plus solides sont montrées par les figures ci-contre et ci-dessus : un fil de platine bifilaire est enroulé sur une bobine de verre ou de céramique. L'enroulement bifilaire réduit l'induction magnétique et son bruit relatif. Une fois que le fil est enroulé sur la bobine, l'ensemble est alors scellé avec du verre fondu.

À moins que les coefficients de dilatation du platine et de la bobine s'assortissent parfaitement, la dilatation du fil aura pour résultat un changement de résistance, avec pour conséquence un changement permanent possible de la résistance du fil.

Il existe des versions de RTD qui offrent un compromis entre la cage d'oiseau et la spirale scellée. Une telle approche emploie une spirale de platine hélicoïdale enroulée sur un cylindre en céramique et maintenue par l'intermédiaire de verre fritté.

RTD à film métallique



RTD à film métallique

Les techniques de fabrication modernes utilisent un film de platine ou métallique déposé sur un substrat plat de céramique gravé à l'eau-forte, ajusté par laser et scellé. Le film RTD offre la réduction substantielle du délai d'assemblage et a l'avantage d'une valeur de résistance accrue pour une taille donnée. En raison de la technologie de fabrication, la taille des dispositifs est petite, avec une inertie thermique faible ; ils peuvent répondre rapidement aux changements de température.



RTD flexible

Les RTD à film sont un peu moins stables que les RTD filaires mais, en contrepartie, leurs avantages de taille, de coût de production et facilité d'utilisation font qu'elles sont très largement employées.

Métaux

Tous les métaux produisent un changement positif de résistance pour un changement positif de la température. Ce qui est la fonction principale d'une RTD. L'erreur du système est réduite au minimum quand la valeur nominale de la résistance de RTD est grande ; ceci implique un fil métallique avec une résistivité élevée.

Résistivité des métaux des RTD

Métal	Symbole	Résistivité $\Omega \cdot \text{cm/f}$	Résistivité $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	Résistivité siemens
Or	Au	13	$2,1612e^{-2}$	$4,6272e^{+7}$
Argent	Ag	8,8	$1,4629e^{-2}$	$6,8356e^{+7}$
Cuivre	Cu	9,26	$1,5394e^{-2}$	$6,496e^{+7}$
Platine	Pt	59	$9,8083e^{-2}$	$1,0195e^{+7}$
Tungstène	W	30	$4,9873e^{-2}$	$2,0051e^{+7}$
Nickel	Ni	36	$5,9847e^{-2}$	$1,6709e^{+7}$

En raison de leurs faibles résistivités, l'or et l'argent sont rarement employés comme éléments de RTD.

Le tungstène a une résistivité relativement élevée, mais est réservé pour des applications à très hautes températures parce qu'il est extrêmement fragile et difficile à travailler.

Le cuivre est employé de temps en temps comme élément de RTD, sa basse résistivité nécessite une plus grande longueur qu'un élément de platine, mais sa linéarité et son prix réduit en font une alternative économique. Sa limite supérieure de température est seulement d'environ 120 °C.

Les RTD les plus communes sont faites de platine, nickel, ou alliages de nickel. Les fils en alliage de nickel sont économiques et employés sur une gamme de température limitée, mais ils sont non linéaires et tendent à dériver avec le temps.

Pour l'intégrité des mesures, le platine est le choix évident.

RTD - VALEURS DE LA RÉSISTANCE

Les valeurs communes des résistances des RTD s'étendent de 10 ohms pour le modèle *cage d'oiseau* à plusieurs milliers ohms pour les RTD à film métallique. La valeur la plus commune est de 100 ohms à 0 °C (*Nommée Pt 100*).

Coefficient de température

Le coefficient de température normalisé DIN 43760 du fil de platine est : $\alpha = 0.00385$. Pour une résistance de 100 ohms à 0 °C, ceci correspond à +0,385 ohm par °C (α européen) qui est la pente moyenne de 0°C à 100°C. Il existe une grande variété de RTD qui ont des coefficients α différents et des valeurs ohmiques à 0°C précisés dans leurs caractéristiques techniques. La RTD la plus utilisée est celle ayant un coefficient α de 0.00385 et une valeur ohmique à 0°C de 100 Ω . Elle est dénommée **Pt100** et c'est elle qui sera l'objet de toutes les explications et calculs de ces pages.

Valeurs de quelques RTD

R à 0°C (Ω)	α (Ω/Ω°C)	Sensibilité (Ω°C)
25.5	0.00392	0.1
100	0.00392	0.392
100	0.00391	0.391
100	0.00385	0.385
200	0.00385	0.770
470	0.00392	1.845
500	0.00392	1.963
500	0.00391	1.955
500	0.00385	1.925
1000	0.00385	3.850
1000	0.00375	3.750
10000	0.00385	38.50

Standards internationaux DIN 43760 (IEC 751, BS-1904, JIS C1604)

Paramètre	Class A	Class B
R ₀	100Ω ± 0,06%	100Ω ± 0,12%
Alpha, α	0,00385 ± 0,000063	0,00385 ± 0,000063
Plage	-200°C à 650°C	-200°C à 850°C
Res, R _T	± (.06+.0008 T -2e ⁻⁷ T ²)	± (.12+.0019 T -6e ⁻⁷ T ²)
Temp, T	± (0.3+0.002 T)°C	± (0.3+0.005 T)°C

Mesure de la résistance

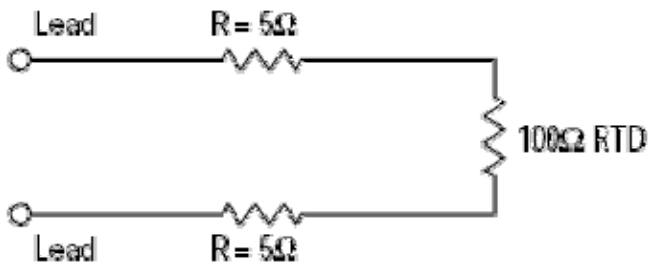


Figure 38 - Impédance de ligne

La pente et la valeur absolue sont de petits nombres, particulièrement quand nous considérons le fait que les fils de mesure reliés à la sonde peuvent être de plusieurs ohms ou même dizaines d'ohms. Une petite impédance de fil peut contribuer à une erreur significative de notre mesure de la température (figure 38). Une impédance de fil de 10 ohms implique une erreur de 10/0,385 soit environ 26°C dans ce cas.

Pont de Wheatstone

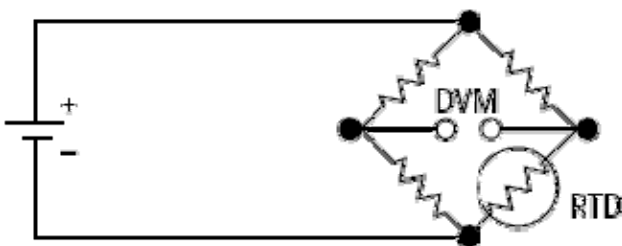


Figure 39 - Mesure par pont de Wheatstone

Une des méthodes pour éviter ce problème est l'utilisation d'un moyen de mesure en pont (figure 39).

La mesure par un pont, ici un **pont de Wheatstone**, est une indication indirecte de la résistance de la RTD. Le pont nécessite quatre fils de raccordement, une source extérieure, et trois résistances qui ont un coefficient de température nul.

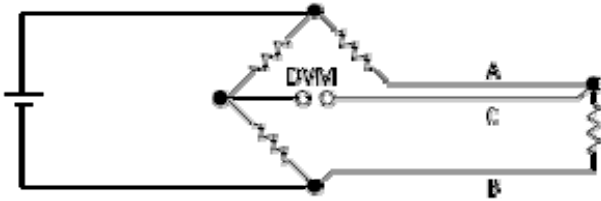
Pont avec trois fils



Figure 40 - Mesure par pont en extension

Pour éviter de soumettre les trois résistances du pont à la même température que la RTD, on sépare celle-ci du pont par une paire de fils de liaison (figure 40)

Ces fils recréent le problème que nous avons eu précédemment : L'impédance des fils de liaison affecte la lecture de la température.

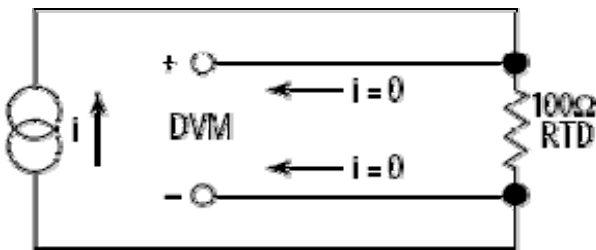


Cet effet peut être réduit au minimum en employant une configuration de pont en trois fils (figure 41). Si les fils A et B sont de la même longueur, leurs effets d'impédance s'annuleront parce que chacun est dans une partie opposée du pont. Le troisième fil, C, agit comme mesure dans lequel il ne circule aucun courant.

Figure 41 - Mesure par pont 3 fils

Le pont de Wheatstone représenté sur la figure 41 crée un rapport non linéaire entre le changement de résistance et le changement de tension de mesure du pont. Ceci nécessite une équation additionnelle pour convertir la tension de mesure du pont en impédance équivalente de RTD.

Mesure en 4 fils



La meilleure technique est d'utiliser une source de courant connu et de mesurer, à distance, la tension au bornes de la RTD. Comme aucun courant ne circule dans les fils de mesure de tension, il n'y a aucune chute de tension et, donc, aucune erreur de mesure de résistance. La tension lue sur le voltmètre est directement proportionnelle à la valeur de la résistance de la RTD.

Figure 42 - Mesure en 4 fils

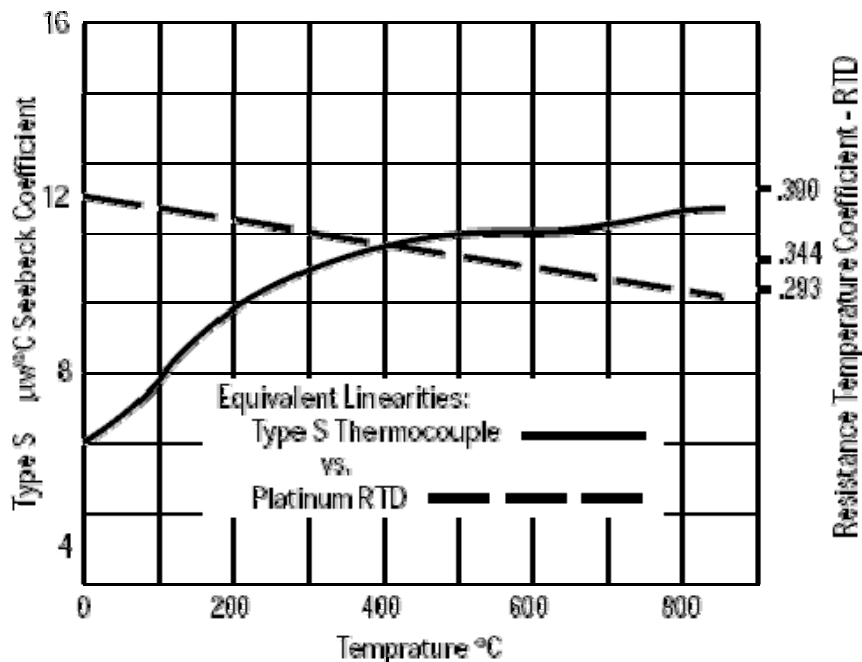
Les trois résistances du pont sont remplacées par une résistance de référence permettant de connaître avec précision le courant généré (figure 42). L'inconvénient est de nécessiter un fil de plus que le pont à 3 fils. C'est un petit prix à payer pour obtenir avec exactitude la mesure de la résistance.

Les fils de génération de courant se nomment « **source** » et ceux de mesure de tension « **sense** »

Erreurs

Bien qu'étant d'une excellente précision, la mesure de résistance en 4 fils, comme toute mesure, sera toujours affectée d'erreurs et le résultat sera entaché d'incertitudes qu'il faudra minimiser en prenant toutes les précautions nécessaires. **Voir Annexe 4 : Généralités sur les mesures**

CALCUL DE LA TEMPÉRATURE



Les capteurs Pt100 (platine 100 Ω (PRTD)) sont beaucoup plus linéaires que les thermocouples et, **dans des cas de plages et de précision limités**, on peut considérer qu'ils sont linéaires.

Calcul « linéaire »

L'équation de calcul « linéaire » de la résistance d'une sonde Pt100 en fonction de la température est :
avec R_t = résistance à $t^\circ\text{C}$, R_0 = résistance à 0°C (100 Ω), α = coefficient de température de la sonde ($0,00385\Omega/\Omega^\circ\text{C}$) et T = la température en $^\circ\text{C}$.

$$R_t = R_0(1 + \alpha.T)$$

On en déduit l'équation inverse de calcul de la température à partir de la valeur de la résistance de la sonde :

$$T = \frac{\frac{R_t}{R_0} - 1}{\alpha}$$

Température à partir de la résistance

Résistance (Ω)	Équation linéaire (°C)	Table par interpolation (°C)	Écart (%)
10.00	-233.77	-219.41	6.54
15.00	-220.78	-207.96	6.16
20.00	-207.79	-196.51	5.74
25.00	-194.81	-184.87	5.37
30.00	-181.82	-173.12	5.03
50.00	-129.87	-125.12	3.79
75.00	-64.94	-63.34	2.52
100.00	0.00	0.00	
102.00	5.19	5.12	1.41
103.00	7.79	7.69	1.38
107.79	20.23	19.99	1.20
115.54	40.36	40.00	0.90
120.00	51.95	51.57	0.73
123.24	60.36	60.00	0.60
130.90	80.26	80.02	0.30
150.00	129.87	130.47	-0.46
175.00	194.81	197.72	-1.47
200.00	259.74	266.42	-2.51
210.00	285.71	294.33	-2.93
220.00	311.69	322.50	-3.35
250.00	389.61	408.63	-4.66
275.00	454.55	482.34	-5.76
300.00	519.48	557.99	-6.90
310.00	545.45	588.83	-7.37
399.00	776.62	880.11	-11.76

Sur la table ci-contre, on peut voir les écarts entre les valeurs de température calculées « linéairement » à partir du coefficient α Européen de $0,00385 \Omega/\Omega^\circ\text{C}$ et les valeurs calculées par interpolation de second ordre à partir d'une table Température versus Résistance (Erreur maximum $\pm 0,003^\circ\text{C}$).

L'écart est de moins de 2% entre 0 et 180°C . En dehors de cette plage, les écarts deviennent prohibitifs pour un dispositif censé avoir une précision meilleure que 0,1%.

La procédure de calcul par interpolation de second ordre sera vue plus loin.

Équation de Callendar-Van Dusen

La relation entre la température et la valeur ohmique des RTD a été calculée par Callendar puis, plus tard, affinée par Van Dusen ; c'est pourquoi cette équation est nommée **Callendar-Van Dusen (CVD)**.

$$R_T = R_0 + R_0 \cdot \alpha \left[T - \delta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T}{100} \right) - \beta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T^3}{100} \right) \right]$$

Avec $R_T =$ résistance à $T^\circ\text{C}$, $R_0 =$ résistance à 0°C , $\alpha =$ coefficient de température à 0°C en $\Omega/\Omega^\circ\text{C}$, $\delta =$ coefficient de linéarisation, $\beta =$ deuxième coefficient de linéarisation pour les valeurs négatives de température ($\beta = 0$ pour $T > 0^\circ\text{C}$).

Cette équation a été transformée pour pouvoir être utilisée plus facilement avec les coefficients A, B et C donnée par la norme DIN 43760 (IEC 751) et les fiches techniques des composants.

$$R_t = R_0 \left\{ 1 + At + Bt^2 - C(t - 100)t^3 \right\}$$

Avec les conversions suivantes

$$A = \alpha + \frac{\alpha \cdot \delta}{100} \quad B = -\frac{\alpha - \delta}{100^2} \quad C = -\frac{\alpha - \beta}{100^4}$$

Coefficients pour différents α

Coefficient	Valeur	Valeur	Valeur
α	0,003850	0,003926	0,003911
δ	1,4999		
β	0,10863		
A	$3,9083e^{-3}$	$3,9848e^{-3}$	$3,9692e^{-3}$
B	$-5,775e^{-7}$	$-5,870e^{-7}$	$-5,8495e^{-7}$
C	$-4,18301e^{-12}$	$-4,000e^{-12}$	$-4,2325e^{-12}$

Ces trois valeurs α représentent les trois principales spécifications pour les RTD

- 0,003850 $\Omega/\Omega^\circ\text{C}$: Normalisation DIN 43760, IEC 751 et autres spécifications internationales, nommé *Standard Européen*.
- 0,003926 $\Omega/\Omega^\circ\text{C}$: Nécessite un platine pur à 99,999% ou mieux, nommé *Standard Américain*.
- 0,3911 $\Omega/\Omega^\circ\text{C}$: Souvent nommé *Standard Industriel U.S.*

L'équation CVD permet une bonne linéarisation des RTD, $\pm 0.01^\circ\text{C}$ entre -100°C et $+100^\circ\text{C}$ mais l'erreur augmente rapidement avec les hautes températures. De plus, cette équation calcule la résistance en fonction de la température ; ce qui est l'inverse des utilisations les plus courantes : température en fonction de la résistance.

Pour convertir la valeur de résistance de la RTD en température, on est obligé d'utiliser une équation quadratique du 2e degré, qui est, en quelque sorte, la réciproque de l'équation CVD, **mais uniquement pour les températures supérieures à 0°C** .

$$t = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4B \left(1 - \frac{R_t}{R_0} \right)}}{2B}$$

Pour les températures inférieures à 0°C , l'équation CVD est trop complexe à résoudre, aussi l'emploi des approximations successives s'impose :

$$\text{Valeur initiale : } t_1 = \frac{R_t/R_0 - 1}{A + 100B} \quad \text{puis } t_n = t_n - \frac{1 + At_n + Bt_n^2 + Ct_n^3(t_n - 100) - R_t/R_0}{A + 2Bt_n - 300Ct_n^2 + 4Ct_n^3}$$

Reprenons les mêmes valeurs que dans la table précédente, et la comparaison avec l'équation CVD

Température à partir de la résistance					
Résistance (Ω)	Éq. Linéaire (°C)	Écart (%)	Éq. CVD (°C)	Écart (%)	Table par interpolation (°C)
10.00	-233.77	6.541	-219.539	0.056	-219.415
15.00	-220.78	6.163	-208.114	0.073	-207.962
20.00	-207.79	5.742	-196.572	0.032	-196.509
25.00	-194.81	5.372	-184.918	0.024	-184.874
30.00	-181.82	5.026	-173.158	0.023	-173.118
50.00	-129.87	3.795	-125.146	0.019	-125.122
75.00	-64.94	2.525	-63.329	-0.010	-63.336
100.00	0.00		0.000		0.000
102.00	5.19	1.414	5.121	-0.024	5.122
103.00	7.79	1.377	7.685	-0.022	7.686
107.79	20.23	1.202	19.991	-0.012	19.993
115.54	40.36	0.905	39.998	-0.009	40.002
120.00	51.95	0.731	51.566	-0.010	51.571
123.24	60.36	0.604	59.995	-0.011	60.001
130.90	80.26	0.302	80.008	-0.012	80.018
150.00	129.87	-0.459	130.447	-0.017	130.469
175.00	194.81	-1.472	197.673	-0.021	197.715
200.00	259.74	-2.507	266.348	-0.027	266.419
210.00	285.71	-2.927	294.246	-0.029	294.330
220.00	311.69	-3.352	322.397	-0.031	322.498
250.00	389.61	-4.656	408.450	-0.045	408.635
275.00	454.55	-5.762	482.109	-0.048	482.339
300.00	519.48	-6.902	557.688	-0.055	557.993
310.00	545.45	-7.367	588.491	-0.058	588.831
399.00	776.62	-11.759	879.278	-0.095	880.113

On peut voir que les écarts de l'équation CVD sont limités et situés aux environs de 0,05% et de 0,1% pour les hautes températures.

Conversion par interpolation dans une table

Néanmoins et moyennant peu de calculs et peu de données, on peut convertir les valeurs de résistance des RTD (Pt100 DIN 43760 $\alpha = 0,00385$) en température à mieux que $\pm 0,003$ °C.

Pour ce faire, on va utiliser une table comportant 40 valeurs, indexée de 1 à 40, le numéro d'index donnant la valeur ohmique, divisée par 10, de la RTD et le contenu la valeur de température associée.

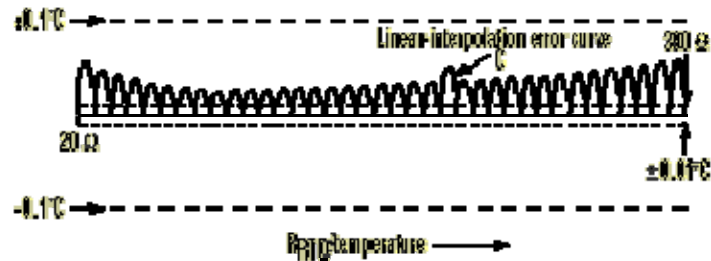
Pour faciliter les explications, cette table sera dénommé \$ta et ses éléments \$ta[1] à \$ta[40] ; la valeur ohmique de la RTD sera nommée \$rtd et toutes les variables de l'algorithme seront préfixées par « \$ » comme en PHP.

Table RTD pour interpolation					
Index	R _{RTD} (Ω)	T °C	Index	R _{RTD} (Ω)	T °C
1	10	-219,415	21	210	294,330
2	20	-196,509	22	220	322,498
3	30	-173,118	23	230	350,928
4	40	-149,304	24	240	379,628
5	50	-125,122	25	250	408,635
6	60	-100,617	26	260	437,889
7	70	-75,827	27	270	467,445
8	80	-50,781	28	280	497,309
9	90	-25,501	29	290	527,489
10	100	0,000	30	300	557,993
11	110	25,686	31	310	588,831
12	120	51,571	32	320	620,014
13	130	77,660	33	330	651,554
14	140	103,958	34	340	683,464
15	150	130,469	35	350	715,758
16	160	157,198	36	360	748,453
17	170	184,152	37	370	781,564
18	180	211,336	38	380	815,110
19	190	238,756	39	390	849,109
20	200	266,419	40	400	883,582

Algorithme de premier ordre

```

$interp = $rtd/10
$sint = partie entière de $interp
$frac = $interp - $sint
$a = $ta[$sint]
$b = $ta[$sint + 1]
$Temperature = $a + $frac*($b-$a)
    
```



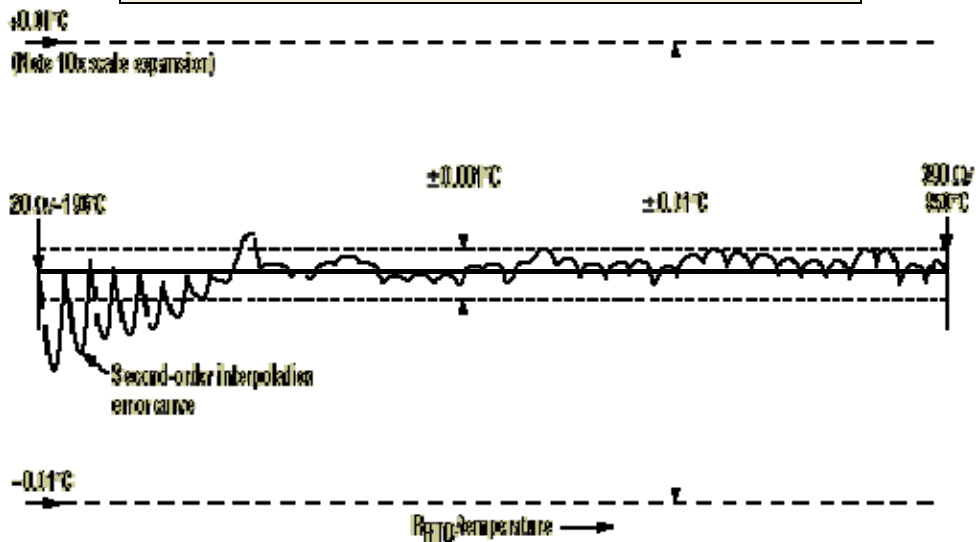
Écarts d'interpolation de 1er ordre

Avec cet algorithme d'interpolation du premier ordre, on obtient une précision de 0,05 °C sur toute la gamme de -200°C à +880°C. Si cette précision est insuffisante, on peut utiliser l'algorithme d'interpolation de second ordre ci-dessous :

Algorithme de second ordre

```

$interp = $rtd/10
$sint = partie entière de $interp
$frac = $interp - $sint
$a = $ta[$sint]
$b = $ta[$sint + 1]/2
$c = $ta[$sint - 1]/2
$Temperature = $a + $frac*($b-$c + $frac*( $c+$b-$a))
    
```



Écarts d'interpolation de 2e ordre

Avec l'algorithme d'interpolation de second ordre, la précision est de 0,003 °C, avec, vu le calcul de \$c, une limitation inférieure à 20 Ω. La limite supérieure, dans les deux algorithmes, étant de 399 Ω

ERREURS POSSIBLES ET PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Erreurs

Les systèmes de thermomètre à résistance sont sensibles à trois types d'erreurs :

- Les tolérances inhérentes à la résistance elle-même,
- Les gradients de température entre le thermomètre et le milieu à mesurer,
- Les erreurs et défauts présents dans la liaison entre la sonde et l'instrument de mesure.

Quelques sources d'erreur sont électriques ; d'autres résultent de la construction mécanique du thermomètre. Les sources d'erreur potentielles incluent l'interchangabilité et la conformité :

La conformité indique de quelle quantité il est permis de dévier de la courbe standard. La conformité a deux composantes : une tolérance à la température de référence, habituellement 0°C, et une tolérance sur la pente.

Ces écarts possibles sont définis par la normalisation. Par exemple, le norme DIN 43760 classe B, exige le calibrage à moins de $0,12\Omega$ ($0,3^\circ\text{C}$) à 0°C, mais permet à la courbe de s'écarter du nominal $0,00385$ de $\pm 0,000012 \Omega/\Omega/^\circ\text{C}$. Ceci peut donner des écarts de $0,8^\circ\text{C}$ à 100°C , $1,3^\circ\text{C}$ à 200°C , et jusqu'à $3,8^\circ\text{C}$ à 700°C .

Il est donc important de connaître, avec précision, les tolérances du moyen utilisé.

Auto-chauffage (Self-heating)

Un thermomètre à résistance est une sonde passive, il nécessite le passage d'un courant de mesure de produire un signal utile. Ce courant de mesure chauffe l'élément et élève sa température, des erreurs en résulteront à moins que la chaleur supplémentaire ne soit absorbée.

L'auto-chauffage est exprimé en $\text{mW}/^\circ\text{C}$, qui est la puissance en milliwatts ($1000 \cdot \text{RI}^2$) qui élève la température interne de la sonde de 1°C . Plus le nombre de $\text{mW}/^\circ\text{C}$ est élevé, moins le phénomène est important.

Comme exemple, supposons un courant de mesure de 5 mA à travers des sonde Pt100 dans une ambiance à 100°C . Les spécifications indiquent $50 \text{ mW}/^\circ\text{C}$ dans l'eau se déplaçant à 1 m/sec. La quantité de la chaleur produite est : $1000 \text{ mW} * (0,005 \text{ A})^2 * (138,5\Omega) = 3,5 \text{ mW}$; l'erreur d'auto-chauffage est : $(3,5 \text{ mW})/(50 \text{ mW}/^\circ\text{C}) = 0,07^\circ\text{C}$.

Les moyens de mesure modernes utilisent des courants de mesure très faibles, de l'ordre de $100\mu\text{A}$ et même moins. Ce qui, dans le cas précédent, donnerait une erreur d'élévation de température de seulement $(0,00138 \text{ mW})/(50 \text{ mW}/^\circ\text{C}) = 0,000027^\circ\text{C}$, ce qui est négligeable.

L'erreur résultante est inversement proportionnelle à la capacité du thermomètre d'évacuer la chaleur supplémentaire ; ce qui dépend des matériaux, de la construction, et de l'environnement de thermomètre.

Le plus mauvais cas se produit quand une résistance de valeur élevée est dans un petit corps. Les RTD film, avec peu de superficie pour absorber la chaleur, en sont un exemple. L'auto-chauffage dépend également du milieu dans lequel le thermomètre est immergé. L'erreur dans l'air immobile peut être 100 fois plus grande que dans l'eau en mouvement.

Vitesse de réponse

Une constante de temps indique la réponse d'un thermomètre à résistance au changement de température. Une expression commune est le temps que met un thermomètre pour refléter 63,2% d'un échelon de température l'eau en mouvement.

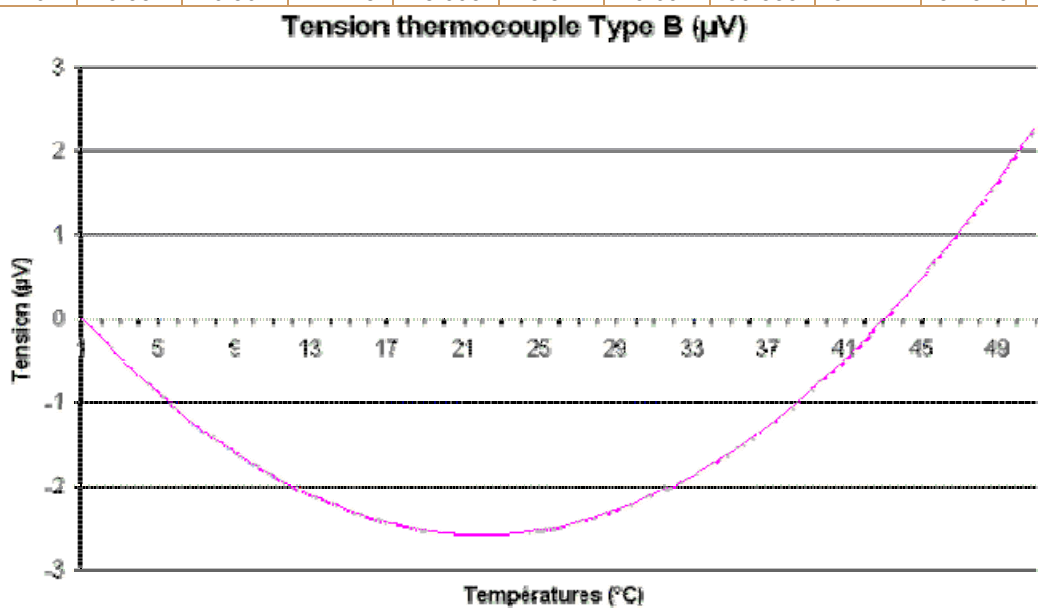
La vitesse de réponse dépend de la masse du thermomètre et du taux des transferts thermiques entre la surface externe de l'élément et le milieu dans lequel il est plongé. Une petite constante de temps réduit les erreurs dans un système sujet aux changements rapides de température.

CONVERSIONS TEMPÉRATURE <> TENSION (ANNEXE 1)
THERMOCOUPLE TYPE B DE 0 100 °C

Table ITS-90 pour Thermocouple de Type B											
Tension thermoélectrique en mV (millivolts)											
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.002
10	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003
20	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002
30	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.000
40	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002
50	0.002	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004	0.005	0.005	0.006	0.006
60	0.006	0.007	0.007	0.008	0.008	0.009	0.009	0.010	0.010	0.011	0.011
70	0.011	0.012	0.012	0.013	0.014	0.014	0.015	0.015	0.016	0.017	0.017
80	0.017	0.018	0.019	0.020	0.020	0.021	0.022	0.022	0.023	0.024	0.025
90	0.025	0.026	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	0.031	0.032	0.033

La table ITS-90 n'a qu'une résolution de 0.001 mV, d'où les incertitudes dans les conversions tension thermoélectrique vers température entre 0 et 100 °C pour les thermocouples de type B pour lesquels -0.001 mV peut aussi bien indiquer de 3 à 7 °C que de 35 à 39 °C, et -0.002 mV peut aussi bien indiquer de 8 à 17 °C que de 25 à 34 °C.

Par équation (Méthode de Horner) Type B - Tension en µV (microvolts)											
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0.000	-0.241	-0.469	-0.686	-0.892	-1.085	-1.267	-1.437	-1.595	-1.741	-1.876
10	-1.876	-1.999	-2.110	-2.210	-2.298	-2.374	-2.438	-2.491	-2.532	-2.561	-2.579
20	-2.579	-2.585	-2.579	-2.562	-2.533	-2.493	-2.441	-2.377	-2.302	-2.215	-2.116
30	-2.116	-2.006	-1.884	-1.751	-1.606	-1.450	-1.282	-1.103	-0.911	-0.709	-0.495
40	-0.495	-0.269	-0.032	0.216	0.477	0.748	1.031	1.326	1.632	1.949	2.278
50	2.278	2.619	2.971	3.334	3.709	4.095	4.492	4.901	5.322	5.753	6.197
60	6.197	6.651	7.117	7.595	8.083	8.584	9.095	9.618	10.152	10.697	11.254
70	11.254	11.823	12.402	12.993	13.595	14.208	14.833	15.469	16.117	16.775	17.445
80	17.445	18.126	18.819	19.523	20.238	20.964	21.701	22.450	23.210	23.981	24.764
90	24.764	25.557	26.362	27.178	28.005	28.844	29.694	30.555	31.427	32.310	33.204

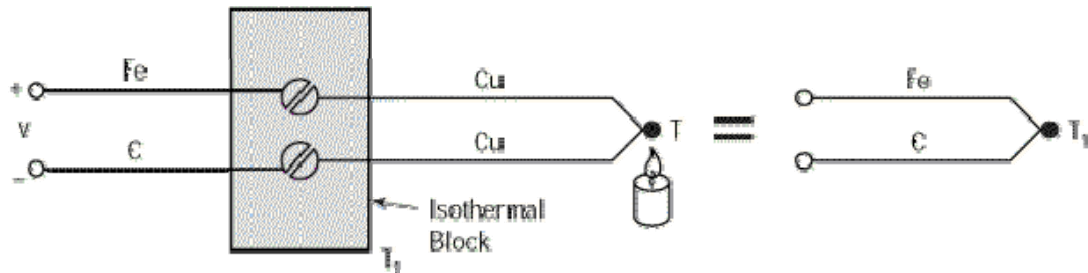


L'équation est plus précise mais, sans pouvoir lever certaines ambiguïtés comme on peut le constater sur la courbe ci-dessus. Pour les conversions, on se limitera donc à une température ≥ 50 °C ou à une tension ≥ 0.029 mV.

LOIS EMPIRIQUES (ANNEXE 2)

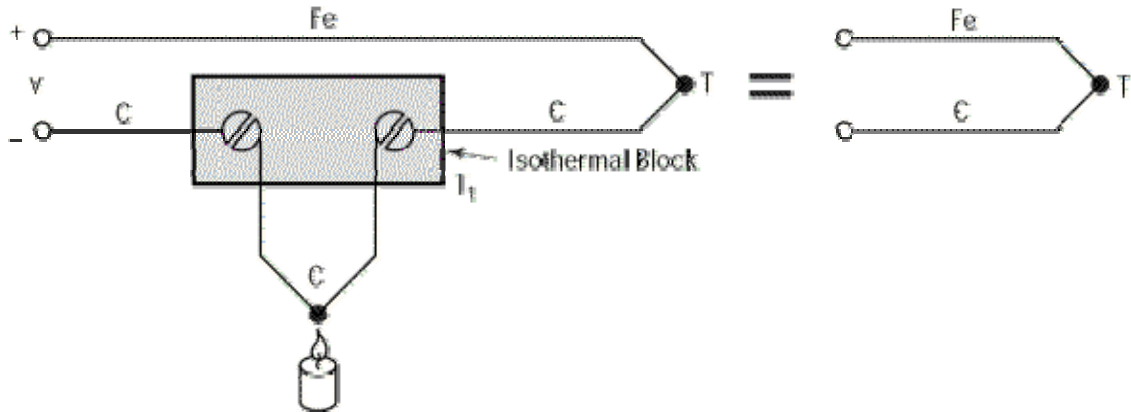
Empirique : qui est fondé sur l'observation, sur l'expérience personnelle, et non sur une théorie établie ; qui s'adapte à la situation présente.

Loi du métal intermédiaire



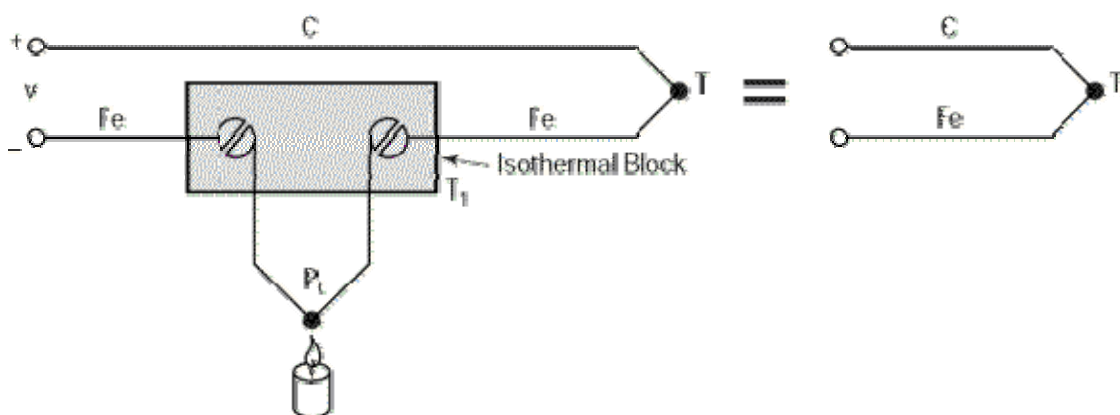
L'insertion d'un métal intermédiaire entre les deux métaux d'un thermocouple ne modifie pas la tension V , quelle que soit la température de ce métal intermédiaire. Dans le circuit montré ci-dessus, la tension V est celle d'un thermocouple Fer/Constantan à la température T_1

Loi des températures internes



Quelle que soit la température appliquée sur un des fils de mesure du thermocouple, la tension V ne sera pas modifiée. Dans le circuit montré ci-dessus, la tension V est celle d'un thermocouple Fer/Constantan à la température T

Loi du métal inséré



Quel que soit le métal inséré dans un des fils de mesure du thermocouple et quelle que soit la température de ce métal, la tension V ne sera pas modifiée. Dans le circuit montré ci-dessus, la tension V est celle d'un thermocouple Fer/Constantan à la température T .

Pour que les trois lois empiriques ci-dessus soient applicables, il est impératif que les deux jonctions du métal inséré dans le circuit du thermocouple original soient à la même température.

LES THERMOCOUPLES : IL Y A UN SIÈCLE ET PLUS (ANNEXE 3)

Au XIXe siècle, les thermocouples n'étaient pas nommés ainsi et on pouvait les découvrir sous le mot **Pile**, à la rubrique *Pile thermoélectrique*.

Grand Dictionnaire Universel du XIXe siècle de Pierre Larousse.

Piles thermo-électriques

C'est à Seebeck, professeur de physique à Berlin, qu'on doit la découverte, en 1821, de la production d'électricité qui accompagne toute transmission de chaleur, par conductibilité, dans l'intérieur d'un solide. On vérifie le fait au moyen d'un circuit formé de deux lames de cuivre et de bismuth, soudées ensemble et recourbées de manière à laisser entre elles un espace vide dans lequel on puisse loger une aiguille aimantée, portée sur son pivot. Si l'on chauffe l'une des soudures, l'aiguille est déviée dans un sens qui indique le passage d'un courant de la soudure chaude à la soudure froide dans le cuivre, ou de la soudure froide à la soudure chaude dans le bismuth. Si l'on refroidit la même soudure qu'on avait échauffée, le courant se produit encore, mais le sens indiqué par la déviation de l'aiguille est renversé.

La première pile thermo-électrique a été construite par Oersted et Fourier. Elle se composait d'un petit nombre de barreaux de bismuth et d'antimoine alternés et soudés les uns aux autres en cercle. Les points de soudure étaient de deux en deux portés à une température de 200° à 300°, au moyen de petites lampes, et maintenus à 0° à l'aide de bains de glace fondante.

La pile thermo-électrique, telle qu'on l'emploie aujourd'hui et qui a rendu tant de services entre les mains de Melloni (Physicien italien 1801-1853), a été construite par Nobili. Elle se compose d'une série de couches de barreaux d'antimoine et de bismuth, soudés les uns aux autres et recourbés aux points de jonction, le dernier barreau de bismuth de la première couche se reliant au premier barreau d'antimoine de la seconde couche, et ainsi de suite. Cet ensemble de couches forme habituellement un cube renfermé dans un étui en cuivre, de manière que les soudures seules apparaissent au dehors. Les diverses couches de barreaux sont isolées les unes des autres au moyen de feuilles interposées de papier enduit de cire. Deux tiges communiquant avec le premier antimoine et le dernier bismuth forment les pôles de la pile, que l'on réunit par un circuit métallique. Pour déterminer la naissance du courant, il suffit d'exposer à l'influence d'une source de chaleur les points de soudure qui forment une même face de l'appareil, les autres conservant la température ambiante. Pour constater l'existence du courant, on interpose dans le circuit un galvanomètre multiplicateur ; mais ce galvanomètre doit différer sous un rapport de celui qu'on emploie pour la mesure des intensités des courants dus aux actions chimiques ; le fil, au lieu d'être fin et de fournir un grand nombre de tours, doit être assez gros et le nombre de ses tours ne doit pas dépasser 300. La sensibilité de la pile thermo-électrique est telle qu'à la distance de 1 mètre, la chaleur de la main suffit pour développer un courant accusé par une déviation sensible de l'aiguille aimantée.

Thermo-Multiplicateur

Instrument qui rend sensibles de très petites quantités de chaleur.

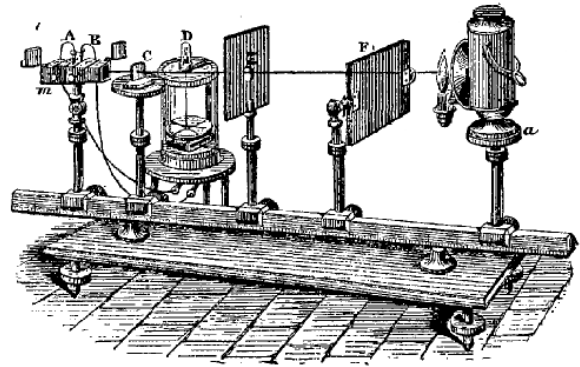
Seebeck, de Berlin, a découvert, en 1821, que la chaleur peut développer des courants électriques dans des circuits formés de substances métalliques différentes, soudées les unes aux autres. Les courants ainsi formés dévient de sa direction normale une aiguille aimantée, librement suspendue. On peut donc concevoir la possibilité de construire un appareil au moyen duquel la présence et l'intensité de la chaleur seront accusées par les déviations de l'aiguille aimantée.

La création de cet appareil est due à Becquerel ; mais l'idée première en appartient à Nobili, qui perfectionna la pile thermo-électrique, dans laquelle des courants sont engendrés par réchauffement de la moitié des points de soudure de plusieurs barreaux d'antimoine et de bismuth. En associant cette pile avec le galvanomètre, Melloni obtint un appareil thermométrique d'une extrême sensibilité, auquel il donna le nom de thermo-multiplicateur, et dont voici la description, qui sera facile à comprendre, si l'on connaît celle des deux instruments que nous venons de rappeler.

Sur une tablette de bois, supportée par quatre vis calantes, est fixée de champ une règle de cuivre divisée en centimètres.

Sur cette règle glissent divers supports que l'on fixe où l'on veut par des vis de pression. A ces supports, dont le nombre peut d'ailleurs être augmenté ou diminué selon les besoins de l'expérience, sont attachées les principales pièces de l'appareil, savoir :

- une source calorifique *a* ;
- l'écran *F* formé par une double lame de laiton que l'on peut élever ou abaisser autour d'une charnière horizontale ;
- un écran limitateur *E*, percé d'orifices plus ou moins larges, destinés à restreindre l'étendue du faisceau calorifique ;
- le corps *c* sur lequel on observe les effets de la chaleur rayonnante,
- et enfin la pile thermo-électrique *m*.



La face de cette pile destinée à recevoir la chaleur incidente est munie d'un cône métallique, poli à l'intérieur, dont l'ouverture est tournée du côté de la source calorifique. Près de là est un galvanomètre *D*, muni d'un fil court et gros, qui vient communiquer en *A* et en *B* avec les deux pôles de la pile.

Cet appareil est tellement sensible, que l'aiguille du galvanomètre dévie par l'effet de la chaleur naturelle d'une personne placée à 10 mètres de la pile. Nobili et Melloni, en plaçant sur le support *a* diverses sources calorifiques, ont constaté des résultats inattendus. Ils ont mesuré la chaleur dégagée par des corps d'insectes, par la lueur du phosphore, par les rayons de la lune, etc. Mais la présence trop rapprochée de l'observateur, ou l'existence d'un foyer même éloigné, ou le rayonnement des parois de la salle, peuvent avoir sur l'appareil une influence qui, s'il n'en était pas tenu compte, fausserait les résultats. On doit donc se tenir loin de l'instrument, supprimer toute cause extérieure de réchauffement ou de refroidissement, envelopper la pile tout entière et le galvanomètre dans une tente en toile, sur laquelle on ne laissera que les ouvertures strictement nécessaires pour la manœuvre, et l'on évitera de jamais toucher avec la main une des pièces voisines de la pile.

Un pareil instrument est difficile à graduer. Il y a déviation de l'aiguille du galvanomètre chaque fois qu'il y a différence de température entre les deux faces de la pile, et le sens de la déviation varie suivant celle des deux faces qui est la plus chaude. Si, par exemple, la face antérieure est plus chaude que la face postérieure, l'aiguille marchera de gauche à droite ; elle se dirigera au contraire de droite à gauche, si la face postérieure est plus chaude que l'antérieure. Dans ce dernier cas, le corps dont on évalue la température rayonne du froid, puisqu'il refroidit la pile. Au sens du mouvement de l'aiguille, on reconnaît donc, non pas si la température de la source calorifique, placée en *a*, est au-dessus ou au-dessous de zéro, mais seulement si elle est supérieure ou inférieure à celle du milieu ambiant. On voit déjà par là qu'il sera impossible de rapporter les indications du thermo-multiplicateur à celles d'un thermomètre ordinaire. Comme il est impossible que deux thermo multiplicateurs soient identiques dans toutes leurs parties, substances et dimensions, il est impossible aussi qu'ils fournissent, dans une même expérience, des indications absolument concordantes. La graduation de l'un ne peut donc pas être comparée à celle de l'autre ; c'est dire que chaque appareil doit avoir une graduation particulière. Ce n'est pas tout : dans chaque thermo-multiplicateur, les déviations de l'aiguille ne sont pas, en général, proportionnelles aux effets calorifiques constatés. Lors donc que l'on veut évaluer ces effets, on est obligé, au préalable, de construire une table, spéciale à chaque appareil, donnant l'intensité de la chaleur correspondante à chaque déviation.

Pour dresser une table de cette nature, Melloni employait deux moyens. Voici le plus simple. On admet, d'après l'expérience, que les déviations de l'aiguille du galvanomètre sont proportionnelles aux intensités de chaleur constatées, jusqu'à 20°. Cela posé, on fait agir sur la pile une source de chaleur qui produit une faible déviation, par exemple, de 10°. On interpose ensuite une lame de verre, qui intercepte une partie de la chaleur ; la déviation est aussitôt diminuée, et n'est plus, par exemple, que de 5°. On en conclut qu'en toute circonstance la lame intercepte la moitié de la chaleur produite, donc le degré réel de chaleur est le double de celui qui est accusé par l'interposition de la lame. Supposons que la source de chaleur donne une déviation de 30°. On interpose la lame, et la déviation, au lieu d'être de 15°, est de 17,6°. On en conclut que le degré réel de chaleur émanée de la source calorifique est le double de 17,6°, ou 35,2°. Par conséquent, sur la table, on aura deux colonnes, l'une pour les déviations marquées, l'autre pour les déviations vraies. Dans la première, on écrira 30° et, dans la seconde, en regard, 35,2°. Les nombres seront les mêmes, dans les deux colonnes, jusqu'à 20°. A partir de là, la première colonne contiendra la suite naturelle 21°, 22°, 23°... et la seconde les degrés correspondants obtenus par le procédé que nous venons d'indiquer. Quant aux fractions de degré, on les estime au moyen d'une proportion.

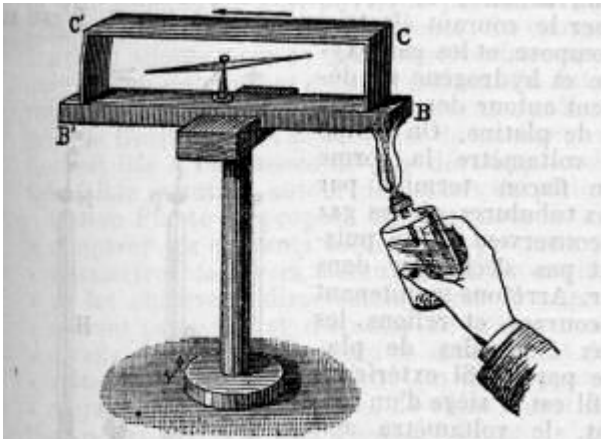


Fig. 3016. — Élément thermoelectrique bismuth et antimoine.

Piles thermoélectriques. - Thomas Seebeck remarqua que la chaleur peut produire un courant électrique dans un circuit entièrement métallique ; ici il n'y a plus d'action chimique. Voici quelles furent les expériences fondamentales de ce savant : il prit un rectangle constitué par deux métaux, antimoine et bismuth, ou antimoine et cuivre ; ce rectangle étant vertical et placé dans le plan du méridien magnétique, si l'on dispose au milieu même du cadre une aiguille aimantée, si l'on vient à chauffer l'une des soudures B (fig. 3016), on voit l'aiguille dévier indiquant que le cadre est traversé par un courant.

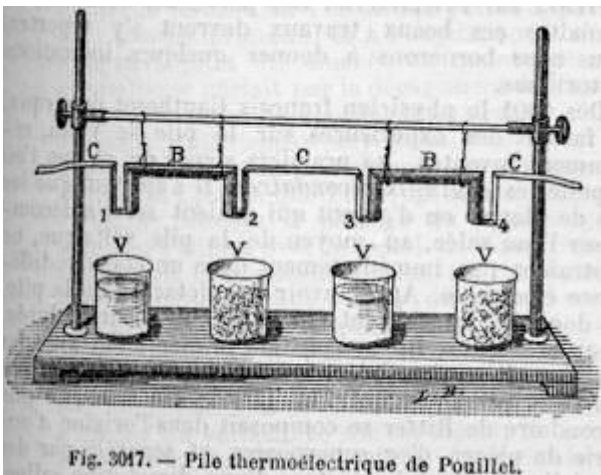


Fig. 3017. — Pile thermoélectrique de Pouillet.

Pouillet eut l'idée de mettre en série plusieurs éléments de piles thermoélectriques. La pile consiste en une série de cylindres soudés de bismuth B (fig. 3017) réunis par des lames C de cuivre. Toutes les soudures impaires plongent dans de l'eau chaude et les soudures paires dans de la glace.

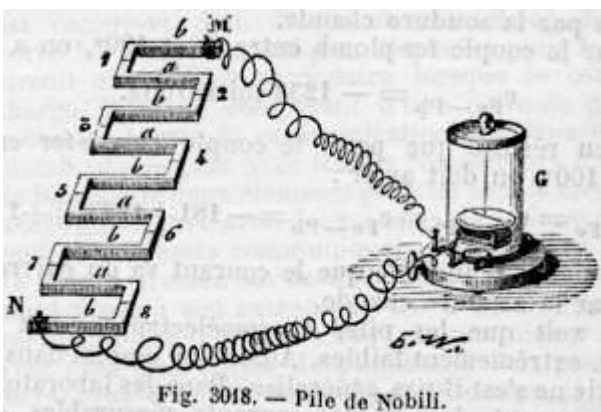
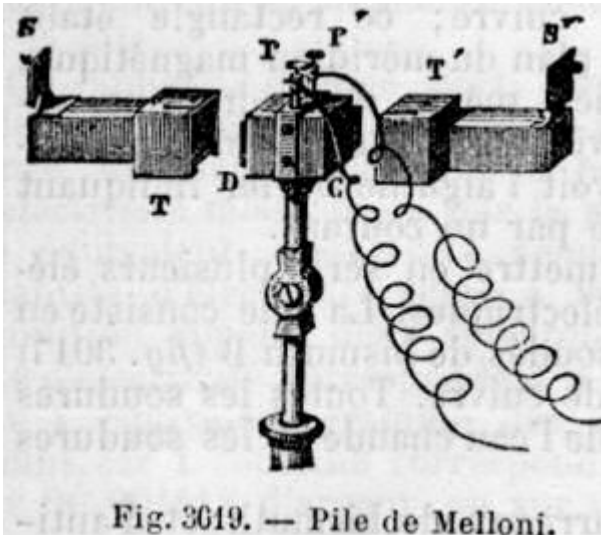


Fig. 3018. — Pile de Nobili.

Nobili unissait des barreaux de bismuth et d'antimoine soudés par les extrémités : a représente l'antimoine, b le bismuth (fig. 3018) et les soudures sont numérotées ; toutes celles d'ordre impair sont d'un côté, toutes les soudures paires de l'autre. Si on chauffe les soudures paires, par exemple, en refroidissant les autres, on obtient un courant. D'habitude, sur la chaîne MN, on place une feuille de papier verni, puis une seconde chaîne semblable à la première et reliée avec elle ; on continue une semblable superposition jusqu'à ce que la pile forme un parallélépipède que l'on mastique dans une pièce de cuivre, de façon que les soudures soient découvertes et présentent ainsi deux faces D et C (fig. 3019) que l'on enduit de noir de fumée afin qu'elles puissent plus

facilement absorber la chaleur.



La face D contient, par exemple, les soudures d'ordre impair, et la face C les soudures d'ordre pair. Deux petites colonnes métalliques PP' isolées forment les deux pôles de la pile et servent à attacher le fil qui amène le courant. Pour protéger l'appareil contre tout rayonnement latéral, on le munit de deux tubes, T, T', noircis intérieurement, qui s'ajustent sur les extrémités de la pile. Deux opercules S, S' permettent de découvrir la pile, et de laisser arriver sur elle les rayons calorifiques qui peuvent la venir frapper. Si la source de chaleur est très faible, on adapte à la face de la pile, tournée vers cette source, une boîte conique qui concentre vers la pile tous les rayons de chaleur qu'elle reçoit. Cet appareil a été appliqué par Melloni à l'étude de la chaleur rayonnante ; à cet effet, le courant est dirigé dans un galvanomètre à fil gros et court. On voit aisément que si on chauffe également des deux côtés de la pile, il ne se produira aucun courant, l'aiguille aimantée restera immobile. Mais si l'on chauffe seulement l'un des côtés,

l'on obtiendra un courant dont le sens variera avec le côté de la pile qui recevra l'action de la chaleur. L'intensité de ce courant a une relation que l'on peut déterminer avec la chaleur rayonnée vers la pile.

La condition essentielle de production d'un courant dans un couple thermoélectrique est l'existence d'une différence de température entre les deux soudures des deux métaux. Là, c'est la chaleur qui est la source de l'énergie électrique. En maintenant l'une des soudures à 0°, et portant l'autre à des températures croissantes, on voit la force électromotrice du couple croître progressivement ; elle atteint, en général, un maximum pour une certaine température de la soudure chaude qu'on appelle point neutre, et va ensuite en diminuant, jusqu'à devenir nulle pour une autre température qu'on appelle le point d'inversion ; si l'on chauffe encore au delà, la chaîne devient le siège d'un courant de sens inverse.

Les f. é. m. des piles thermoélectriques obéissent aux deux lois suivantes :

Lois des températures successives. - Pour deux métaux donnés, la f. é. m dans le cas où les soudures sont respectivement à 0° et 100°, est la somme des f. é. m. qu'on a, d'une part, entre 0° et une température intermédiaire quelconque, 70°, je suppose, et, d'autre part, entre 70° et 100°.

Lois des métaux intermédiaires. Étant donnés trois métaux : fer, cuivre et zinc, la f. é. m. du couple fer-cuivre entre 0° et 100° est la somme algébrique des f. é. m. des deux couples fer-zinc et zinc-cuivre entre les mêmes températures. Par exemple, entre le cuivre et le plomb, entre 0° et 100° on a

$$e_{\text{Cu-Pb}} = - 181 \text{ microvolts (millionièmes de volts)}$$

Le signe - indique que le cuivre est négatif vis-à-vis du plomb, c'est-à-dire que le courant va du plomb au cuivre par la soudure chaude.

Pour le couple fer-plomb entre 0° et 100°, on a :

$$e_{\text{Fe-Pb}} = - 1233 \text{ microvolts.}$$

Il en résulte que pour le couple cuivre-fer entre 0° et 100°, on doit avoir :

$$e_{\text{Cu-Fe}} = e_{\text{Cu-Pb}} + e_{\text{Fe-Pb}} = - 181 + 1233 = +1152$$

Le signe + indique que le courant va du cuivre au fer par la soudure chaude

On voit que les piles thermoélectriques ont des f.é.m. extrêmement faibles. Aussi leur emploi dans l'industrie ne s'est-il pas généralisé. Dans les laboratoires, elles peuvent donner des courants mesurables, dans des résistances très faibles, parce que leur propre résistance, ne comprenant que quelques barres métalliques, est toujours extrêmement faible.

Elles servent, pratiquement, à mesurer des températures.

Citons l'emploi, pour la mesure des températures élevées, de la pile thermoélectrique Le Chatelier, formé d'un couple dont les métaux sont le platine et un alliage de platine avec 10 % de rhodium.

GÉNÉRALITÉS SUR LES MESURES

1. Mesurage d'une grandeur

Mesurer une grandeur, c'est la comparer à une grandeur de même espèce prise comme référence. Cette dernière constitue une *unité de mesure* ; l'ensemble des unités de mesures légales forme un système appelé Système International (SI).

En métrologie, domaine des connaissances relatives aux mesurages, le mot *mesure* a de nombreuses significations qu'il importe de préciser dès maintenant; il peut désigner :

- une valeur : la mesure d'une distance est de 100 mètres ;
- un résultat : mesure approchée à 1 % près ;
- une action : réaliser une mesure électrique ;
- un instrument: une mesure de capacité.

Pour éviter toute ambiguïté, il est préférable de parler respectivement de valeur d'une grandeur, de résultat de mesurage, de mesurage et de mesure matérialisée. Toutefois, lorsqu'aucune confusion n'est possible, on appelle mesure l'expression d'un résultat de mesurage.

2. Les Étalons

Un étalon est un instrument de mesurage destiné à définir ou matérialiser, conserver ou reproduire l'unité de mesure d'une grandeur (ou un multiple ou un sous-multiple de cette unité). Selon l'usage qui en est fait, plusieurs sortes d'étalons sont fabriquées. Pour une grandeur déterminée, l'*étalon primaire* est celui qui présente les plus hautes qualités métrologiques; il n'est jamais utilisé directement pour des mesurages en dehors de sa comparaison avec des étalons secondaires. À partir d'un *étalon secondaire* sont réalisés des *étalons de travail* qui sont utilisés pour vérifier les instruments de mesurage.

3. Erreurs des résultats de mesurages

On appelle *erreur de mesurage* la discordance entre le résultat du mesurage et la valeur de la grandeur mesurée.

Cette valeur peut être la *valeur vraie* ou, si celle-ci n'est pas connue (cas le plus fréquent), la *valeur conventionnellement vraie* de la grandeur, ou encore la *moyenne arithmétique* des résultats d'une série de mesurages. Cette discordance peut avoir des causes variées et, en général, on ne peut en déterminer qu'une limite supérieure, appelée *incertitude de mesurage*.

3.1. Erreur systématique

C'est une erreur qui reste *constante en valeur absolue et en signe lorsque plusieurs mesurages d'une même grandeur fixe sont réalisés dans les mêmes conditions*.

Les causes des erreurs systématiques peuvent être connues ou non. Si une telle erreur peut être déterminée par le calcul ou par l'expérience, on apporte une correction appropriée au résultat du mesurage. Si une erreur systématique ne peut pas être déterminée mais si sa valeur peut être supposée suffisamment petite par rapport à l'imprécision de mesurage, on la traite comme une erreur fortuite ; au contraire, si elle est supposée très supérieure à l'imprécision de mesurage, elle est évaluée approximativement et prise en compte dans le calcul de l'erreur.

Exemple d'erreur systématique : mesurage d'une masse à l'aide d'une masse marquée supposée égale à 1 kg, alors que sa masse vraie est 1,005 kg.

3.2. Erreur fortuite

C'est une *erreur qui varie de façon imprévisible en valeur absolue et en signe lorsqu'on effectue un grand nombre de mesurages d'une même grandeur dans des conditions pratiquement identiques*. On ne peut pas tenir compte d'une erreur fortuite en apportant une correction au résultat brut du mesurage. À la fin d'une série de mesurages, on peut seulement fixer une limite supérieure pour cette erreur.

Une erreur fortuite est souvent appelée *erreur accidentelle* ou *erreur aléatoire*.

3.3. Erreur parasite

C'est une erreur souvent grossière qui *résulte d'une exécution incorrecte du mesurage*. Par exemple, elle peut être due à une lecture fautive, ou à l'usage d'un instrument devenu défectueux, ou encore au mauvais emploi d'un instrument.

3.4. Erreur partielle

Au cours d'un mesurage déterminé plusieurs erreurs peuvent être commises : erreur due à l'appareil de mesurage, erreur due aux accessoires de l'appareil de mesurage, erreur de lecture, etc. Ces erreurs sont appelées erreurs partielles. *L'incertitude de mesurage doit permettre de tenir compte de toutes les erreurs partielles en les composant* selon une certaine loi qui sera exposée par ailleurs.

3.5. Erreur absolue

C'est la *différence algébrique dx entre le résultat du mesurage X et la valeur de comparaison* qui peut être la valeur vraie X_v ou conventionnellement vraie, ou la moyenne arithmétique \bar{x} des résultats d'une série de mesurages. Dans le premier cas, l'erreur absolue est dite *véritable* ($dx = X - X_v$) ; dans le deuxième, elle est dite *apparente* ($dx = X - \bar{x}$).

3.6. Erreur relative

C'est le *quotient de l'erreur absolue et de la valeur de comparaison utilisée pour le calcul de l'erreur absolue* (dx/X_v ou dx/\bar{x}).

3.7. Écart quadratique moyen ou écart-type

$$S = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{n - 1}$$

Dans une série de n mesurages d'une même grandeur, on caractérise la dispersion des résultats obtenus par l'*écart quadratique moyen* s qui est donné par la formule ci-contre.

Si l'on désigne par X_i le résultat de mesurage de numéro i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) et par \bar{x} la *moyenne arithmétique* des n résultats considérés.

$$S_r = \frac{S}{\sqrt{p}}$$

Si l'on réalise p séries de mesurages, on peut aussi définir l'*écart quadratique moyen (écart-type) de la moyenne arithmétique d'une série de mesurages* S_r . Cet indice caractérise la dispersion de la moyenne arithmétique de la série de mesurages.

Remarque : l'augmentation du nombre de mesurages permet de diminuer l'importance des erreurs fortuites et une moyenne des résultats peut être acceptée comme résultat d'une série de mesurages.

4. Incertitudes. Loi De Composition

L'obtention d'un résultat de mesurage d'une grandeur x peut nécessiter une ou plusieurs opérations. Le mesurage d'une tension se réduit à une lecture sur un voltmètre, tandis que celui d'une résistance par une méthode voltampèremétrique impose une lecture U sur un voltmètre et une autre I sur un ampèremètre, le résultat étant donné par le quotient U/I . Le premier mesurage est dit *direct*, tandis que le second est dit *indirect* car le résultat est obtenu en combinant, selon une loi déterminée, des résultats de mesurages directs.

Pour un mesurage direct, la limite supérieure de l'erreur doit être évaluée en tenant compte du matériel utilisé et des conditions expérimentales. L'incertitude de mesurage dépend de la classe de précision de l'appareil et de la précision avec laquelle la lecture peut être faite.

$$x = x_1 + x_2 + x_3 + \dots$$

$$\Delta x \leq \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 + \dots$$

montre que l'incertitude absolue Δx est inférieure ou égale à la somme des incertitudes absolues :

Pour un mesurage indirect, il faut rechercher les incertitudes correspondant aux divers résultats de mesurages directs à combiner et ensuite déterminer l'incertitude totale en considérant le cas où les erreurs ne se compensent pas (cas le plus défavorable). Dans le cas d'une somme ou d'une différence, on

Dans le cas d'un produit (ou d'un quotient) de grandeurs indépendantes, il est souvent nécessaire de chercher l'erreur commise à l'aide d'un procédé mathématique et de déduire ensuite l'incertitude comme on va le voir à présent. D'une façon générale, si une grandeur y est fonction de plusieurs autres a, b, c indépendantes, elle peut être assimilée à une fonction de plusieurs variables $y = f(a, b, c)$. Les erreurs da, db, dc sur les variables étant très petites devant les valeurs respectives de ces variables, on peut les considérer comme des éléments différentiels et l'erreur entachant y est égale à la différentielle dy de la fonction $f(a, b, c)$. $dy = (da *$ dérivée partielle de y par rapport à a) + $(db *$ dérivée partielle de y par rapport à b) + $(dc *$ dérivée partielle de y par rapport à c), ce que l'on écrit symboliquement sous la forme ci-contre.

$$dy = \frac{\delta y}{\delta a} da + \frac{\delta y}{\delta b} db + \frac{\delta y}{\delta c} dc$$

L'incertitude absolue Δy , limite supérieure de l'erreur, est obtenue en considérant que toutes les erreurs s'ajoutent, c'est-à-dire que tous les termes de la somme sont positifs :

$$\Delta y \leq \left| \frac{\delta y}{\delta a} \right| \Delta a + \left| \frac{\delta y}{\delta b} \right| \Delta b + \left| \frac{\delta y}{\delta c} \right| \Delta c$$

$\Delta a, \Delta b, \Delta c$ étant les incertitudes avec lesquelles a, b et c sont connus. L'application de ce résultat montre que dans le cas de produits et de quotients de grandeurs indépendantes, l'incertitude relative $\Delta y/y$ est égale à la somme des incertitudes relatives.

$$y = ab \Rightarrow \frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} \quad y = \frac{a}{b} \Rightarrow \frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$$

5. Erreurs, Qualités, Classe De Précision Des Appareils De Mesure Électriques

5.1. Erreur de base, erreur complémentaire

Les erreurs de mesurage dépendent d'un certain nombre de grandeurs dites d'influence comme, par exemple: la température, la pression, la position de l'appareil, le champ magnétique, etc. L'*erreur de base* d'un appareil de mesure électrique est celle qui est introduite lorsqu'on utilise cet appareil dans des conditions dites de référence, fixées par le constructeur. Au contraire, les *erreurs complémentaires* sont celles qui proviennent du fait que les valeurs des grandeurs d'influence sont différentes de celles qui correspondent aux conditions de référence.

Pour un appareil électromécanique, les principales erreurs de base sont dues aux frottements d'éléments mobiles sur des parties fixes, à l'inertie mécanique, à l'inertie thermique, à des erreurs de lecture, notamment à l'erreur de *parallaxe* (si l'index est à une certaine distance de la surface de l'échelle et que l'observateur ne peut se placer normalement à cette surface). Une courbe d'étalonnage est fournie par le constructeur pour les appareils de qualité : elle exprime la correspondance entre les valeurs de la grandeur mesurée et les valeurs indiquées par l'appareil. Éventuellement, des courbes de corrections permettent de corriger les résultats obtenus lorsqu'une ou plusieurs grandeurs d'influence ne sont pas dans les conditions de référence.

5.2. Qualités d'un appareil de mesure

Plusieurs qualités sont à considérer pour juger un appareil de mesure.

- La **justesse** caractérise l'aptitude d'un appareil à donner des indications égales à la valeur vraie de la grandeur mesurée, c'est-à-dire non entachées d'erreurs systématiques
- La **fidélité** caractérise l'aptitude d'un appareil à donner des indications concordantes, donc non entachées d'erreurs fortuites pour une même grandeur mesurée.
- La **sensibilité** exprime quelle est la plus petite quantité dx qui peut être mesurée pour une valeur déterminée x de la grandeur mesurée. Cette sensibilité peut être constante le long de l'échelle. On remarquera que la sensibilité est d'autant plus grande que le nombre dx est faible.
- L'**hystérésis** ou réversibilité caractérise l'aptitude d'un appareil à donner la même indication lorsqu'on atteint une même valeur de la grandeur mesurée par valeurs croissantes ou par valeurs décroissantes.
- Le **temps de réponse** d'un appareil est le temps qui s'écoule entre une variation brusque de la grandeur à mesurer et l'instant où l'instrument donne une indication définitive de la nouvelle valeur de la grandeur.
- La **précision** d'un appareil de mesure est égale au rapport dx/x de l'erreur globale dx et de la valeur x de la grandeur à mesurer. Elle caractérise la qualité d'un instrument du point de vue des erreurs; la précision est d'autant plus grande que les indications sont plus proches de la valeur vraie (c'est-à-dire que dx est petit).
- La **résolution**, employée pour les appareils à affichage numérique, exprime la plus petite valeur qui peut être affichée. À ne pas confondre avec la *sensibilité* ou la *précision*.

5.3. Étendue de mesure, calibre d'un appareil

L'étendue de mesure d'un appareil est l'ensemble des valeurs pour lesquelles les indications obtenues ne sont pas entachées d'une erreur supérieure à l'erreur maximale tolérée. Certains instruments peuvent avoir plusieurs étendues de mesure.

Le calibre d'un appareil est la valeur de la grandeur à mesurer qui correspond à la limite supérieure de l'étendue de mesure. Par exemple, pour un ampèremètre, si cette limite supérieure est 5 A, on dit que son calibre est de 5 A.

5.4. Classe de précision

Un appareil de mesure (et ses accessoires) est caractérisé au moyen d'un nombre, appelé indice de classe. Celui-ci représente la limite supérieure de l'erreur absolue intrinsèque (c'est-à-dire due à l'appareil seul, utilisé dans les conditions de référence) exprimée en centièmes de la plus grande indication que peut donner l'appareil.

Ainsi, par exemple, un ampèremètre de classe 0,2 est un appareil dont l'erreur absolue intrinsèque ne dépasse pas 0,2 % de son indication la plus grande, lorsqu'il est utilisé dans des conditions normales. Si cet ampèremètre comporte 100 divisions, cette erreur absolue 0,2 intrinsèque est donc égale ou inférieure à $0,2/100 \times 100 = 0,2$ division.

Pour un appareil à plusieurs calibres, ce résultat reste le même quel que soit le calibre ; en revanche, l'expression de cette erreur en ampères change avec celui-ci puisque 0,2 division d'une graduation qui en comporte 100 représente 0,2/100 du calibre (0,002 A pour le calibre 1 A) ; 0,01 A pour le calibre 5 A).

Les valeurs des indices de classe sont fixées par la norme NF C 42-100. Des appareils de même indice de classe sont dits de même classe de précision. Les appareils de classe 0,1 ou 0,2 sont dits étalons ; ceux de classe 0,5 sont des appareils de laboratoire. Les appareils de classe 1,5 ou 2,5 sont des appareils de contrôle.

LA TEMPÉRATURE.....	1
PRESQUE PARTOUT	1
ÉVALUER UNE TEMPÉRATURE.....	1
LE PREMIER THERMOMÈTRE	1
LE DEGRÉ FAHRENHEIT	2
LE DEGRÉ CELSIUS	2
LE KELVIN	3
LE DEGRÉ RANKINE.....	3
LE DEGRÉ RÉAUMUR	3
VERS LA GRADUATION CENTÉSIMALE.....	3
POINTS FIXES DE TEMPÉRATURE ET POINTS-TRIPLES.....	3
DIVERSITÉ DES MESURES À EFFECTUER.....	4
LES THERMOCOUPLES.....	5
HISTORIQUE	6
EXPLICATIONS GÉNÉRALES.....	6
NORMALISATION	7
MESURER LA TENSION PRODUITE PAR UN THERMOCOUPLE.....	9
CONNEXION SUR UN VOLTMÈTRE	9
RÉFÉRENCE DE LA JONCTION EXTERNE	9
ET AVEC UN AUTRE TYPE DE THERMOCOUPLE ?	10
S'AFFRANCHIR DU PROBLÈME DES BORNES DU VOLTMÈTRE	10
ÉLIMINER LE BAIN DE GLACE FONDANTE	11
RÉCAPITULATIF.....	12
NOUS AVONS, DANS L'ORDRE :	12
MESURER LA TEMPÉRATURE DE T_{REF}.....	13
COMPENSATION LOGICIELLE (SOFTWARE COMPENSATION)	13
COMPENSATION MATÉRIELLE (HARDWARE COMPENSATION)	14
TENSION DES THERMOCOUPLES EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE	15
COEFFICIENT DE SEEBECK (A) EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE	15
CALCUL À PARTIR DES TABLES	16
CALCUL PAR ÉQUATION POLYNOMIALE	16
CONVERSION TEMPÉRATURE EN TENSION.....	18
POUR TOUS LES TYPES DE THERMOCOUPLES :	18
POUR LES THERMOCOUPLES DE TYPE K ET POUR LES TEMPÉRATURES SUPÉRIEURES À 0 °C :	18
PRÉCISION DE LA MESURE	19
RÉJECTION DU BRUIT, FILTRAGE ET TECHNIQUES DE "GARDE"	19
QUALITÉ DU RACCORDEMENT DES DEUX MÉTAUX.....	20
DÉCALIBRATION	20
JONCTION VIRTUELLES	20
PRÉCAUTIONS À PRENDRE.....	20
QUELQUES CONSIDÉRATIONS SUR LES THERMOCOUPLES	21
MÉTAL « NOBLE »	21
DIFFUSION	21
STABILITÉ.....	21
TYPE B :	21
LES THERMOCOUPLES DE MÉTAL NON « PRÉCIEUX »	21
TYPE E :	21
TYPE J :	21
TYPE T	21
TYPES K ET N.....	21
LES RTD (RESISTANCE TEMPERATURE DETECTOR).....	22
MÉTAUX.....	23

RTD - VALEURS DE LA RÉSISTANCE.....	24
VALEURS DE QUELQUES RTD.....	24
COEFFICIENT DE TEMPÉRATURE	24
MESURE DE LA RÉSISTANCE	24
PONT AVEC TROIS FILS.....	24
MESURE EN 4 FILS	25
ERREURS	25
CALCUL DE LA TEMPÉRATURE	26
CALCUL « LINÉAIRE »	26
ÉQUATION DE CALLENDAR-VAN DUSEN.....	27
CONVERSION PAR INTERPOLATION DANS UNE TABLE.....	28
ERREURS POSSIBLES ET PRÉCAUTIONS D'EMPLOI.....	30
ERREURS	30
AUTO-CHAUFFAGE (SELF-HEATING).....	30
VITESSE DE RÉPONSE	30
CONVERSIONS TEMPÉRATURE <> TENSION (ANNEXE 1) THERMOCOUPLE TYPE B DE 0 100 °C.....	31
LOIS EMPIRIQUES (ANNEXE 2)	32
LOI DU MÉTAL INTERMÉDIAIRE	32
LOI DES TEMPÉRATURES INTERNES	32
LOI DU MÉTAL INSÉRÉ.....	32
LES THERMOCOUPLES : IL Y A UN SIÈCLE ET PLUS (ANNEXE 3)	33
GRAND DICTIONNAIRE UNIVERSEL DU XIXE SIÈCLE DE PIERRE LAROUSSE.....	33
DICTIONNAIRE GÉNÉRAL DES SCIENCES EN 3 VOLUMES PAR MM. JULES GAY ET LOUIS MANGIN. (1905).....	35
GÉNÉRALITÉS SUR LES MESURES.....	37
1. MESURAGE D'UNE GRANDEUR	37
2. LES ÉTALONS	37
3. ERREURS DES RÉSULTATS DE MESURAGES	37
3.1. Erreur systématique	37
3.2. Erreur fortuite.....	37
3.3. Erreur parasite.....	38
3.4. Erreur partielle.....	38
3.5. Erreur absolue	38
3.6. Erreur relative.....	38
3.7. Écart quadratique moyen ou écart-type	38
4. INCERTITUDES. LOI DE COMPOSITION	38
5. ERREURS, QUALITÉS, CLASSE DE PRÉCISION DES APPAREILS DE MESURE ÉLECTRIQUES	39
5.1. Erreur de base, erreur complémentaire.....	39
5.2. Qualités d'un appareil de mesure	39
5.3. Étendue de mesure, calibre d'un appareil.....	40
5.4. Classe de précision	40