



**TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR**

Réf. : **R2590 V2**

Date de publication :
10 décembre 1997

Couples thermoélectriques - Caractéristiques et mesure de température

Cet article est issu de : **Archives**

par **Georges BONNIER, Eric DEVIN**

Pour toute question :
Service Relation clientèle
Techniques de l'Ingénieur
Immeuble Pleyad 1
39, boulevard Ornano
93288 Saint-Denis Cedex

Par mail :
infos.clients@teching.com
Par téléphone :
00 33 (0)1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **07/06/2021**

Pour le compte : **7200034507 - universite de lille // 194.254.129.28**

© Techniques de l'Ingénieur | tous droits réservés

Couples thermoélectriques

Caractéristiques et mesure de température

par **Georges BONNIER**

Directeur adjoint du BNM/INM (Institut national de métrologie)

et **Eric DEVIN**

Ingénieur de l'université Paris-Sud-Orsay

*Chef de la section thermométrie, pyrométrie optique et hygrométrie,
BNM-LNE (Bureau national de métrologie, Laboratoire national d'essais)*

1. Propriétés thermoélectriques d'un conducteur	R 2 590	2
2. Principaux couples thermoélectriques	—	6
3. Construction des capteurs thermoélectriques	—	9
4. Jonction de référence	—	10
5. Méthodes de mesure de la f.é.m.	—	11
6. Câble de compensation et câble d'extension	—	12
7. Normalisation des couples thermoélectriques	—	12
8. Incertitudes sur la mesure de la f.é.m. générée par un couple thermoélectrique	—	13
9. Évaluation de l'homogénéité des couples thermoélectriques	—	18
Pour en savoir plus	Doc. R 2 590	

Les couples thermoélectriques sont les instruments de mesure de température les plus couramment utilisés.

Cet article présente les principes de fonctionnement et les généralités concernant les précautions d'utilisation des couples thermoélectriques.

Les lois de la thermoélectricité y sont rappelées au paragraphe 1 car elles sont à la base de la compréhension des phénomènes qui influencent les mesures de température par couple thermoélectrique. En particulier, les origines et les effets des hétérogénéités dans les couples thermoélectriques sont largement abordés. Un point est fait sur les résultats des travaux de recherche récemment effectués dans ce domaine.

Le terme de « **couple thermoélectrique** » est recommandé et employé dans les normes. Cependant, le mot « **thermocouple** » est d'usage courant.

1. Propriétés thermoélectriques d'un conducteur

Trois effets thermoélectriques ont été établis expérimentalement. L'un d'entre eux, connu sous le nom d'effet Seebeck, est à la base du fonctionnement des couples thermoélectriques.

1.1 Effet Seebeck et schéma électrique équivalent d'un couple de conducteurs

1.11 Schéma électrique équivalent d'un élément de conducteur

L'effet Seebeck, découvert par Thomas Johann Seebeck en 1821, concerne l'apparition d'une force électromotrice (f.é.m.) dans un circuit ouvert, composé de deux conducteurs différents, lorsque les jonctions sont à des températures différentes. Cette f.é.m. peut être mesurée en interrompant l'un des fils et en reliant ses deux extrémités à un voltmètre V de très grande impédance d'entrée de manière à ce que le courant dans le circuit soit négligeable (figure 1).

Physiquement, l'effet Seebeck peut s'expliquer par la polarisation de tout élément de conducteur placé dans une zone de température où le gradient est non nul. Considérons un conducteur métallique dans lequel la température n'est pas uniforme (figure 2).

Soit $T(x,y,z)$ la température absolue au point $M(x,y,z)$ du conducteur métallique. On suppose que :

$$\partial T/\partial y = \partial T/\partial z = 0 \text{ et } \partial T/\partial x \neq 0$$

Supposons que la température à l'abscisse $x + dx$ soit supérieure à celle à l'abscisse x du conducteur métallique. La modification de la fonction de Fermi liée à l'augmentation de température engendre simultanément une diffusion d'électrons de l'extrémité la plus chaude vers l'extrémité la plus froide [1].

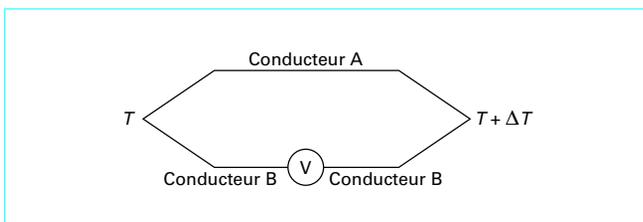


Figure 1 – Mesure de la f.é.m. générée par un couple thermoélectrique

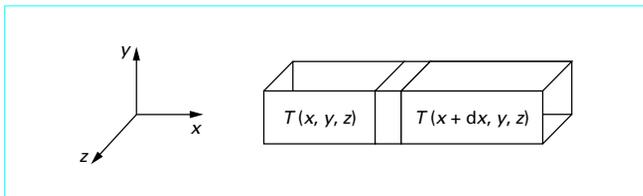


Figure 2 – Conducteur métallique à une température non uniforme

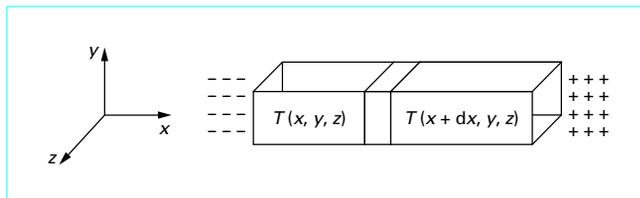


Figure 3 – Conducteur métallique à une température non uniforme : répartition des charges électriques

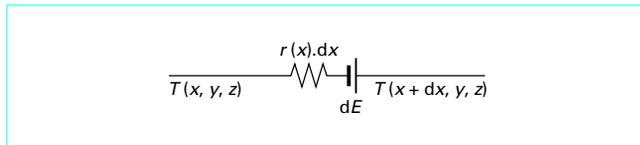


Figure 4 – Schéma électrique équivalent d'un élément de conducteur

Les électrons chauds étant plus rapides que les électrons froids, l'extrémité chaude se charge positivement et l'extrémité froide négativement (figure 3).

Les électrons chauds sont alors ralentis par le champ électrique interne créé et les électrons froids sont accélérés. Un équilibre dynamique s'établit : la diffusion des électrons chauds se trouve compensée par la diffusion des électrons froids. L'élément de conducteur de longueur dx peut, par conséquent, être assimilé à un générateur de tension élémentaire dont la f.é.m. est dE et dont la résistance interne est $r(x).dx$ (figure 4).

On a la relation suivante :

$$dE = S(x) \vec{\nabla} T \cdot d\vec{x}$$

avec $\vec{\nabla} T$ gradient de température,

$S(x)$ coefficient de Seebeck ou pouvoir thermoélectrique absolu à la température $T(x,y,z)$ de l'élément de conducteur compris entre les abscisses x et $x + dx$.

Le pouvoir thermoélectrique absolu d'un conducteur est relié à sa conductivité électrique par la relation donnée par D. Barnard [2] :

$$S(x) = -\frac{\pi^2 k^2 T}{3e} \left(\frac{d \ln \sigma(E)}{dE} \right) E_F$$

- avec k constante de Boltzmann,
- e charge de l'électron,
- σ conductivité électrique du conducteur,
- \ln logarithme népérien,
- E énergie,
- E_F énergie de Fermi du conducteur.

Ainsi le coefficient de Seebeck S d'un élément de conducteur est proportionnel à la température thermodynamique T de cet élément. Le coefficient de proportionnalité dépend des propriétés électroniques du métal et en particulier de l'énergie de Fermi du gaz d'électrons. De plus, l'introduction de défauts dans le réseau cristallin modifie simultanément la conductivité et le coefficient de Seebeck du métal. Les résultats expérimentaux obtenus par R.B. Roberts [3] montrent que le coefficient de Seebeck du platine est effectivement proportionnel à la température absolue entre 600 K et 1 300 K. Les mesures effectuées sur le palladium par M.I. Laubitz et T. Matsumara [4] montrent que le coefficient de Seebeck du palladium varie d'une manière pratiquement linéaire entre 300 K et 1 300 K (tableau 1).

Tableau 1 – Coefficients de Seebeck du platine et du palladium

T (K)	S _{Pt} (μV/ °C)	S _{Pt} (μV/ °C)
300	- 4,92	- 10,69
350	- 6,33	- 12,33
400	- 7,53	- 13,60
450	- 8,59	- 14,95
500	- 9,53	- 16,34
550	- 10,41	- 17,79
600	- 11,22	- 19,30
650	- 11,98	- 20,85
700	- 12,71	- 22,45
750	- 13,42	- 24,07
800	- 14,14	- 25,71
850	- 14,89	- 27,36
900	- 15,66	- 29,01
1 000	- 17,21	- 32,26
1 100	- 18,77	- 35,43
1 200	- 28,29	- 38,46
1 300	- 21,78	- 41,10

1.12 Schéma électrique équivalent d'un couple de conducteurs

Le schéma électrique équivalent d'un couple de conducteurs différents dont les jonctions sont portées à des températures différentes est représenté par la figure 5.

La f.é.m. totale générée par le couple thermoélectrique ainsi formé est :

$$E = \int_{\cong} S(x,T) \vec{\nabla} T \cdot \vec{dx} \tag{1}$$

Si, en tout point du conducteur A, le coefficient de Seebeck est égal à S_A(T) et si, en tout point du conducteur B, le coefficient de Seebeck est égal à S_B(T), les conducteurs A et B sont dits **homogènes**. La f.é.m. totale générée par le circuit thermoélectrique précédent placé entre les températures T₁ et T₂ s'écrit :

$$E = \int_{T_1}^{T_2} [S_A(T) - S_B(T)] \cdot dT \tag{2}$$

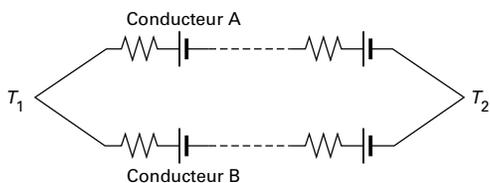


Figure 5 – Schéma électrique équivalent d'un couple de conducteurs

Ainsi, la f.é.m. générée par un couple thermoélectrique constitué de deux conducteurs parfaitement homogènes **dépend uniquement des températures des deux jonctions**, et non de la distribution de température dans les deux conducteurs. La f.é.m. générée par un couple thermoélectrique peut être mesurée en séparant les deux conducteurs au niveau de l'une des jonctions et en reliant les deux extrémités obtenues à un voltmètre. On choisit un voltmètre dont la résistance d'entrée est très grande devant la résistance des conducteurs.

Dans le cas où les conducteurs **ne sont pas homogènes**, S_A(T) et S_B(T) évoluent le long des conducteurs et la relation (2) ne peut s'appliquer. Or, les défauts d'homogénéité dans les conducteurs de couples thermoélectriques sont multiples : oxydation des conducteurs, évaporation de certains constituants, pollution à haute température, écrouissages, ou encore transformation en phase solide pour certains conducteurs. Le modèle (1) suggère que, lorsqu'un défaut d'homogénéité, c'est-à-dire une variation locale du coefficient de Seebeck S_A(T) ou S_B(T) par rapport à sa valeur moyenne, est placé dans un profil thermique de gradient non nul, il apparaît une f.é.m. différente de celle d'un couple de conducteurs homogènes, nous y reviendrons plus loin (§ 2.3).

1.13 Schéma électrique équivalent et lois des circuits thermoélectriques

1.131 Loi des conducteurs successifs (ou loi des conducteurs intermédiaires)

Considérons trois couples de conducteurs parfaitement homogènes (A, C) ; (A, B) ; et (B, C). Supposons que, pour chacun de ces trois couples thermoélectriques, une jonction est à la température T_C et l'autre jonction à la température T_A. On suppose T_C > T_A.

Les schémas électriques équivalents de ces trois couples de conducteurs sont indiqués figure 6.

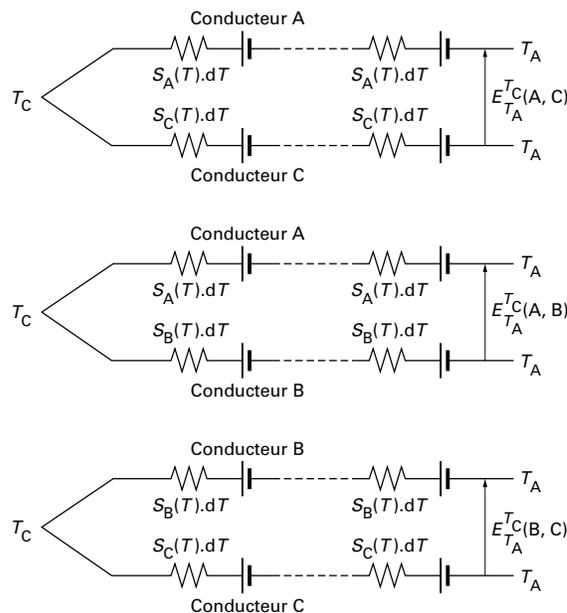


Figure 6 – Loi des conducteurs successifs

Pour ces trois couples, nous pouvons écrire :

$$E_{T_A}^{T_C}(A,C) = \int_{T_A}^{T_C} [S_A(T) - S_C(T)] \cdot dT$$

$$E_{T_A}^{T_C}(A,B) = \int_{T_A}^{T_C} [S_A(T) - S_B(T)] \cdot dT$$

$$E_{T_A}^{T_C}(B,C) = \int_{T_A}^{T_C} [S_B(T) - S_C(T)] \cdot dT$$

D'où :

$$E_{T_A}^{T_C}(A,C) = E_{T_A}^{T_C}(A,B) + E_{T_A}^{T_C}(B,C)$$

ou

$$E_{T_A}^{T_C}(A,C) = E_{T_A}^{T_C}(A,B) - E_{T_A}^{T_C}(C,B)$$

Ainsi la f.é.m. développée par le couple thermoélectrique (A, C) est égale à la différence entre la f.é.m. développée par le couple (A, B) et la f.é.m. développée par le couple (C, B). Cette loi est connue sous le nom de **loi des conducteurs successifs** ou **loi des conducteurs intermédiaires**.

1.132 Loi des températures successives (loi des températures intermédiaires)

Considérons un couple de conducteurs parfaitement homogènes (A, B). Supposons que les jonctions soient portées successivement aux températures (T₁, T₃); (T₁, T₂) et (T₂, T₃). On suppose que T₁ < T₂ < T₃. Les schémas électriques équivalents de ces trois configurations sont indiqués sur la figure 7.

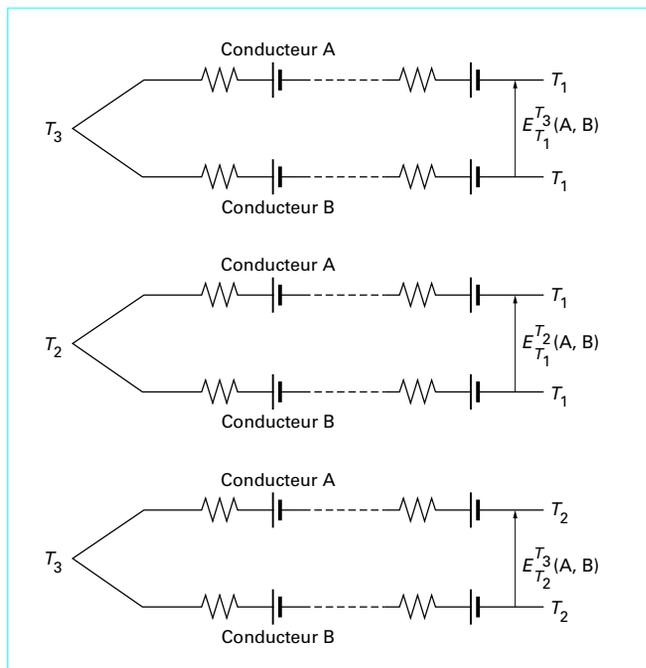


Figure 7 – Loi des températures successives

Les f.é.m. générées par le couple (A, B) sont successivement

$$E_{T_1}^{T_3}(A,B) = \int_{T_1}^{T_3} [S_A(T) - S_B(T)] \cdot dT$$

$$E_{T_1}^{T_2}(A,B) = \int_{T_1}^{T_2} [S_A(T) - S_B(T)] \cdot dT$$

$$E_{T_2}^{T_3}(A,B) = \int_{T_2}^{T_3} [S_A(T) - S_B(T)] \cdot dT$$

D'où :

$$E_{T_1}^{T_3}(A,B) = E_{T_1}^{T_2}(A,B) + E_{T_2}^{T_3}(A,B)$$

Ainsi la f.é.m. développée par le couple thermoélectrique (A, B) entre les températures T₁ et T₃ est égale à la somme des f.é.m. développées par le même couple (A, B) entre les températures T₁ et T₂ d'une part, et les températures T₂ et T₃ d'autre part. Cette loi est connue sous le nom de **loi des températures successives** ou **loi des températures intermédiaires**.

1.2 Effets Peltier et Thomson

1.21 Effet Peltier

C'est en 1834 que Jean-Charles Athanase Peltier découvre l'effet qui porte aujourd'hui son nom. Cet effet est le suivant :

lorsqu'un courant électrique parcourt un circuit électrique constitué de deux conducteurs différents A et B portés à la même température, on observe la production et l'absorption de chaleur aux jonctions de deux conducteurs.

Les quantités de chaleur échangées sont très petites. Elles sont proportionnelles à l'intensité du courant électrique I qui parcourt le circuit et dépendent de la nature des deux conducteurs ainsi que de la température à laquelle est porté le système. Si Q est la quantité de chaleur produite ou absorbée par unité de temps :

$$Q = \pi_{A/B} \cdot I$$

où $\pi_{A/B}$ est le **coefficient de Peltier** de la jonction des conducteurs A et B portés à la température T.

Entre 1840 et 1848, les travaux de James Prescott Joule montrent qu'un conducteur de résistance R parcouru par un courant I, dégage par unité de temps une quantité de chaleur Q telle que Q = R I². Pour bien différencier la nature des effets Joule et Peltier, on donne à ce dernier la définition suivante :

l'**effet Peltier** est le dégagement ou l'absorption de chaleur, autre que l'effet Joule, provoqué par le passage d'un courant électrique à travers les jonctions de deux conducteurs A et B portés à la même température.

L'électronique physique permet d'expliquer ce phénomène [5]. Ainsi, dans les corps métalliques, il existe des électrons libres en quantité importante sans liaison avec le reste du réseau atomique. Ils se comportent comme un gaz et peuvent être caractérisés par leur densité. La densité d'électrons libres dans un corps métallique homogène est une fonction de la température et la probabilité de trouver un électron d'énergie E est donnée par la fonction de Fermi, avec E_F l'énergie de Fermi ou énergie moyenne d'un électron à la température T :

$$P(E) = 1 / [\exp(E - E_F) / RT + 1]$$

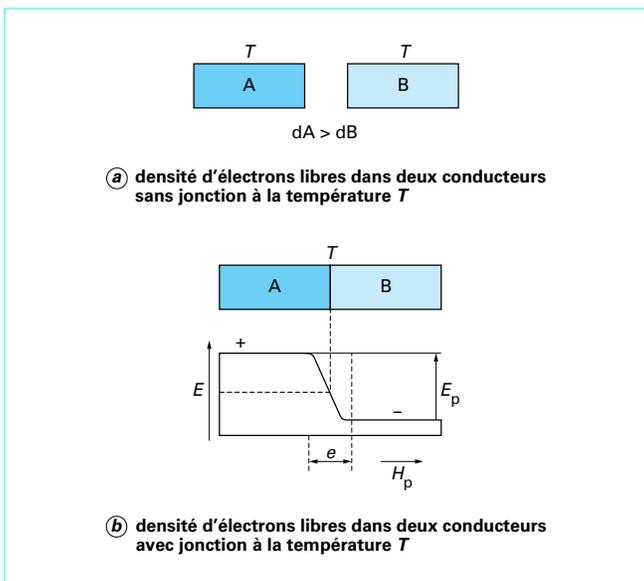


Figure 8 – Origine de l'existence de la f.é.m. Peltier

On retient que dans un matériau homogène à température uniforme, la densité d'électrons libres est constante partout dans le volume et dépend de celle-ci et qu'à une même température, les densités d'électrons libres dans des matériaux différents sont généralement différentes.

Pour expliquer l'existence de la f.é.m. Peltier, considérons deux matériaux homogènes de natures différentes, respectivement A et B, portés à une même température. Les densités d'électrons libres sont dA et dB et supposons $dA > dB$. On peut schématiquement les représenter par des densités de points, comme le montre la figure 8a.

Amenons maintenant les deux conducteurs en contact (figure 8b). Les électrons de A vont migrer vers B qui va se charger négativement tandis que A se charge positivement. Une différence de potentiel E_p s'établit à la surface de séparation des deux matériaux ; elle engendre un champ électrique H_p qui s'oppose à ce que la diffusion des électrons se poursuive jusqu'à l'équilibre.

L'épaisseur de matière e sur laquelle se produit E_p est très faible, elle est souvent assimilée à un saut brusque.

Cette tension E_p s'appelle la **f.é.m. de Peltier**. Elle prend donc naissance lorsque deux conducteurs sont en contact. C'est une grandeur qui **n'est pas mesurable**. En effet, pour la mesurer, il faudrait raccorder le dipôle à un instrument de mesure, ce qui aurait pour effet de créer de nouvelles f.é.m. de Peltier au niveau des jonctions ainsi réalisées entre le dipôle et l'instrument de mesure. La mesure de la f.é.m. ainsi effectuée n'aurait donc pas la moindre validité.

1.22 Effet Thomson

L'effet Thomson est le dégagement ou l'absorption de chaleur, autre que l'effet Joule, qui accompagne le passage d'un courant électrique à travers un conducteur homogène dont la température n'est pas uniforme. Soit Q la quantité de chaleur échangée avec l'extérieur par effet Thomson, par unité de longueur d'un conducteur homogène et unité de temps. Soit ΔT la différence de température qui existe entre deux points du conducteur distants d'une longueur unité et soit I l'intensité du courant électrique qui circule. Le **coefficient**

de Thomson τ_A du conducteur A est défini par la relation suivante :

$$Q = \tau_A \cdot \Delta T \cdot I$$

Pour expliquer du point de vue de l'électronique physique l'existence de l'effet Thomson [5], considérons à présent, comme le montre la figure 9, un matériau homogène soumis à un gradient de température. Soient Ag et Ad les parties de gauche et de droite de celui-ci et supposons $dAg > dAd$, les densités d'électrons libres, fonction de la température. Les électrons de Ag vont migrer vers Ad. Une f.é.m. apparaît alors. Cette f.é.m. E_{Th} est appelée **f.é.m. de Thomson**.

Elle engendre un champ électrique H_{Th} qui s'oppose à ce que la diffusion des électrons se poursuive jusqu'à l'obtention d'un équilibre.

Jusqu'ici, on peut faire l'analogie entre la f.é.m. Peltier E_p et la f.é.m. Thomson E_{Th} . Cependant, ce qui se passe pour E_{Th} ne résulte pas simplement d'un équilibre entre les deux densités d'électrons différentes. Les deux populations se trouvent dans des états énergétiques différents (la température de l'une étant plus élevée que celle de l'autre, les agitations thermiques ne sont pas les mêmes), l'échange statistique d'électrons entre les populations se fait donc de telle manière qu'il séjourne en permanence, dans la région où le niveau énergétique est le plus bas, un excédent d'électrons (provenant de la région où l'agitation thermique est grande) par rapport à ce qui serait requis par le seul équilibre naturel entre densités différentes. Une fois que les électrons ont cédé leur énergie, ils rebroussement chemin et sont remplacés par d'autres. Il est important de remarquer que E_{Th} est la somme de deux composantes : la première, E_1 , résulte d'un équilibre naturel entre les densités électroniques différentes qui se trouveraient dans un même état énergétique. La seconde, E_2 , résulte de la perturbation de cet équilibre par un accroissement de l'agitation thermique de l'une des populations d'électrons. Dans le cas où le gradient thermique n'est pas aussi brusque, mais varie de façon continue comme la somme algébrique de sauts élémentaires, la f.é.m. globale de Thomson dans le gradient de température est l'intégrale de l'ensemble des contributions élémentaires.

1.23 Relations entre les coefficients de Seebeck, Thomson et Peltier

Thomson (devenu par la suite Lord Kelvin) établit deux relations entre les coefficients de Seebeck, Peltier et Thomson. Ces relations vérifiées expérimentalement sont connues sous le nom de **relations de Kelvin** :

$$\pi_{A/B} = T \cdot (S_A - S_B)$$

et

$$\tau_A - \tau_B = T \frac{d(S_A - S_B)}{dT}$$

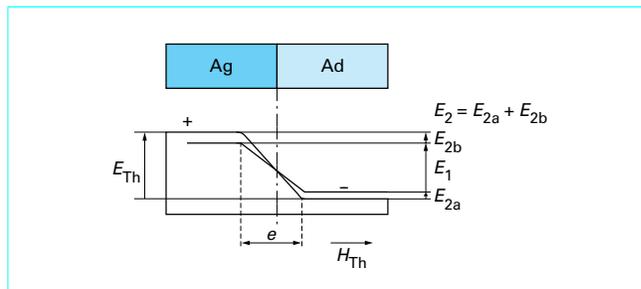


Figure 9 – Effet Thomson

2. Principaux couples thermoélectriques

Le principe de fonctionnement d'un couple thermoélectrique impose pour sa réalisation, comme nous venons de le voir, l'emploi de deux conducteurs en matériaux différents. La plupart des matériaux conducteurs possèdent des propriétés thermoélectriques mais la constitution d'un thermocouple nécessite une bonne stabilité dans le temps des matériaux, un domaine d'emploi en température et une sensibilité (en $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) suffisante. Ces contraintes réduisent considérablement le nombre de matériaux candidats pour cette application.

L'ensemble des couples thermoélectriques aujourd'hui couramment utilisés permet de couvrir un large domaine de température allant de -250°C à plus de $2\,000^\circ\text{C}$. Parmi les différentes paires de matériaux utilisées, on peut distinguer deux grandes familles :

- les **thermocouples en métal précieux** à base de platine, les plus stables mais aussi les plus chers et les moins sensibles ;
- les **thermocouples en métaux communs**, les moins stables mais aussi les moins chers et les plus sensibles.

On désigne en général un type de couple thermoélectrique par une lettre, le tableau 2 donne la correspondance entre la désignation usuelle et la constitution du couple ; la plupart d'entre eux sont normalisés au niveau européen, ceux qui ne le sont pas font l'objet d'une note spécifique.

2.1 Domaine d'utilisation des couples thermoélectriques

Le domaine d'utilisation en température des couples thermoélectriques est limité d'une part, par la sensibilité du couple qui évolue avec la température et qui dépend des matériaux en présence, d'autre part, par la tenue des matériaux à haute température.

Le tableau 3 rappelle sommairement le domaine d'utilisation des principaux couples thermoélectriques.

Il est à noter toutefois que les domaines cités ne le sont qu'à titre indicatif et qu'ils peuvent évoluer en fonction de la technologie de fabrication des capteurs (couple chemisé, montage sans gaine protectrice...), des conditions d'utilisation (atmosphère oxydante ou réductrice) et de certains critères géométriques (diamètre du couple thermoélectrique par exemple). Cependant, il n'existe pas de recueil des températures maximales d'emploi en fonction de tous ces paramètres. Seule une norme américaine, la norme ANSI MC 96.1 - *Temperature Measurement Thermocouples*, donne des indications sur la température maximale d'utilisation ($^\circ\text{C}$) recommandée selon le diamètre des fils (en mm) constituant les couples thermoélectriques protégés [6] (tableau 4).

2.2 Relation entre la f.é.m. générée par un couple thermoélectrique et la température. Fonctions de référence

Supposons que l'on fixe la température de la jonction froide d'un couple thermoélectrique (0°C par exemple) ; l'expérience montre que la variation de la f.é.m. du couple thermoélectrique est une fonction non linéaire de la température T_c de la soudure chaude. La non-linéarité de la relation entre la f.é.m. du couple et la température est mise en évidence par la forme polynomiale de l'équation qui les lie. Pour chaque type de couple thermoélectrique, une **fonction de référence** est définie. Comme cette fonction de référence lie

la f.é.m. du couple thermoélectrique à la température, celle-ci dépend de l'échelle de température en vigueur. Les dernières en date ont été établies à la suite du changement d'échelle intervenu en 1990 (mise en place de l'Echelle Internationale des Températures de 1990 - EIT-90). Ces fonctions de référence, dont un exemple est donné tableau 5, ont été établies en 1991 par différents laboratoires de métrologie nationaux à la demande du Comité Consultatif de Thermométrie et consignées dans une publication commune présentée à Toronto en 1992 [7].

Tableau 2 – Désignation des couples thermoélectriques usuels

Lettre	Conducteur positif	Conducteur négatif
T	Cuivre	Nickel-Cuivre (Constantan)
J	Fer	Nickel-Cuivre (Constantan)
E	Nickel-Chrome (Chromel)	Nickel-Cuivre (Constantan)
K	Nickel-Chrome (Chromel)	Nickel-Aluminium (Alumel)
S	Platine-10 % Rhodium	Platine
R	Platine-13 % Rhodium	Platine
B	Platine-30 % Rhodium	Platine-6 % Rhodium
N	Nickel-Chrome-Silicium (Nicrosil)	Nickel-Silicium-Magnésium (Nisil)
U (1)	Cuivre	Constantan
(2)	Fer	Constantan
G (3)	Tungstène	Tungstène-26 % Rhénium
C (3)	Tungstène-5 % Rhénium	Tungstène-26 % Rhénium
D (3)	Tungstène-3 % Rhénium	Tungstène-25 % Rhénium
/ (4)	Platine-0,1 % Molybdène	Platine-0,5 % Molybdène
/ (4)	Iridium-40 % Rhodium	Iridium
/ (4)	Platine-40 % Rhodium	Platine-20 % Rhodium
/ (4)	Platine	Palladium
/ (4)	Platine	Or

(1) Couple thermoélectrique peu différent du couple T normalisé en Allemagne : norme DIN 437 10

(2) Couple thermoélectrique peu différent du couple J normalisé en Allemagne : norme DIN 437 10

(3) Couple thermoélectrique non normalisé en Europe, les tables de correspondance sont fournies par les fabricants (ex : Hoskins Manufacturing Company). Certaines normes américaines ANSI proposent des tables de référence.

(4) Couple non normalisé.

Les résultats obtenus ont été admis au niveau international et ont fait l'objet de normes nationales afin de mettre à jour les anciennes normes relatives aux couples thermoélectriques. Les fonctions de référence par type de couple thermoélectrique sont présentées dans le logiciel fourni en complément de ce fascicule (figure 10) et développé par le BNM-LNE (se reporter à la notice jointe au logiciel Disq. R 2 590).

Tableau 3 – Domaine d'utilisation en température des couples thermoélectriques usuels

Code	Sensibilité moyenne (µV/°C)	Domaine d'utilisation (°C)
T	51	- 200 à 370
J	55	- 40 à 800
E	78,5	- 270 à 870
K	41	- 270 à 1 270
S	11,4	- 50 à 1 600
R	12,9	- 50 à 1 600
B	10,6	0 à 1 700
N	38	- 270 à 1 300
G/C/D	20	0 à 2 600
Pt 0,1 Mo/Pt 0,5 Mo	13 à 36	0 à 1 600
Ir/Rh 40 % Ir	5	0 à 2 100
Pt 40 % Rh/Pt 20 % Rh	3	0 à 1 850
Pt/Pd	20	0 à 1 500
Pt/Au	25	0 à 1 000

Tableau 4 – Extrait de la norme ANSI MC 96.1 – Températures maximales d'emploi en fonction des diamètres des éléments de couple thermoélectrique

Type de couple	Diamètres des éléments de couple thermoélectrique				
	3,3 mm	1,6 mm	0,8 mm	0,5 mm	0,3 mm
B				1 700 °C	
E	870 °C	650 °C	540 °C	430 °C	430 °C
J	760 °C	590 °C	480 °C	370 °C	370 °C
K	1 260 °C	1 090 °C	980 °C	870 °C	870 °C
R et S				1 480 °C	
T		370 °C	260 °C	200 °C	200 °C

Norme ANSI MC 96.1 : *Temperature Measurement Thermocouples*

2.3 Précautions d'utilisation : origine des dérives et des défauts d'homogénéité

Lors de l'utilisation d'un couple thermoélectrique, celui-ci subit les conditions ambiantes du milieu où s'effectue la mesure.

Pour les couples de type K par exemple, la plage d'utilisation la plus fréquente est de 600 °C à 1 100 °C et la température maximale d'utilisation pour les couples de type S peut atteindre 1 500 °C. A de telles températures, les couples thermoélectriques subissent des traitements thermiques (recuits) et même, dans certains cas, des changements métallurgiques importants (oxydation, transformation en phases solides...). Les zones du capteur non soumises à de hautes températures (à la sortie d'un four par exemple) ne subissent pas de modifications physico-chimiques. Il existe donc, le long du couple thermoélectrique, des disparités des propriétés thermoélectriques. Ces disparités locales sont appelées généralement « défauts d'homogénéité » ou bien encore « hétérogénéités ».

La composante active de la f.é.m. d'un couple provient (cf. paragraphe 1.12) du profil de température appliqué aux conducteurs constituant le couple. Un défaut d'homogénéité ponctuel soumis à un profil de température engendrera donc une f.é.m. différente de celle engendrée par un couple homogène.

Les principales causes d'hétérogénéité recensées à ce jour sont :

- l'oxydation des conducteurs constituant le capteur thermoélectrique. A haute température, le coefficient de diffusion des métaux augmente considérablement, ce qui favorise la pollution par l'oxygène ou certains constituants présents dans l'isolant ou la gaine protectrice du capteur ;
- les contraintes mécaniques. Celles-ci peuvent intervenir à n'importe quel moment de l'élaboration ou de la manipulation du capteur. Le simple fait de tordre l'un des fils conducteurs peut générer une accumulation de contraintes au point de flexion ayant des conséquences non négligeables ;
- la diffusion, à haute température, d'une espèce d'un des conducteurs vers l'autre conducteur. Par exemple, dans les couples de type S vers 1 450 °C, il y a migration du rhodium au niveau de la jonction de mesure de l'alliage platine-10 % rhodium vers le conducteur en platine pur ;
- l'évaporation à hautes températures d'un ou de plusieurs constituants du couple thermoélectrique ;
- les transformations en phases solides qui peuvent intervenir à certaines températures laissant apparaître des variétés allotropiques de certains conducteurs. C'est le cas du couple thermoélectrique de type K. Le développement du couple type N avait d'ailleurs pour but d'éliminer cet inconvénient.

Certains paramètres sont, en outre, à prendre en considération, notamment :

- la forme du profil thermique appliqué et la température maximale d'emploi dont dépendent la vitesse de formation des hétérogénéités et l'erreur qu'elles engendrent ;
- la durée d'exposition aux profils thermiques. La plupart des réactions mises en jeu ont un effet d'autant plus important que le temps d'exposition est long ;
- la nature de l'environnement physico-chimique : une atmosphère oxydante ou réductrice favorisera ou non certaines réactions (oxydation par exemple).

Parmi tous les défauts intervenant à haute température, l'oxydation est souvent prépondérante en atmosphère courante (air...). C'est la raison pour laquelle les couples thermoélectriques en métaux communs, qui s'oxydent rapidement, sont moins stables que ceux en métaux nobles.

La présence d'hétérogénéités dans les couples thermoélectriques est à l'origine de deux phénomènes engendrant des erreurs de mesure.

■ **Un phénomène de dérive** : la diffusion des éléments d'un conducteur à l'autre à travers la soudure chaude ou l'influence d'autres phénomènes comme leur oxydation entraînent petit à petit une

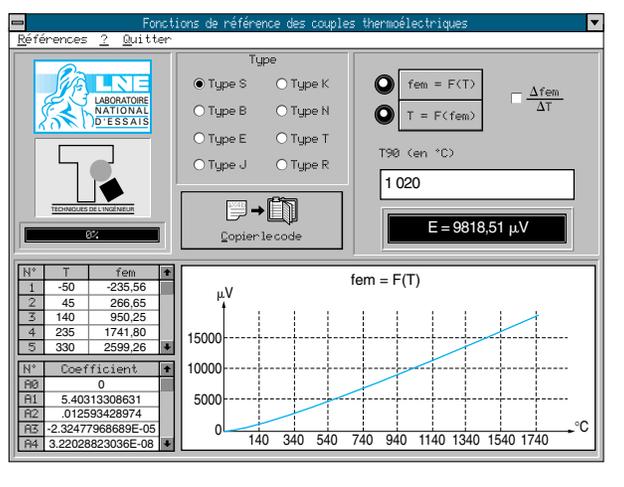


Figure 10 – Logiciel Fonctions de référence des couples thermoélectriques

Tableau 5 – Exemple de fonction de référence pour un couple thermoélectrique de type S

FONCTION DE RÉFÉRENCE POUR LE COUPLE THERMOÉLECTRIQUE DE TYPE S :

La force électromotrice, E_{Norme} , développée par un couple thermoélectrique de type S est reliée à la température t_{90} (°C) par les polynômes suivants :

■ De - 50°C à 1 064,18°C

$$E_{Norme} = \sum_{i=1}^n a_i (t_{90})^i \text{ en } \mu\text{V}$$

avec les valeurs des coefficients suivants :

$$\begin{aligned} a_1 &= 5,403\ 133\ 086\ 31 \\ a_2 &= 1,259\ 342\ 897\ 40 \times 10^{-2} \\ a_3 &= -2,324\ 779\ 686\ 89 \times 10^{-5} \\ a_4 &= 3,220\ 288\ 230\ 36 \times 10^{-8} \\ a_5 &= -3,314\ 651\ 963\ 89 \times 10^{-11} \\ a_6 &= 2,557\ 442\ 517\ 86 \times 10^{-14} \\ a_7 &= -1,250\ 688\ 713\ 93 \times 10^{-17} \\ a_8 &= 2,714\ 431\ 761\ 45 \times 10^{-21} \end{aligned}$$

■ De 1 064,18 °C à 1 664,5°

$$E_{Norme} = \sum_{i=0}^n a_i (t_{90})^i \text{ en } \mu\text{V}$$

avec les valeurs des coefficients suivants :

$$\begin{aligned} a_0 &= 1,329\ 004\ 440\ 85 \times 10^3 \\ a_1 &= 3,345\ 093\ 113\ 44 \\ a_2 &= 6,548\ 051\ 928\ 18 \times 10^{-3} \\ a_3 &= -1,648\ 562\ 592\ 09 \times 10^{-6} \\ a_4 &= 1,299\ 896\ 051\ 74 \times 10^{-11} \end{aligned}$$

■ De 1 664,5 °C à 1 768,1 °C

$$E_{Norme} = \sum_{i=0}^n a_i (t_{90})^i \text{ en } \mu\text{V}$$

avec les valeurs des coefficients suivants :

$$\begin{aligned} a_0 &= 1,466\ 282\ 326\ 36 \times 10^5 \\ a_1 &= -2,584\ 305\ 167\ 52 \times 10^2 \\ a_2 &= 1,636\ 935\ 746\ 41 \times 10^{-1} \\ a_3 &= -3,304\ 390\ 469\ 87 \times 10^{-5} \\ a_4 &= -9,432\ 236\ 906\ 12 \times 10^{-12} \end{aligned}$$

variation du pouvoir thermoélectrique du couple. Cette variation de la f.é.m. d'un couple thermoélectrique en fonction du temps à une température fixée est appelée **dérive**. Pour la plupart des types de couple thermoélectrique, on observe alors une perte de pouvoir thermoélectrique.

■ Une **influence importante du profil de température** appliqué au couple thermoélectrique sur la f.é.m. générée : la présence d'hétérogénéités dans un couple thermoélectrique implique qu'en fonction du profil thermique appliqué à celui-ci, la f.é.m. délivrée varie, alors même que la température de la jonction de mesure est fixée. Les erreurs provoquées sont insidieuses, car elles ne peuvent pas être mises en évidence sans changer le profil de température appliqué au capteur. Ainsi, un couple thermoélectrique étalonné dans un four homogène d'un laboratoire de métrologie, puis ensuite utilisé dans un four de traitement à la même température mais avec un profil de température différent, peut entraîner une erreur de mesure.

2.4 Influence des radiations alpha, bêta, gamma et de neutrons [8]

Les rayonnements alpha et bêta ne produisent pas d'erreur sur les mesures de température par couple thermoélectrique.

Les rayonnements gamma, quant à eux, produisent un échauffement du capteur qui dépend de l'intensité des radiations et du volume irradié, ce qui produit une erreur sur la mesure de température tant que le rayonnement persiste.

Les neutrons provoquent des changements irréversibles au sein des matériaux constituant les couples. Ce phénomène dépend :

- de l'intensité du rayonnement et de son type (neutrons lents ou rapides) ;
- de la durée d'exposition ;
- de la nature des matériaux constituant le couple (section efficace de capture des neutrons).

Tableau 6 – Influence des neutrons sur la composition des éléments de couple thermoélectrique

Composition (%)											
Matériau	Al	Si	Mn	V	Cr	Fe	Co	Ni	Cu	Zr	Zn
Chromel	–	0,36	–	–	9,58	–	–	89,87	–	–	–
Après 10 ans	–	0,36	–	0,14	9,43	–	–	89,76	0,10	–	–
Alumel	1,6	0,74	3,35	–	–	0,02	0,33	95,20	0,04	–	–
Après 10 ans	1,59	0,75	2,21	–	–	1,16	0,22	95,19	0,14	–	–
Fer	–	–	–	–	–	100	–	–	–	–	–
Après 10 ans	–	–	0,22	–	–	99,77	0,01	–	–	–	–
Cuivre	–	–	–	–	–	–	–	–	100	–	–
Après 10 ans	–	–	–	–	–	–	–	5,04	89,92	–	5,02
Cuivre Nickel	–	0,05	0,96	–	–	0,20	–	45,01	55,10	–	–
Après 10 ans	–	0,05	0,63	–	–	0,53	–	47,73	49,59	2,77	–

Composition (%)								
Matériau	Pt	Rh	Pd	Au	Hg	W	Re	Os
Platine	100	–	–	–	–	–	–	–
Après 10 ans	98,5	–	–	0,32	0,92	–	–	–
Platine rhodié	90	10	–	–	–	–	–	–
Après 10 ans	88,33	0,12	9,88	0,29	0,83	–	–	–
Tungstène	–	–	–	–	–	100	–	–
Après 10 ans	–	–	–	–	–	81,02	6,51	12,37
W 26 % Re	–	–	–	–	–	74	26	–
Après 10 ans	–	–	–	–	–	59,95	7,12	32,93

Le tableau 6 montre l'influence des neutrons (10^{14} neutrons par cm^2) sur la composition des couples thermoélectriques en métaux communs, en platine rhodié et en alliages de tungstène

3. Construction des capteurs thermoélectriques

3.1 Fabrication d'un couple thermoélectrique au laboratoire [9]

Le montage le plus simple d'un couple thermoélectrique est celui obtenu à partir de deux conducteurs de coefficients de Seebeck différents insérés dans une gaine isolatrice (bifilaire). La jonction de mesure appelée « **soudure chaude** » est obtenue à l'une des extrémités en soudant les deux conducteurs entre eux. Le brasage ou la torsion des fils pour obtenir cette jonction est possible mais de moins bonne qualité (figure 11).

À l'autre extrémité, les conducteurs sont raccordés un à un à des fils de cuivre afin de former la **jonction de référence** ou **soudure froide**. Le raccordement peut s'effectuer par soudage, par brasage à l'argent ou par torsion consolidée par serrage mécanique. La jonction de référence ainsi réalisée est prête à être immergée dans de la glace fondante (figure 12).

Notons que ce montage simple est surtout utilisé dans les laboratoires et ne se prête pas à un usage industriel, à cause notamment de la difficulté de maintenir le bain de glace fondante. L'utilisation de ce montage pour les mesures de température nécessite, en outre, la connexion d'un appareil de mesure (voltmètre par exemple) comme décrit figure 13.

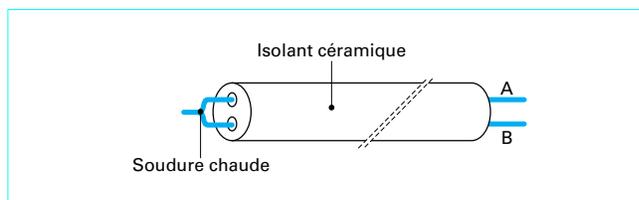


Figure 11 – Capteur à couple thermoélectrique

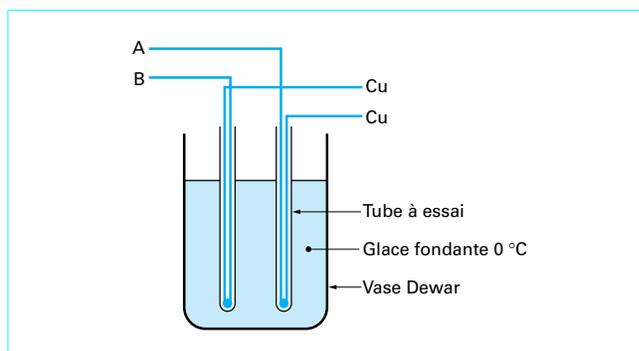


Figure 12 – Jonction de référence à bain de glace fondante

3.2 Montage industriel

À la différence du montage de type « laboratoire », les couples thermoélectriques destinés à des mesures industrielles sont munis d'une tête de raccordement prolongée de câbles de compensation ou d'extension permettant leur raccordement à une jonction de référence (boîte de soudure froide).

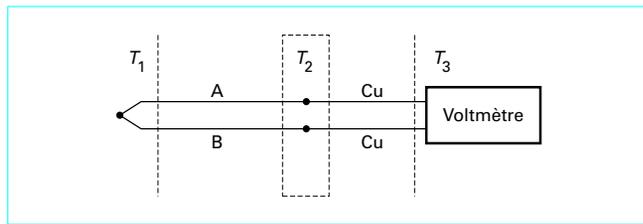


Figure 13 – Chaîne de mesure à couple thermoélectrique

3.3 Sondes à couple thermoélectrique

Les couples thermoélectriques industriels se présentent le plus souvent sous forme de **sonde** appelée parfois **canne pyrométrique**. Il s'agit d'un couple thermoélectrique comparable à celui de la figure 11 inséré dans un doigt de gant muni d'une tête de raccordement. L'isolation de la gaine par rapport au couple n'est pas toujours assurée, le contact entre le couple et la gaine permettant d'améliorer le contact thermique et donc le temps de réponse du capteur (figure 14).

3.4 Couple thermoélectrique chemisé

Une autre forme de construction des couples thermoélectriques consiste à noyer les deux conducteurs dans une poutre isolante minérale compactée au sein d'une gaine métallique (figure 15). Le mode de fabrication permet de fournir des couples chemisés dans une grande variété de diamètres et de longueurs (parfois plusieurs centaines de mètres).

3.5 Isolants pour couples thermoélectriques

Il existe plusieurs natures et plusieurs formes d'isolateurs pour couples thermoélectriques. Ces isolateurs sont, dans la plupart des cas, constitués de céramiques réfractaires (en général l'alumine Al_2O_3). Ils se présentent sous forme de **bifilaires** ou de **perles**, munis d'un ou de plusieurs trous permettant le passage des conducteurs constituant le capteur thermoélectrique.

Le tableau 7 décrit la liste des matériaux utilisés avec leur température maximale d'emploi.

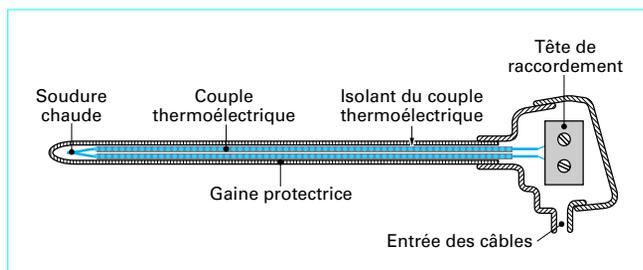


Figure 14 – Sonde à couple thermoélectrique

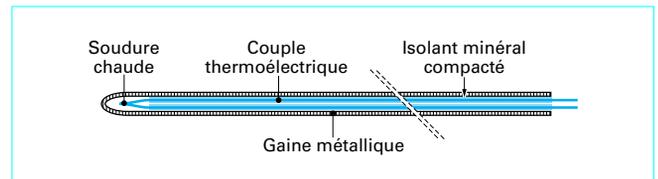


Figure 15 – Couple thermoélectrique chemisé

Tableau 7 – Isolants utilisés dans la fabrication des couples thermoélectriques et températures maximales d'emploi

Matériau	Température maximale d'emploi
Alumine (Al_2O_3)	1 540 °C à 1 640 °C
Silicate d'aluminium (60 % Al_2O_3 , 40 % SiO_2)	1 400 °C
Mullite (72 % Al_2O_3 , 28 % SiO_2)	1 500 °C
Oxyde de béryllium (BeO)	2 300 °C
Magnésie (MgO)	1 650 °C
Thorine (1) (98 % ThO_2)	2 500 °C
Quartz (SiO_2)	1 100 °C

(1) Cet isolant est aujourd'hui peu utilisé, compte tenu des propriétés radioactives de la thorine et des dangers d'empoisonnement liés à l'usage de cette substance. Il reste cependant utilisé pour les couples thermoélectriques en alliages de tungstène et de rhénium.

3.6 Gains protectrices pour couples thermoélectriques

Les gaines de protection des couples thermoélectriques ont pour rôle d'isoler les conducteurs de l'influence que pourrait avoir le milieu d'utilisation. En outre, elles assurent un rôle de protection mécanique. Ces gaines sont constituées de différents matériaux dont le choix dépend du type de couple thermoélectrique, de la température maximale d'emploi et des conditions d'utilisation. On peut citer :

- les **gaines en acier allié** qui contiennent en général les éléments suivants : Cr, Ni, Si, Al et Mn ;
- les **gaines en métaux spéciaux ou précieux** (Pt, Pt-Ir, Pr-Rh, Ag, Ta, Mo, Nb, Re) qui sont utilisées pour des usages spécifiques à haute température ;
- les **gaines non métalliques** à base de **céramiques réfractaires** utilisées à haute température en atmosphère oxydante (alumine par exemple).

4. Jonction de référence

La f.é.m. générée par un couple thermoélectrique dépend à la fois de la température T_c de la jonction placée au point de mesure, du profil de température appliqué et de la température T_{ref} de sa jonction de référence. Nous avons vu que l'emploi d'un bain de glace

fondante était pénalisant pour des mesures industrielles. Trois cas peuvent être envisagés :

- la jonction de référence est maintenue à 0 °C par un autre moyen que le bain de glace fondante ;
- la jonction de référence est maintenue à une température constante mais différente de 0 °C ;
- la jonction de référence est placée à température variable, généralement à la température ambiante.

4.1 Jonction de référence à 0 °C (boîte de soudure froide)

Outre l'utilisation du bain de glace fondante déjà signalée, cette température peut être obtenue avec une bonne justesse dans des enceintes spécifiques régulées et refroidies par **effet Peltier**. Le fonctionnement correct de ces dispositifs, couramment appelés **boîtes de compensation de soudure froide pour couple thermoélectrique**, est assuré dans une plage limitée de température de 0 °C à 50 °C environ (figure 16).

4.2 Jonction de référence à une autre température que 0 °C (boîte de soudure tiède)

Compte tenu des limites d'utilisation des boîtes de compensation de soudure froide, il peut s'avérer nécessaire d'utiliser des boîtes de jonction fonctionnant à une autre température, généralement supérieure à la température ambiante. Dans ce cas, la connaissance de la température de la boîte de jonction appelée **boîte de soudure tiède** permet, en utilisant la fonction de référence du couple thermoélectrique considéré, de déterminer la température de la jonction de mesure.

En effet, la loi des températures successives énoncée au paragraphe 1.132 permet d'écrire :

$$E_{T_{0^{\circ}\text{C}}}^{T_C}(A, B) = E_{T_{0^{\circ}\text{C}}}^{T_{\text{ref}}}(A, B) + E_{T_{\text{ref}}}^{T_C}(A, B)$$

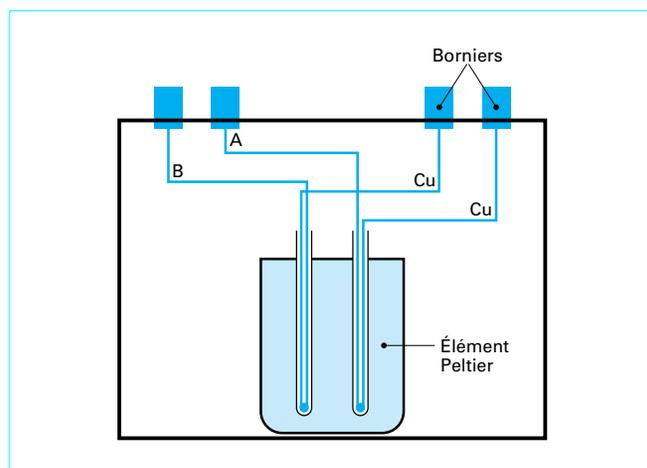


Figure 16 – Boîte de compensation de soudure froide pour couple thermoélectrique

4.3 Jonction de référence à une température variable (température ambiante)

La mesure de la température ambiante T_a (ou, plus précisément, la température des connexions de la jonction de référence du couple thermoélectrique) nous permet, en utilisant de nouveau la loi des températures successives, de déterminer la température de la jonction de mesure au moyen de la fonction de référence du couple thermoélectrique.

Cependant, il existe des circuits électroniques appelés **corrections de soudure froide** qui délivrent automatiquement une tension qui, ajoutée à celle délivrée par le couple, compense l'effet de la température ambiante. La température ambiante est alors mesurée grâce à une thermistance, une diode ou une sonde à résistance.

5. Méthodes de mesure de la f.é.m.

Pour connaître avec justesse et une incertitude minimale la f.é.m. Seebeck dont un couple thermoélectrique est le siège, il est nécessaire de minimiser la chute ohmique de tension due à la circulation d'un courant dans les conducteurs formant le couple. La résistance de ces conducteurs est en général mal connue, car elle dépend de la température ambiante d'une part, et de la température à mesurer d'autre part. Deux méthodes sont généralement utilisées :

- la **mesure avec un millivoltmètre** qui permet de minimiser la chute ohmique si sa résistance interne est élevée ;
- la **mesure par une méthode d'opposition** qui autorise une mesure **rigoureuse** puisque, dans ce cas, le courant traversant le couple thermoélectrique est théoriquement annulé.

5.1 Mesure de la f.é.m. avec un millivoltmètre

Les résistances R_X , R_L et R_T (figure 17) sont respectivement la résistance interne du millivoltmètre, celle des fils de liaison et celle des conducteurs A et B du couple thermoélectrique.

Soit $E_{T_{\text{ref}}}^{T_C}(A, B)$ la f.é.m. générée par le circuit thermoélectrique lorsque la jonction de référence du couple (A,B) est à la température T_{ref} et lorsque la jonction de mesure est à la température T_C . Soit I le courant dans le circuit thermoélectrique lorsqu'on connecte celui-ci à un millivoltmètre de résistance interne R_X . La tension V_m mesurée par ce millivoltmètre s'écrit :

$$V_m = E_{T_{\text{ref}}}^{T_C}(A, B) - (R_T + R_L) \cdot I$$

$$E_{T_{\text{ref}}}^{T_C}(A, B) = V_m \left(1 + \frac{R_T + R_L}{R_X} \right)$$

Les incertitudes sur la connaissance de R_T et R_L nous amènent à réduire leur influence en choisissant $R_X \gg R_L$.

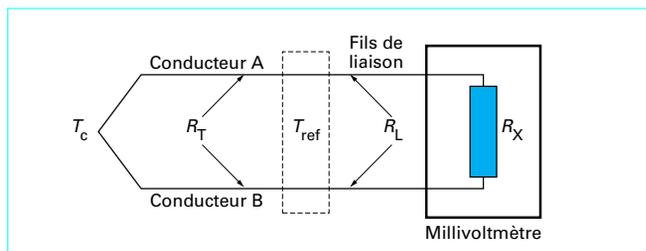


Figure 17 – Méthode de mesure avec millivoltmètre

Exemple : pour un couple platine-or de longueur 1 500 mm porté à 900 °C et relié à un millivoltmètre de marque Keithley et de type 181 au moyen de fils de cuivre de longueur 1 000 mm, nous avons $R_X \approx 10^9 \Omega$ et $R_T + R_L \approx 200 \Omega$ soit :

$$E_{T_{ref}}^{T_c}(A,B) = V_m(1 + 2 \cdot 10^{-7}).$$

La tension affichée par le millivoltmètre est donc très voisine de la f.é.m. générée par le couple thermoélectrique.

5.2 Mesure de la f.é.m. par méthode potentiométrique

Une autre méthode (**méthode potentiométrique**) consiste à comparer la tension générée par le couple thermoélectrique avec la tension aux bornes d'une résistance variable parcourue par un courant connu. Lorsque les deux tensions sont égales, l'équilibre du dispositif est atteint, et la tension du couple est alors déterminée. L'égalité de la f.é.m. du couple et de la tension générée en opposition est constatée soit par un galvanomètre dans les appareils à réglage manuel, soit électroniquement dans les dispositifs automatiques (figure 18).

6. Câble de compensation et câble d'extension

Les câbles de prolongation des couples thermoélectriques utilisés doivent avoir le même comportement thermoélectrique que le couple considéré dans le domaine des températures ambiantes. En effet, comme on intercale des fils de prolongation (A',B') entre le couple (A,B) et la jonction de référence, leur effet doit être négligeable sur la f.é.m. mesurée. Celle-ci doit être aussi proche que possible de la f.é.m. délivrée par le couple en l'absence de câble de prolongation. Les câbles de prolongation (A',B') sont appelés, selon leur nature, **câble d'extension** ou **câble de compensation** (figure 19).

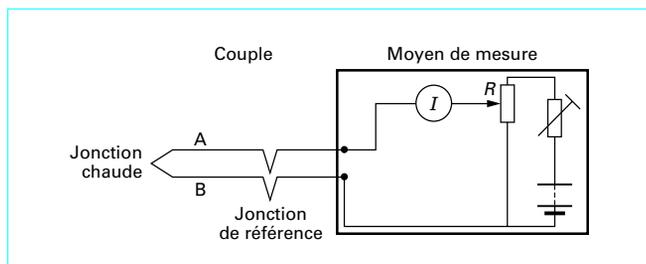


Figure 18 – Méthode de mesure potentiométrique

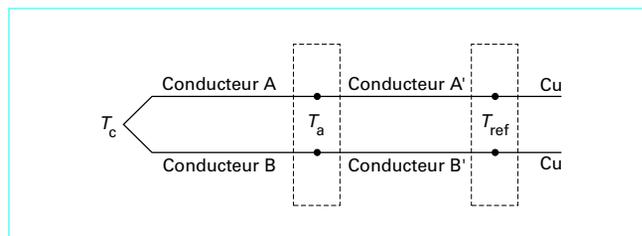


Figure 19 – Montage avec câble d'extension ou de compensation (A', B')

6.1 Définitions

Deux solutions sont possibles dans le choix de la nature des câbles :

- soit l'emploi de câbles souples de même nature que les conducteurs du couple considéré, dans ce cas les câbles sont appelés **câbles d'extension** ;
- soit l'emploi de câbles fabriqués avec d'autres matériaux mais qui possèdent un comportement thermoélectrique similaire au couple auquel ils sont connectés. Ces câbles sont alors appelés **câbles de compensation** ;

Les câbles de compensation sont surtout utilisés pour les couples en métaux précieux pour lesquels des câbles d'extension seraient très onéreux. L'utilisation de câbles de compensation peut être privilégiée pour d'autres raisons : ainsi, les câbles de compensation correspondant au couple de type K possèdent un conducteur en cuivre, ce qui limite le nombre de jonctions de référence. On peut ajouter que la résistance de boucle de ce type de câbles de compensation est inférieure à celle des conducteurs de type K.

6.2 Erreurs provenant de l'utilisation de câbles de compensation ou d'extension

La première erreur qui peut survenir est l'**inversion des polarités** dans l'utilisation d'un câble de compensation. Il est difficile de commettre cette erreur si l'on utilise des connexions avec détrompeurs ou si l'on vérifie la concordance des câbles grâce au code de couleurs normalisé.

L'autre type d'erreur est appelé **erreur de concordance**. Les câbles de compensation ont, comme on l'a vu, un comportement thermoélectrique comparable au couple thermoélectrique considéré mais seulement dans un domaine restreint de température.

Dans le cas de l'échauffement de la tête de connexion d'un couple au-delà d'une température maximale limite, un câble de compensation pourra provoquer une erreur importante sur les mesures, car celui-ci ne suit pas tout à fait la loi de conversion du couple qu'il est censé simuler. L'erreur est d'autant plus importante que l'on s'éloigne de la température ambiante. La figure 20 illustre la différence entre les résultats d'étalonnage d'un couple thermoélectrique de type N (conducteurs en nicrosil et en nisol) et celui d'un couple formé avec les conducteurs positif et négatif du câble de compensation.

7. Normalisation des couples thermoélectriques

Plusieurs familles de normes concernent les couples thermoélectriques.

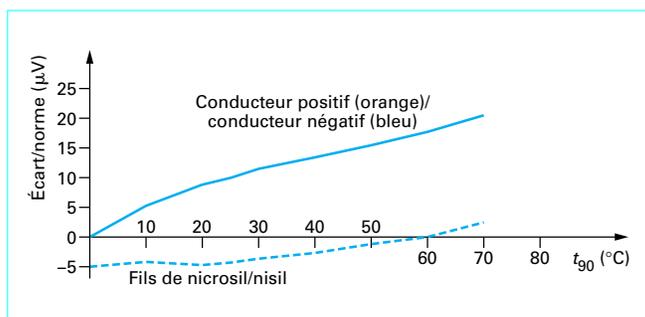


Figure 20 – Exemple d’erreur de concordance entre les propriétés thermoélectrique d’un couple nicrosil/nisil (type N) et son câble de compensation [10]

7.1 Normes concernant les tables de référence des couples thermoélectriques

Les « tables de référence » présentées au paragraphe 2.2 font l’objet de normes nationales et internationales. Elles reprennent, sous la forme de polynômes et de tables de conversion, les relations liant la f.é.m. d’un couple thermoélectrique de type particulier avec la température.

Notons que la mise en place de l’Echelle Internationale de Température de 1990 (EIT 90) a eu pour répercussion le changement des tables de référence. L’ensemble des tables normalisées rédigées avant 1990 a donc dû être dernièrement révisé car ces tables exprimaient la température dans l’ancienne échelle de température EIPT-68 (Echelle internationale pratique de température de 1968).

7.2 Normes définissant des tolérances d’interchangeabilité

Ces normes définissent des tolérances concernant les couples thermoélectriques, les câbles d’extension et les câbles de compensation. Ces tolérances sont des **tolérances dites d’interchangeabilité**. Elles précisent la dispersion maximale de la courbe d’étalonnage autour de la fonction de référence.

7.3 Normes définissant les codes de repérage et les caractéristiques des capteurs

Ces normes définissent des **codes de repérage** des couples et des câbles d’extension ou de compensation. Ces codes de repérage sont, en général, basés sur des choix de couleurs pour identifier le couple ou le câble, le conducteur positif et le conducteur négatif. Ainsi, la norme internationale IEC 584-3 (1989) et son équivalent NF C 42-324 (1993) définissent les codes de couleur indiqués sur le tableau 8.

D’autres normes définissent certaines caractéristiques techniques ou géométriques des couples thermoélectriques, des gaines protectrices ou des isolants ainsi que certains essais de type pour vérifier ces caractéristiques.

Tableau 8 – Codes de couleur des couples thermoélectriques

Type de couple thermoélectrique	Code de couleur international
K	Vert (+) Blanc (-)
S	Marron (+) Blanc (-)
T	Noir (+) Blanc (-)
J	Orange (+) Blanc (-)

(+) = conducteur positif
(-) = conducteur négatif

8. Incertitudes sur la mesure de la f.é.m. générée par un couple thermoélectrique

Considérons un couple thermoélectrique dont la jonction de mesure est portée à la température T_c et dont la jonction de référence est à la température de la glace fondante (0°C). Lorsqu’on mesure, au moyen d’un voltmètre numérique, la f.é.m. générée par ce capteur, le signal obtenu à la sortie du convertisseur analogique/numérique est constitué de la superposition d’un signal utile et de signaux parasites. Le signal utile est la valeur de la f.é.m. associée à la température de la jonction de mesure lorsque la jonction de référence est à 0°C . Les signaux parasites introduisent un décalage entre la valeur vraie de la f.é.m. et la valeur mesurée. Ces signaux sont donc à l’origine de l’incertitude sur la valeur de la f.é.m. associée à la température de la jonction de mesure. Il est à noter que les composantes d’incertitude présentées ici sont celles relatives à la mesure de la f.é.m. associée à la température de la jonction de mesure. D’autres composantes d’incertitude d’origine thermique doivent être prises en compte pour estimer l’incertitude sur la mesure de la température du milieu où se trouve le capteur.

8.1 Signaux parasites aléatoires

Ces deux signaux peuvent être générés par le capteur (bruit thermique) et par le voltmètre numérique (bruit thermique, bruit de grenaille, bruit de quantification). Les sources de bruit peuvent également être localisées à l’extérieur du système. Ainsi, les équipements électriques placés au voisinage du capteur ou du dispositif de mesure associé sont souvent à l’origine de parasites électromagnétiques [7].

8.11 Bruit thermique généré par le capteur

Considérons un capteur thermoélectrique dont la jonction de mesure est portée à une température supérieure à la température ambiante et dont la jonction de référence est maintenue à 0 °C. L'agitation thermique des électrons libres de tout élément conducteur engendre, aux bornes de celui-ci, une tension aléatoire qui se superpose à la tension générée par effet Seebeck. La valeur quadratique moyenne du bruit thermique aux bornes d'une résistance est donnée par la **formule de Nyquist** :

$$\sigma_n^2 = 4kTRB$$

avec k constante de Boltzmann ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K),

T température absolue de la résistance (K),

R valeur de la résistance (Ω),

B bande passante du dispositif de mesure (Hz).

Le schéma équivalent d'un élément de conducteur bruyant dont les extrémités sont soumises à une différence de température est présenté figure 21.

La f.é.m. générée par un élément de conducteur est, par conséquent, égale à la somme d'une f.é.m. continue dE (f.é.m. de Seebeck) et d'une f.é.m. aléatoire (f.é.m. de bruit) dont la valeur a pour expression :

$$dE_n = \sqrt{4kTRB}$$

La figure 22 montre que la f.é.m. générée par le capteur est égale à la somme d'une f.é.m. continue dE (f.é.m. de Seebeck) et d'une f.é.m. aléatoire (f.é.m. de bruit). La valeur efficace de la f.é.m. de bruit est donnée par la formule suivante :

$$E_n^2 = 4kB \int_{\approx} T(x) \cdot r(x) \cdot dx$$

Nous pouvons, par conséquent, constater que la valeur efficace de la f.é.m. de bruit dépend non seulement des températures de la jonction de mesure et de la jonction de référence **mais également de la distribution de température** dans les deux conducteurs entrant dans la constitution du couple thermoélectrique.

8.12 Bruit thermique et bruit de grenaille générés par le dispositif de mesure

L'agitation des électrons libres des éléments résistifs entrant dans la constitution du dispositif de mesure engendre un bruit thermique. Les fluctuations statistiques du nombre de porteurs de charges (électrons et trous) qui participent à la création d'un courant en traversant la barrière de potentiel de toute jonction PN engendrent un courant aléatoire qui se superpose au courant moyen créé. Ce courant aléatoire est appelé **bruit de grenaille**.

8.13 Bruit de quantification (résolution de l'appareil de mesure) [11]

Le signal, à la sortie du convertisseur analogique/numérique, peut être considéré comme résultant de la superposition du signal d'entrée et d'un signal aléatoire appelé **bruit de quantification**. Dans le cas d'une quantification uniforme par arrondi, on peut montrer que la variance du bruit de quantification est :

$$\sigma^2 = q^2/12$$

Dans cette formule, q est le pas de quantification.

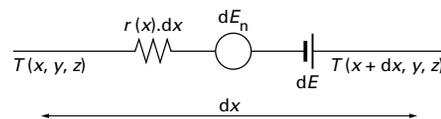


Figure 21 – Schéma électrique équivalent d'un élément de conducteur

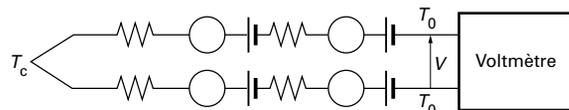


Figure 22 – Schéma électrique d'un couple thermoélectrique bruyant

Ainsi, pour un nanovoltmètre ayant une résolution de 0,1 μ V, l'effet du bruit de quantification peut être estimé par une incertitude-type (1σ) valant :

$$\sigma = \sqrt{\frac{(0,1 \cdot 10^{-6} \text{ V})^2}{12}} = 30 \text{ nV}$$

8.14 Parasites électromagnétiques

L'influence d'un champ électrique peut être supprimée en utilisant un écran protecteur (tube de protection raccordé à la terre de l'instrument de mesure). La présence de champ magnétique intense affecte les couples constitués de matériaux ferromagnétiques. En présence d'un champ de ce type, il est difficile d'en supprimer l'effet sur les mesures, le seul moyen est d'utiliser des couples en matériaux non ferreux comme le cuivre, le nickel-cuivre ou le platine par exemple.

En présence d'un champ magnétique alternatif, le couple thermoélectrique se comporte comme une boucle inductive. L'ampleur de ce phénomène dépend de la nature du champ magnétique et de l'aire exposée de la boucle formée par le couple thermoélectrique. La f.é.m. induite au sein du couple sera d'autant plus petite que l'aire de la boucle exposée au champ magnétique sera faible. La f.é.m. générée au sein du capteur par ce phénomène est alternative et n'a pas pour conséquence une erreur significative si les mesures sont effectuées en tension continue ; d'autre part, beaucoup d'instruments de mesure corrigent l'effet du courant alternatif induit dans les capteurs. Un moyen de limiter le phénomène est de **torsader les fils de couple** afin de réduire la f.é.m. induite (1 à 5 torsades par cm, ce nombre augmente avec la fréquence du champ), l'utilisation d'un filtre passe-bas améliore encore les mesures (figure 23).

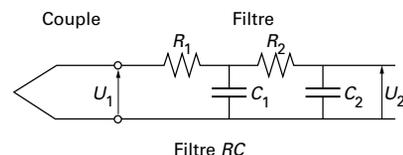


Figure 23 – Limitation des erreurs dues à des parasites électromagnétiques dans un couple thermoélectrique (utilisation d'un filtre passe-bas)

8.15 Valeurs efficaces estimées des signaux aléatoires qui se superposent à la f.é.m. Seebeck

Les valeurs efficaces des différents bruits qui se superposent à la f.é.m. de Seebeck générée par un capteur thermoélectrique platine-palladium sont regroupées dans le tableau 9. Nous supposons que la jonction de mesure du capteur est portée à la température de fusion de l'argent, soit 961,78 °C et que la jonction de référence est maintenue à 0 °C. Le dispositif de mesure associé au capteur est un nanovoltmètre de marque Keithley et de type 181.

Tableau 9 – Valeurs efficaces des bruits qui se superposent à la f.é.m. Seebeck (couple platine-palladium)

Bruit	Valeur efficace
Bruit thermique généré par le capteur thermoélectrique	1 nV
Bruit thermique et bruit de grenaille générés par le dispositif de mesure	45 nV
Bruit de quantification généré par le convertisseur A/N	30 nV

8.2 Signaux parasites déterministes

8.21 Erreur liée à la circulation d'un courant électrique dans le capteur

Le capteur thermoélectrique associé au dispositif de mesure dont la résistance d'entrée est R_e peut être représenté par la figure 24.

Lorsque le courant dans le capteur est nul, la tension à l'entrée de la chaîne de mesure est égale à la f.é.m. de Seebeck E . Si, en revanche, un courant circule dans le capteur, la tension à l'entrée du dispositif de mesure a pour expression :

$$V = E - V \cdot \frac{R_T + R_L}{R_e}$$

avec R_e résistance d'entrée de la chaîne de mesure,

R_T somme des résistances des deux conducteurs entrant dans la constitution du capteur,

R_L résistance des fils de connexion du capteur.

La différence entre la tension appliquée à la chaîne de mesure et la f.é.m. générée par le capteur est l'erreur sur la f.é.m. liée au passage d'un courant dans le circuit thermoélectrique. Cette erreur a pour expression :

$$\Delta E = V \cdot \frac{R_T + R_L}{R_e}$$

Cette erreur est d'autant plus importante que les fils de connexion sont longs. Pour la minimiser, on choisit une chaîne de mesure dont la résistance d'entrée est très grande devant la résistance totale du circuit thermoélectrique.

8.22 Erreur liée à l'amplification de la tension de mode commun [12]

Supposons maintenant que le courant dans le capteur soit nul, la tension appliquée à l'entrée de la chaîne de mesure est égale à la

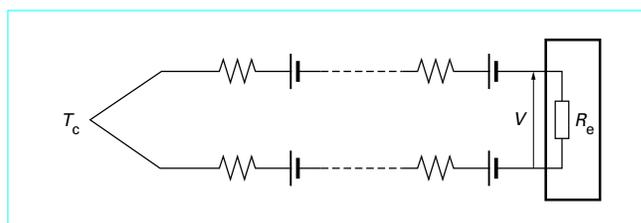


Figure 24 – Couple thermoélectrique associé à la résistance d'entrée du dispositif de mesure

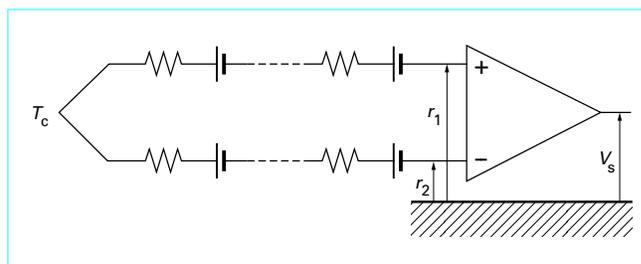


Figure 25 – Couple thermoélectrique associé à l'amplificateur différentiel du dispositif de mesure

f.é.m. de Seebeck générée par le capteur. Ce signal est en fait la différence de deux tensions. Cette différence de tension est amplifiée par l'amplificateur constituant le premier élément du dispositif de mesure. Le schéma équivalent du capteur associé à l'amplificateur différentiel est représenté figure 25.

L'amplificateur différentiel amplifie non seulement la différence entre les signaux r_1 et r_2 mais également leur valeur moyenne. Ainsi la tension, à la sortie de l'amplificateur, a pour expression :

$$V_s = A_d (r_1 - r_2) + A_c \left(\frac{r_1 + r_2}{2} \right)$$

$$V_s = A_d \left[E + \frac{A_c}{A_d} \left(\frac{r_1 + r_2}{2} \right) \right]$$

avec A_c gain de mode commun

A_d gain de mode différentiel.

La tension affichée sur le dispositif de mesure est :

$$V = E + \left[\frac{A_c}{A_d} \cdot \left(\frac{r_1 + r_2}{2} \right) \right]$$

L'erreur sur la f.é.m. liée à l'amplification du mode commun est :

$$\Delta E = \frac{A_c}{A_d} \cdot \left(\frac{r_1 + r_2}{2} \right)$$

Cette erreur est liée au taux de réjection de mode commun de l'amplificateur T_{RMC} par la relation :

$$T_{RMC} = 20 \log (A_d / A_c)$$

8.23 Erreur liée aux imperfections du convertisseur analogique/numérique [11]

Les imperfections du convertisseur analogique/numérique ont pour effet de faire dévier la caractéristique de quantification réelle de la loi idéale. Ces imperfections engendrent une erreur qui s'exprime en pourcentage de la tension appliquée.

8.24 Erreur liée aux f.é.m. parasites du circuit de mesure

Supposons maintenant que les coefficients de Seebeck des deux segments de cuivre soient différents et que, de plus, les températures des bornes du boîtier de connexion soient différentes. On note $S_C(T)$ et $S'_C(T)$ les coefficients de Seebeck des deux conducteurs de cuivre. On note T_a et T'_a les températures des deux bornes du boîtier de connexion. Le schéma équivalent du capteur associé au dispositif de mesure devient celui de la figure 26.

Les f.é.m. des générateurs élémentaires de la figure 26 sont :

$$\begin{aligned} dE_A &= S_A(T) \cdot dT \\ dE_B &= S_B(T) \cdot dT \\ dE_C &= S_C(T) \cdot dT \\ dE_{C'} &= S'_C(T) \cdot dT \end{aligned}$$

La tension appliquée à l'entrée de la chaîne de mesure a pour expression :

$$V = \int_{T_0}^{T_c} [S_A(T) - S_B(T)] dT + \int_{T'_a}^{T_0} [S'_C(T) - S_C(T)] dT$$

L'erreur sur la f.é.m. générée par le capteur, liée aux f.é.m. parasites du circuit de mesure est :

$$\Delta E = \int_{T'_a}^{T_0} [S'_C(T) - S_C(T)] dT$$

8.25 Erreur liée aux défauts d'isolement

Un défaut d'isolement d'un couple thermoélectrique aboutit à une erreur car il se crée des connexions secondaires et la soudure chaude du couple se trouve « partiellement délocalisée ». Notons que ces défauts peuvent exister à haute température sans que ceux-ci ne soient perceptibles à température ambiante. Ainsi, l'évolution de la résistivité de l'alumine utilisée pour réaliser les capteurs thermoélectriques est donnée par le tableau 10.

Tableau 10 – Résistivité électrique de l'alumine en fonction de la température	
Température (°C)	Résistivité (W.cm)
20	$> 10^{14}$
500	$1,5 \cdot 10^{11}$
1 000	$5 \cdot 10^6$
1 500	$1 \cdot 10^4$

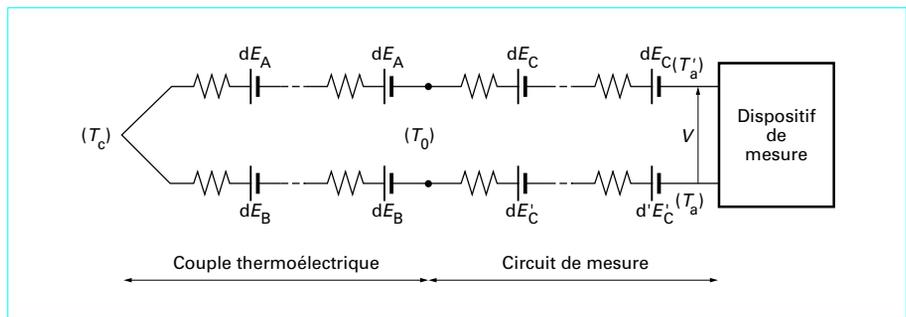


Figure 26 – Couple thermoélectrique associé au dispositif de mesure

L'imperfection de l'isolement entre deux conducteurs fait apparaître une conductance transversale $G(x)$ non nulle, variable avec la température. Le schéma équivalent du capteur associé au dispositif de mesure est représenté figure 27.

Considérons à présent le capteur élémentaire constitué de deux éléments de conducteurs différents, de longueur dx , soumis à une différence de température dT (figure 28).

L'application du théorème de Thévenin entre les bornes de la résistance d'entrée de la chaîne de mesure montre que le capteur élémentaire précédent est équivalent à un générateur de f.é.m. :

$$dE = \frac{[S_A(T) - S_B(T)] \cdot dT}{1 + G(x) \cdot r(x) \cdot dx}$$

Ainsi la f.é.m. générée par un capteur présentant un défaut d'isolement [$G(x) \neq 0$] est inférieure à la f.é.m. générée par ce capteur en l'absence de défaut d'isolement. La différence entre ces deux f.é.m. est l'erreur liée au défaut d'isolement du capteur élémentaire.

8.26 Erreur liée aux inhomogénéités des conducteurs du couple thermoélectrique

Supposons que les coefficients de Seebeck $S_A(T)$ et $S_B(T)$ des conducteurs A et B soient localement modifiés sur une distance D . Le schéma électrique équivalent du capteur inhomogène est représenté à la figure 29.

Les f.é.m. des générateurs élémentaires de la figure 29 sont :

$$\begin{aligned} dE_A &= S_A(T) \cdot dT \\ dE_B &= S_B(T) \cdot dT \\ dE'_A &= S'_A(T) \cdot dT \\ dE'_B &= S'_B(T) \cdot dT \end{aligned}$$

La tension appliquée à l'entrée de la chaîne de mesure a pour expression :

$$V = \int_{T_0}^{T_c} S(T) \cdot dT + \int_{T_1}^{T_2} [S'(T) - S(T)] \cdot dT$$

avec $S(T) = S_A(T) - S_B(T)$ et $S'(T) = S'_A(T) - S'_B(T)$.

T_1 et T_2 sont les températures des extrémités de la zone polluée. L'erreur sur la f.é.m. générée par le capteur, liée à l'inhomogénéité, est :

$$\Delta E = \int_{T_1}^{T_2} [S'(T) - S(T)] \cdot dT$$

Comme nous l'avons déjà dit, l'erreur liée à l'inhomogénéité dépend non seulement de la modification locale des coefficients de Seebeck, mais aussi de la **distribution des températures le long du capteur**.

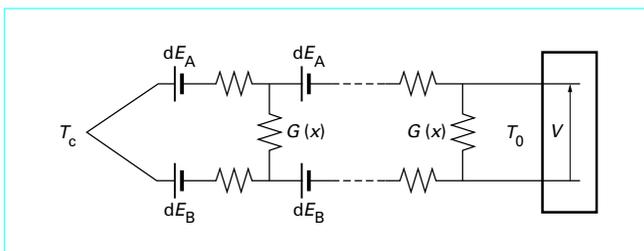


Figure 27 – Couple thermoélectrique présentant un défaut d'isolement

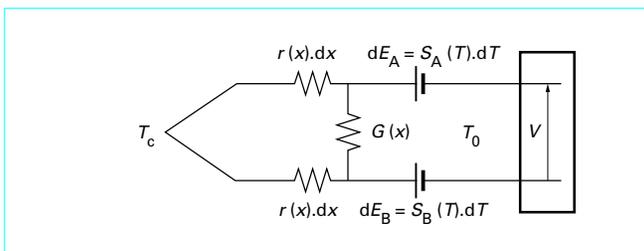


Figure 28 – Schéma électrique équivalent du capteur élémentaire présentant un défaut d'isolement

Cela signifie, par exemple, qu'un couple thermoélectrique étalonné dans un four homogène de laboratoire de métrologie ne délivrera pas forcément la même f.é.m. dans un four industriel peu homogène, pour une température identique. Une hétérogénéité dans un couple thermoélectrique peut donc être à l'origine d'un **erreur systématique**, parfois non négligeable, dans les mesures de température, bien que le couple ait été convenablement étalonné. Les erreurs liées à ces défauts sur les mesures de température sont souvent difficiles à estimer, car elles dépendent, en premier lieu, des conditions d'utilisation des capteurs. Nous verrons au paragraphe 9 les moyens mis en œuvre par les laboratoires de métrologie pour identifier et quantifier ces erreurs.

8.27 Erreur liée à l'incertitude sur la connaissance de la température de la jonction de référence

Cette erreur dépend très largement du type de jonction utilisée. Si l'utilisation d'un bain de glace fondante n'entraîne jamais d'erreur

supérieure à quelques millikelvins, l'utilisation de boîte de soudure froide à effet Peltier peut, par contre, entraîner dans certains cas des erreurs de l'ordre du dixième de kelvin.

Supposons que la jonction de référence d'un couple thermoélectrique ne soit pas maintenue à la température $T_0 = 273,15 \text{ K}$ (0 °C) mais à une température différente. Soit T'_0 cette température (figure 30).

Les f.é.m. des générateurs élémentaires de la figure 30 sont :

$$dE_A = S_A(T) \cdot dT$$

et

$$dE_B = S_B(T) \cdot dT$$

La tension appliquée à l'entrée de la chaîne de mesure a pour expression :

$$V = \int_{T_0}^{T_c} [S_A(T) - S_B(T)] \cdot dT + \int_{T_0}^{T'_0} [S_A(T) - S_B(T)] \cdot dT$$

L'erreur sur la f.é.m. générée par le capteur, liée à l'erreur sur la température de jonction de référence est :

$$\Delta E = \int_{T_0}^{T'_0} [S_A(T) - S_B(T)] \cdot dT$$

Si T_0 et T'_0 sont très voisines l'une de l'autre, nous pouvons écrire :

$$\Delta E = [S_A(T) - S_B(T)] \cdot [T'_0 - T_0]$$

8.28 Erreur liée à l'incertitude sur la température de la jonction de mesure

Cette erreur dépend essentiellement des conditions de mesure. Imputable par exemple aux fuites thermiques le long de la gaine des capteurs, cette erreur dépend de la géométrie et de la constitution des couples thermoélectriques ainsi que des conditions d'échange thermique.

Supposons que la température de la jonction de mesure soit légèrement différente de la température mesurée. Soit T_c la température mesurée et T'_c la température thermodynamique de la jonction de mesure du capteur.

Les f.é.m. des générateurs élémentaires de la figure 31 sont :

$$dE_A = S_A(T) \cdot dT$$

et

$$dE_B = S_B(T) \cdot dT$$

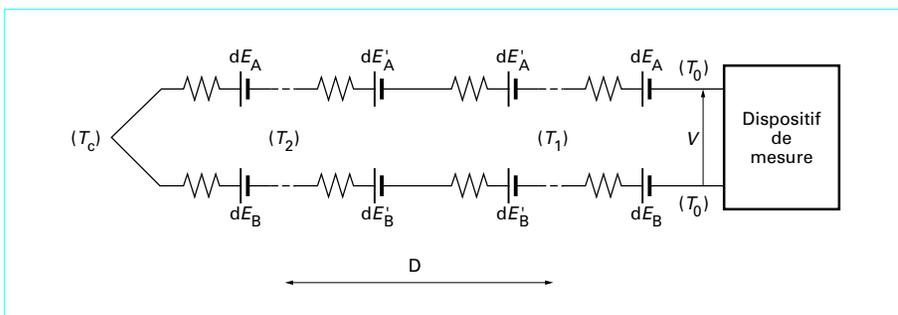


Figure 29 – Schéma équivalent du capteur inhomogène

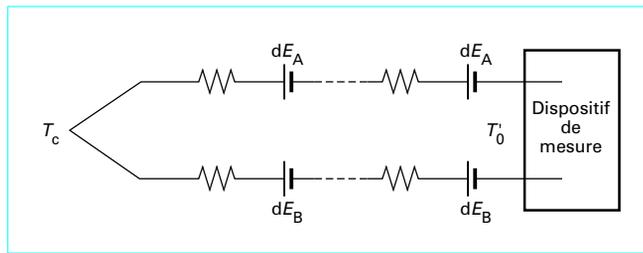


Figure 30 – Schéma équivalent du capteur : température de la jonction de référence différente de 273,15 K

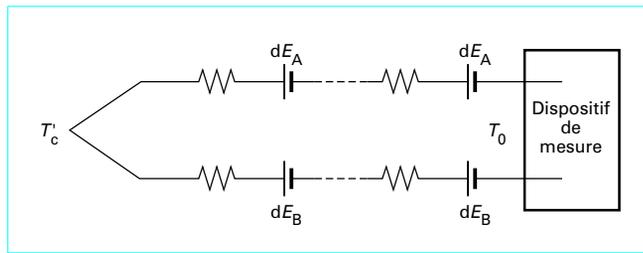


Figure 31 – Schéma équivalent du capteur : température Tc' de la jonction de mesure différente de Tc

La tension appliquée à l'entrée de la chaîne de mesure a pour expression :

$$V = \int_{T_0}^{T_c} [S_A(T) - S_B(T)] \cdot dT + \int_{T_c}^{T_c'} [S_A(T) - S_B(T)] \cdot dT$$

L'erreur sur la f.é.m. générée par le capteur, liée à l'erreur sur la température de jonction de mesure est :

$$\Delta E = \int_{T_c}^{T_c'} [S_A(T) - S_B(T)] \cdot dT$$

8.29 Application : incertitude sur la mesure de la f.é.m. générée par un couple thermoélectrique platine-palladium

On considère un couple thermoélectrique platine-palladium dont la jonction de mesure est portée à la température de fusion de l'argent (961,78 °C) et dont la jonction de référence est immergée dans un mélange eau/glace (0 °C). La mesure de la f.é.m. générée par le capteur au moyen d'un nanovoltmètre donne $E = 10,8$ mV.

L'incertitude-type (incertitude exprimée sous la forme d'un écart-type) sur cette valeur résulte :

- d'une composante de type A caractérisant la dispersion des résultats de mesure obtenus. Elle est estimée par l'écart-type expérimental ;
- de composantes de type B estimées par l'expérimentateur par d'autres méthodes que des méthodes statistiques et traitées par la suite comme des écarts-types.

La composante de type A de l'incertitude sur la valeur de la f.é.m. générée par le couple thermoélectrique platine-palladium lorsque la jonction de mesure est portée à 961,78 °C est égale à 0,1 μV. Les composantes de type B de cette incertitude sont rassemblées dans le tableau 11.

Tableau 11 – Composantes de type B de l'incertitude sur la f.é.m. générée par un couple thermoélectrique platine-palladium

Composante liée à la circulation d'un courant dans le capteur	10 nV
Composante liée à l'amplification de mode commun	0,3 nV
Composante liée aux imperfections du CAN	0,2 nV
Composante liée aux f.é.m. parasites du circuit de mesure	0,03 mV
Composante liée à l'inhomogénéité des thermoéléments	0,5 mV
Composante liée à l'incertitude sur la température de la jonction de référence	0,07 mV
Composante liée à l'incertitude sur la température de la jonction de mesure	0,1 mV

L'analyse des sources d'erreur liées au couple thermoélectrique et au dispositif de mesure de la f.é.m. nous conduit à évaluer les différentes composantes de l'incertitude sur la f.é.m. d'un couple platine-palladium. Nous pouvons constater que les principales composantes du budget des incertitudes proviennent de l'incertitude sur la température de la jonction de mesure et de l'inhomogénéité des conducteurs du couple thermoélectrique. Ceci peut être généralisé à tous les types de couples thermoélectriques. Dans certains cas, et notamment pour les couples thermoélectriques constitués de métaux communs (type K par exemple), la composante liée à l'inhomogénéité des thermoéléments peut être d'un ordre de grandeur compris entre quelques microvolts et quelques dizaines de microvolts.

9. Évaluation de l'homogénéité des couples thermoélectriques

9.1 Évaluation de l'homogénéité des éléments de couples thermoélectriques

9.11 Principe de mesure du pouvoir thermoélectrique d'un élément de conducteur

Pour mesurer le pouvoir thermoélectrique à $T + \delta T/2$ d'un échantillon de conducteur, nous réalisons deux jonctions entre l'échantillon et le conducteur de référence dont le pouvoir thermoélectrique est connu à cette température. Les deux jonctions sont respectivement maintenues aux températures T et $T + \delta T$. Nous mesurons alors la différence de potentiel entre les extrémités du conducteur de référence maintenues à la même température T_a (figure 32).

Supposons que $T < T_a < T + \delta T$, le schéma électrique équivalent du circuit de la figure 32 conduit à écrire que la différence de potentiel

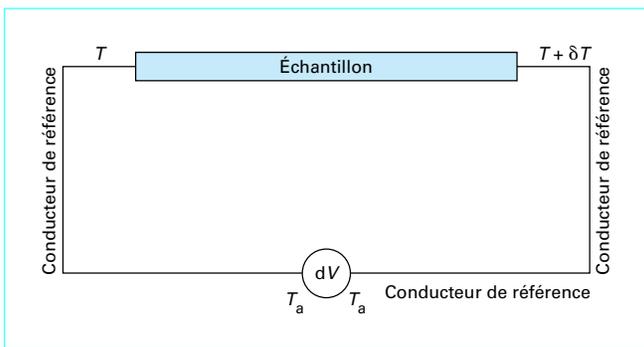


Figure 32 – Principe de la mesure du coefficient de Seebeck d'un échantillon de conducteur

entre les extrémités du conducteur de référence porté à la température T_a s'exprime par :

$$\Delta V = \int_T^{T+\delta T} [S_E(T) - S_R(T)] \cdot dT$$

avec $S_E(T) = K_E \cdot T$

et $S_R(T) = K_R \cdot T$

(indice E = échantillon, R = référence).

L'introduction de ces deux relations de proportionnalité, dans l'intégrale précédente, nous permet d'écrire :

$$\frac{\Delta V}{\delta T} = S_E\left(T + \frac{\delta T}{2}\right) - S_R\left(T + \frac{\delta T}{2}\right)$$

Ainsi le pouvoir thermoélectrique de l'échantillon de conducteur à $T + \delta T/2$ peut être déduit du coefficient de Seebeck du conducteur de référence, à partir de la mesure de la différence de potentiel entre les extrémités libres du conducteur de référence, lorsque celles-ci sont maintenues à la même température T_a .

9.12 Électronique du système de mesure

Un système de mesure du coefficient de Seebeck basé sur le principe qui vient d'être décrit a été mis au point par l'INSA de Lyon (URA CNRS 341). Ce système est utilisé par le BNM-INM. La face avant ainsi que l'électronique du système de mesure sont décrites par les figures 33 et 34.

Deux blocs d'aluminium de haute pureté A et B sont maintenus aux températures T et $T + \delta T$ au moyen d'un dispositif de régulation à microprocesseur. Le pouvoir thermoélectrique de l'aluminium utilisé est égal à $-1,42 \mu V/K$ à 293,15 K. L'incertitude sur cette valeur est égale à $0,1 \mu V/K$ à 293,15 K. On peut faire varier T et $T + \delta T$ entre 278,15 K et 293,15 K. L'incertitude sur les valeurs de T et δT est de 0,1 K.

Les extrémités de l'échantillon de conducteur dont on veut mesurer le pouvoir thermoélectrique sont fixées au bloc d'aluminium de manière à assurer un bon contact électrique. En faisant varier l'écartement des blocs, nous pouvons régler la distance séparant les jonctions échantillon/blocs. Cette distance peut ainsi être fixée à une valeur comprise entre 40 mm et 100 mm.

Deux fils d'aluminium de très haute pureté strictement identiques aux blocs A et B servent à relier ces derniers aux bornes d'un boîtier de connexion isotherme. La différence de potentiel entre les bornes de ce boîtier est notée δV . Un capteur thermoélectrique différentiel dont les jonctions sont au voisinage immédiat des jonctions échan-

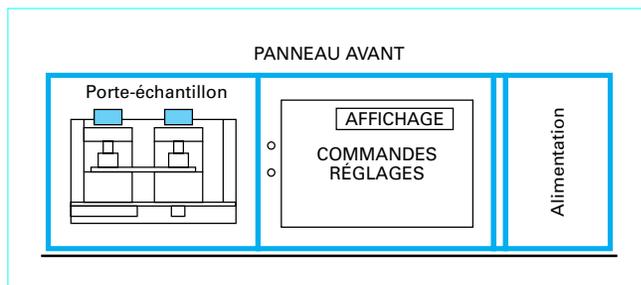


Figure 33 – Face avant du système de mesure du pouvoir thermoélectrique

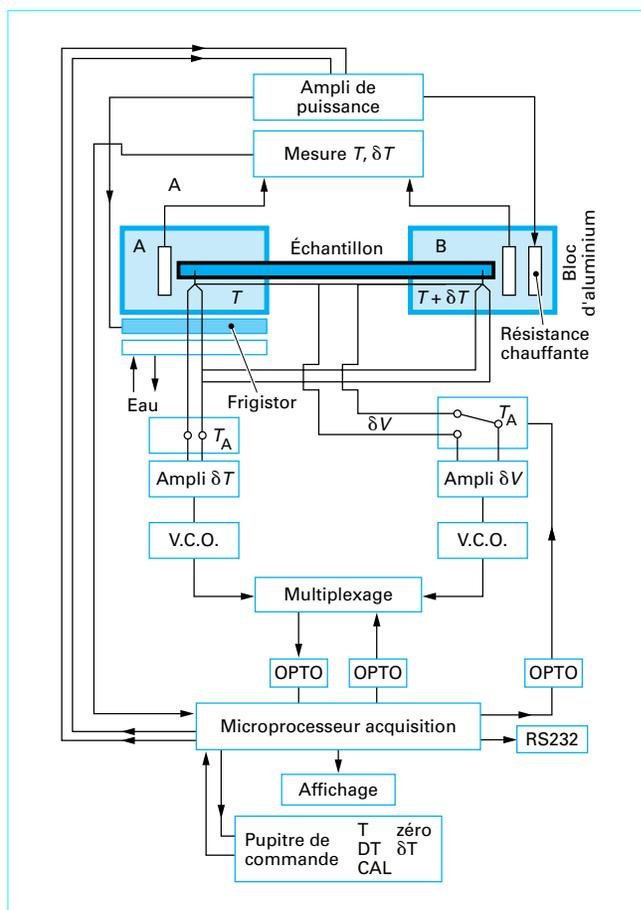


Figure 34 – Électronique du système de mesure du pouvoir thermoélectrique

tillon/blocs génère une tension proportionnelle à la différence de température δT entre les deux blocs. Deux amplificateurs fournissent des tensions respectivement proportionnelles à δV et δT . Deux oscillateurs (VCO) fournissent des signaux périodiques dont les fréquences sont proportionnelles à ces tensions. Les signaux périodiques sont envoyés vers la carte d'acquisition par l'intermédiaire d'un multiplexeur et de deux optocoupleurs. La valeur $\delta V/\delta T$ est calculée par le microprocesseur puis affichée.

Cette valeur est, comme nous l'avons démontré dans le paragraphe précédent, égale à la différence entre le pouvoir thermoélectrique de l'échantillon à $T + \delta T/2$ et le pouvoir thermoélectrique de l'aluminium à la même température :

$$\frac{\delta V}{\delta T} = S_E \left(T + \frac{\delta T}{2} \right) - S_{Al} \left(T + \frac{\delta T}{2} \right)$$

La résolution du dispositif de mesure est de 0,002 $\mu V/K$. Son exactitude est de 0,2 % de la valeur affichée.

9.13 Signaux parasites et incertitude sur la valeur du pouvoir thermoélectrique de l'échantillon

L'incertitude sur la valeur du pouvoir thermoélectrique résulte :

- de l'incertitude sur la valeur, donnée par le dispositif de mesure, de la différence entre le pouvoir thermoélectrique de l'échantillon et celui de l'aluminium de référence ;
- de l'incertitude sur la valeur du pouvoir thermoélectrique de l'aluminium de référence.

L'incertitude sur la valeur de la différence entre le pouvoir thermoélectrique de l'échantillon de conducteur et celui de l'aluminium de référence résulte :

- d'une composante de type A caractérisant la dispersion des résultats obtenus. Elle a pour origine les signaux parasites aléatoires et peut être estimée par l'écart-type expérimental ;
- de composantes de type B appréciées par l'expérimentateur et traitées comme des écarts-types. Les composantes de type B sont définies à partir de l'analyse des sources d'erreurs liées à l'électronique du dispositif de mesure.

La différence entre le pouvoir thermoélectrique du platine et de l'aluminium à 293,15 K ainsi que la différence entre le pouvoir thermoélectrique du palladium à 293,15 K ont été mesurées au moyen du dispositif décrit dans le paragraphe précédent.

Les résultats des mesures effectuées ainsi que les composantes de type A et de type B des incertitudes sur ces mesures sont rassemblés dans le tableau 12.

Tableau 12 – Différence des pouvoirs thermoélectriques entre deux conducteurs (Pt, Pd) et celui de l'aluminium. Composante des incertitudes sur ces valeurs

	Platine	Palladium
$S_E(293,15\text{ K}) - S_{Al}(293,15\text{ K})$	- 3,325 $\mu V/K$	- 8,637 $\mu V/K$
Composante liée aux signaux parasites	2 nV/K	2 nV/K
Composante liée aux imperfections du CAN	2 nV/K	6 nV/K
Composante liée à l'incertitude sur la température du bloc A	0,5 nV/K	1 nV/K
Composante liée à l'incertitude sur la différence des températures entre les blocs A et B	0,3 nV/K	0,5 nV/K

L'incertitude élargie sur une différence est obtenue en multipliant conventionnellement par $k = 2$ l'incertitude-type composée. L'incertitude-type composée est obtenue en traitant les composantes de type B du tableau précédent comme des écarts-types. Ainsi, les incertitudes entre les pouvoirs thermoélectriques du platine et de l'aluminium sont respectivement 6 nV/K et 12 nV/K.

9.14 Caractérisation de l'homogénéité d'un conducteur

Le dispositif de mesure du pouvoir thermoélectrique décrit précédemment a été utilisé pour tester successivement l'homogénéité d'un fil de platine et d'un fil d'or. Ces conducteurs ont pour longueur 1 500 mm et pour diamètre 0,5 mm. Pour effectuer ce test, nous écartons les blocs d'aluminium du dispositif de manière à pouvoir mesurer le pouvoir thermoélectrique d'échantillons de 100 mm. Une translation de chaque fil sur une longueur de 1 000 mm à partir de l'une des extrémités permet d'obtenir directement la différence entre le pouvoir thermoélectrique de chaque segment de 100 mm et le pouvoir thermoélectrique de l'aluminium.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 13.

Tableau 13 – Variation du pouvoir thermoélectrique le long d'un fil de platine et d'un fil d'or

	$[S_{Pt} - S_{Al}](293,15\text{ K})$	$[S_{Au} - S_{Al}](293,15\text{ K})$
Segment 1	- 3,325 $\mu V/K$	3,312 $\mu V/K$
Segment 2	- 3,323 $\mu V/K$	3,344 $\mu V/K$
Segment 3	- 3,323 $\mu V/K$	3,342 $\mu V/K$
Segment 4	- 3,322 $\mu V/K$	3,354 $\mu V/K$
Segment 5	- 3,324 $\mu V/K$	3,353 $\mu V/K$
Segment 6	- 3,321 $\mu V/K$	3,355 $\mu V/K$
Segment 7	- 3,323 $\mu V/K$	3,356 $\mu V/K$
Segment 8	- 3,325 $\mu V/K$	3,352 $\mu V/K$
Segment 9	- 3,322 $\mu V/K$	3,353 $\mu V/K$
Segment 10	- 3,324 $\mu V/K$	3,355 $\mu V/K$

L'incertitude sur la différence entre les pouvoirs thermoélectriques des deux segments adjacents se limite à la composante caractérisant la répétabilité des mesures effectuées. Cette composante est la composante liée aux signaux parasites aléatoires. Elle a pour valeur 2 nV (tableau 12). Par conséquent, les variations de pouvoir thermoélectrique le long du fil de platine ne sont pas significatives. En revanche, les pouvoirs thermoélectriques des trois premiers segments du fil d'or sont nettement différents des pouvoirs thermoélectriques des sept autres segments. En conséquence, le conducteur en or est inhomogène et ne doit pas être utilisé pour fabriquer un couple thermoélectrique.

9.2 Évaluation de l'homogénéité des couples thermoélectriques [13]

9.2.1 Principe de détection des défauts d'homogénéité dans un couple thermoélectrique

Considérant le modèle ci-dessous, la mise en évidence et la localisation de défauts dans les couples thermoélectriques sont possibles, à condition de maîtriser le profil de température appliqué le long du capteur en maintenant constante la température de la source chaude.

$$E = \int_{\cong} S(x, T) \cdot \vec{\nabla} T \cdot d\vec{x}$$

Partant de cette constatation, le BNM-LNE a développé un moyen de détection des hétérogénéités dans les couples thermoélectriques. La **méthode de détection** choisie consiste à balayer le couple thermoélectrique à tester avec un front thermique, les soudures du couple thermoélectrique étant maintenues à une température de 0 °C, de sorte que la f.é.m. mesurée sans application de ce front thermique ou sur un couple homogène soit nulle. Si le couple thermoélectrique à tester présente une hétérogénéité, une f.é.m. apparaît lorsque celle-ci se trouve balayée par le front thermique (figure 35).

Le front thermique est produit au moyen d'une lampe infrarouge de 500 ou de 1 000 W à miroir focalisant qui permet d'obtenir une zone de chauffe rectangulaire d'environ 10 mm sur 50 mm. En raison de la conduction, le couple thermoélectrique s'échauffe dans une zone d'environ 100 mm de longueur. Le capteur est donc refroidi de chaque côté de la zone de chauffe afin de délimiter celle-ci. Ce refroidissement est effectué par de l'air comprimé dont le débit est contrôlé au moyen de deux débitmètres. Pour déterminer les caractéristiques du front thermique vu par les capteurs, nous avons utilisé un couple thermoélectrique de même géométrie et caractéristiques que ceux testés, mais dont la soudure de référence est centrale. Dans ces conditions, avec une lampe de 1 000 W, la température maximale du profil thermique vu par un couple de type K avec une gaine en Inconel est de l'ordre de 280 °C et le gradient thermique maximal est de l'ordre de 10 °C/mm (tableau 14). Le chauffage du couple thermoélectrique étant réalisé par rayonnement, on doit noter l'influence de l'émissivité de la surface des capteurs testés sur le profil thermique effectivement appliqué au couple thermoélectrique.

Une compensation pour tenir compte de cette émissivité est donc parfois nécessaire.

Tableau 14 – Caractéristiques du front thermique appliqué par le banc du BNM-LNE

Exemples (lampe de 1000 W)	Couples thermoélectriques de type K	Couples thermoélectriques de type S
Sommet du front thermique	280 °C	250 °C
Gradient thermique moyen	4 °C/mm	3,5 °C/mm
Gradient thermique maximum	10 °C/mm	7,5 °C/mm

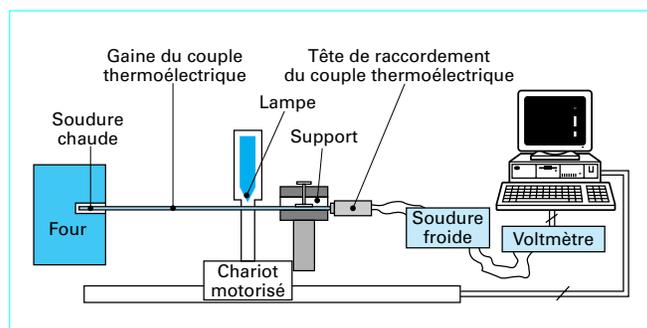


Figure 35 – Banc de détection des hétérogénéités dans les couples thermoélectriques du BNM-LNE

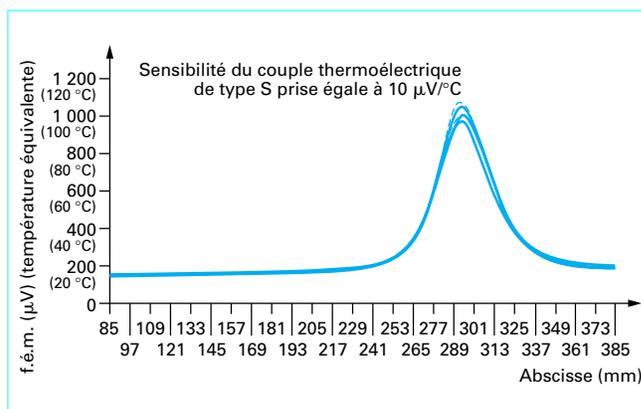


Figure 36 – Reproductibilité du front thermique appliqué par le banc de détection des hétérogénéités dans les couples thermoélectriques du BNM-LNE

La figure 36 montre les résultats de 10 mesures du front thermique appliqué, avec une lampe de 500 W, à un couple thermoélectrique de type S de 4 mm de diamètre muni d'une gaine métallique noire (correction d'émissivité). On observe que la reproductibilité des sommets du front thermique est de 125 µV soit l'équivalent de 12,5 °C (dispersion des sommets). Pour des débits d'air de refroidissement convenablement ajustés, cette valeur peut être réduite à 62 µV soit l'équivalent de 6,2 °C, et l'écart maximum de gradient thermique est de 8 µV/mm soit l'équivalent de 0,8 °C/mm.

La lampe infrarouge est déplacée à l'aide d'un chariot mobile pilotable par un ordinateur via une interface RS 232 C. Un multimètre relié à un micro-ordinateur via une interface IEEE permet, grâce à un programme spécifique, l'acquisition et la visualisation des mesures sous la forme de courbes $E = f(x)$, avec E en µV et x en mm. L'abscisse maximale de la courbe correspond à la soudure chaude du couple thermoélectrique, alors que l'abscisse $x = 0$ correspond à la tête de raccordement du couple.

9.22 Seuil de détection du banc de détection

L'inventaire des sources d'incertitude liées à la méthode de détection et leur quantification permettent de déterminer le seuil minimal théorique de détection du dispositif. Le bilan est le suivant :

- linéarité et stabilité du multimètre : négligeable ;
- résolution du multimètre : 0,03 µV ;
- connexions : 0,1 µV ;
- stabilité en température des jonctions : 0,23 µV (type S) et 0,51 µV (type K) ;
- reproductibilité du test (figure 37) : 3 µV (type S) et 0,5 µV (type K).

L'incertitude-type totale (seuil de détection) est donc de 3,1 µV, pour les couples thermoélectriques de type S, et de 0,7 µV pour les couples thermoélectriques de type K.

La caractérisation de ce banc de détection des hétérogénéités montre qu'il possède des qualités de reproductibilité qui lui confèrent les propriétés attendues, à savoir un caractère **non destructif** (il ne modifie pas l'état métallurgique des couples thermoélectriques) avec un seuil de détection suffisant pour localiser les défauts et quantifier leurs effets.

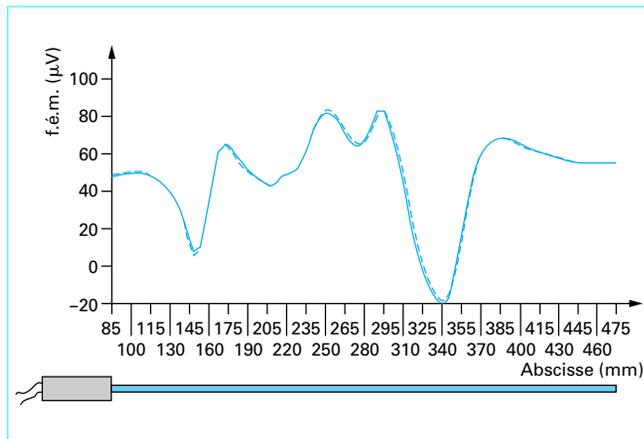


Figure 37 – Test de reproductibilité (10 balayages) pour un couple thermoélectrique de type K

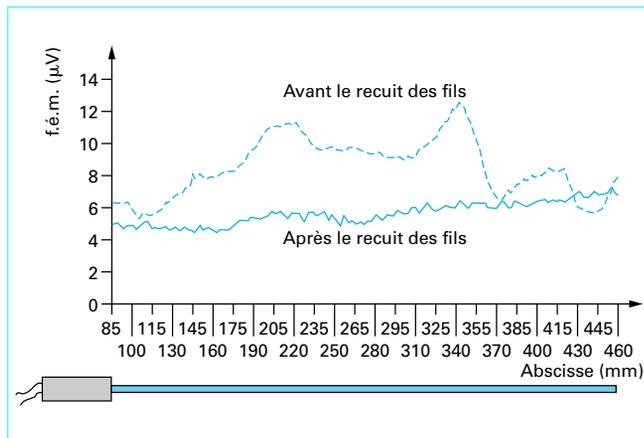


Figure 38 – Test d'homogénéité avant et après le recuit des fils d'un couple de type S par effet Joule

9.23 Exemple d'applications

Ce banc de détection des défauts d'homogénéité des couples thermoélectriques est un outil non destructif, permettant d'observer l'influence de traitements mécaniques et thermiques sur l'homogénéité des couples, et il ouvre un large éventail d'applications, notamment :

- la validation des procédures de recuit par effet Joule (figure 38) et l'optimisation des durées de traitement pour les couples platine rhodié/platine ;
- la recherche de combinaisons de traitements thermiques pour homogénéiser les couples thermoélectriques en alliages de métaux courants (procédure de recuit) ;
- l'étude de la cinétique de création des défauts d'homogénéité pour améliorer les procédures d'étalonnage ;
- l'amélioration de l'estimation de la composante d'incertitude liée aux hétérogénéités dans les couples thermoélectriques (figure 39).

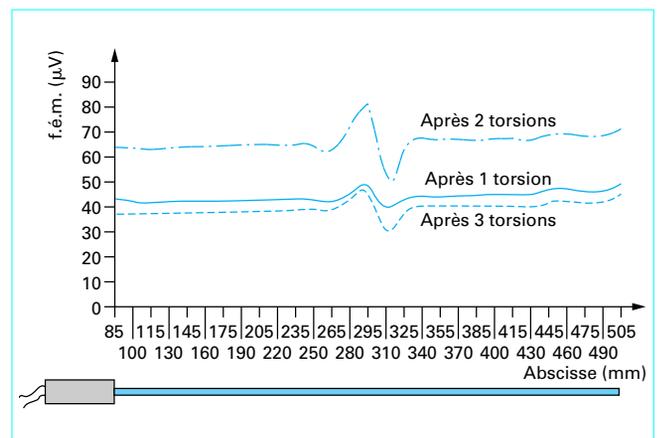


Figure 39 – Test d'homogénéité après chaque torsion à 90° appliquée sur un couple thermoélectrique de type K

Couples thermoélectriques

Caractéristiques et mesure de température

Références bibliographiques

- [1] LE POMMELEC (J.Y.) et BONNIER (G.). – *BNM-INM/CNAM, Incertitude sur la f.é.m. générée par un capteur thermoélectrique : sources d'erreurs liées au capteur et à l'électronique de la chaîne de mesure*. Bulletin du BNM n° 94, oct. 1993.
- [2] BARNARD (D.). – *Thermoelectricity in metals and alloys*. Taylors and Francis Ltd, London (1972).
- [3] ROBERTS (R.B.). – *Absolute thermopower of Pb, Co and Pt Thermophysical properties of some key solids*. Codata - Pergamon Press - Numbers 59, déc. 1985.
- [4] LAUBITZ (M.J.) et MATSUMARA (T.). – *High temperature transport properties of Palladium*. Canadian journal of physics, 196 (1972).
- [5] MATHIEU (F.) et MEIER (R.). – *Contribution à l'étude des dérives de thermocouples - électronique physique de l'effet thermoélectrique et ébauche d'une théorie élémentaire du couple hétérogène*. Centre d'étude de l'énergie nucléaire, Belgique.
- [6] Norme ANSI MC 96.1 – *Temperature Measurement Thermocouples*.
- [7] DE GROOT (M.J.), VAN SWINDEN Laboratory, Delft, Netherland ; CHATTLE (M.V.), National Physical Laboratory, Teddington, United Kingdom ; MARCARINO (P.), BATTUELLO (M.), Instituto di metrologia « G. Colonnetti », Torino, Italy – *Measurement toward the development of new standard tables for platinum-rhodium/platinum thermocouple [188] – 7th International Symposium on Temperature*, Toronto, Canada (1992).
- [8] GÔPEL (W.), HESSEL (J.) et ZEMEL (J.N.). – *Sensor a comprehensive survey*. Thermal Sensol, vol. 4, VCH (1990).
- [9] *Techniques for approximating the international temperature scale of 1990* - Bureau International des Poids et Mesures, Pavillon de Breteuil, F-92310 Sèvres (1990).
- [10] MORO (J.F.), DEVIN (E.) et MÉGHARFI (M.). – *BNM-LNE, France, Étude d'un instrument utilisé comme support d'une intercomparaison inter-laboratoire*, Bulletin du BNM n° 101, juil. 1995.
- [11] COULON (F.). – *Théorie et traitement des signaux. Traité d'électricité, d'électronique et d'électrotechnique*. Presses polytechniques romandes (1984).
- [12] TRAN TIEN (L.). – *Électronique des systèmes de mesures. Mise en œuvre des procédés analogiques et numériques*. Masson (1985).
- [13] DEVIN (E.) et MÉGHARFI (M.). – *BNM-LNE, France, Contribution de l'influence des défauts d'homogénéité des couples thermoélectriques sur l'exactitude des mesures de température*. Bulletin du BNM n° 107, avr. 1997.

Thèse

<http://www.sudoc.abes.fr>

SERIO (B.). – *Modélisation, élaboration et caractérisation de réseaux de microthermocouples or-palladium en couches minces*. Thèse de doctorat Sciences pour l'Ingénieur, Université de Franche-Comté (2000).

Normalisation

Commission électrotechnique internationale CEI

<http://www.iec.ch>

IEC 60584-1	09-95	Thermocouples - Part 1 : Reference tables.
IEC 60584-2	01-82	Thermocouples - Part 2 : Tolerances.
IEC 61515	07-95	Mineral insulated thermocouple cables and thermocouples.

Association Française de Normalisation AFNOR

<http://www.afnor.fr>

NF EN 50113	12-94	Mesure, commande, régulation. Capteurs électriques de température. Tubes isolants pour couples thermoélectriques. Indice de classement : C 46-207.
NF EN 50212	09-96	Connecteurs pour couples thermoélectriques. Indice de classement : C 42-326.
NF EN 60584-1	02-96	Couples thermoélectriques - Partie 1 : tables de référence (IDT IEC 60584-1 : 1995). Indice de classement : C 42-321.
NF EN 60584-2	07-93	Couples thermoélectriques - Deuxième partie : tolérances. (IDT IEC 60584-2). Indice de classement : C 42-322.

NF EN 61515	08-96	Câbles et couples thermoélectriques à isolation minérale dits « chemises » (IDT IEC 61615 : 1995). Indice de classement : C 42-325.
NF C 42-323	08-97	Appareils de mesurage électriques. Identification des couples thermoélectriques.
NF C 42-324	12-93	Câbles d'extension et de compensation pour couples thermoélectriques. Composition, nature des matériaux, essais de fabrication.

ASTM American Society for Testing and Materials

<http://www.astm.org>

ASTM E 230	2003	Standard Specification and Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples.
------------	------	---

Deutsches Institut für Normung eV. DIN

<http://www.din.de>

DIN EN 60584-1	10-96	Thermocouples - Part 1 : Reference tables.
DIN EN 60584-2	10-94	Thermocouples - Part 2 : Tolerances.

Fabricants

Heraeus

<http://www.heraeus.com>

Engelhard

<http://www.engelhard.com>

Leeds and Northrup**Philips**

<http://www.philips.fr>

GAGNEZ DU TEMPS ET SÉCURISEZ VOS PROJETS EN UTILISANT UNE SOURCE ACTUALISÉE ET FIABLE

Techniques de l'Ingénieur propose la plus importante collection documentaire technique et scientifique en français !

Grâce à vos droits d'accès, retrouvez l'ensemble des **articles et fiches pratiques de votre offre, leurs compléments et mises à jour,** et bénéficiez des **services inclus.**



RÉDIGÉE ET VALIDÉE
PAR DES EXPERTS



MISE À JOUR
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE
SUR TOUS SUPPORTS
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS
DANS CHAQUE OFFRE

- + de 350 000 utilisateurs
- + de 10 000 articles de référence
- + de 80 offres
- 15 domaines d'expertise

- Automatique - Robotique
- Biomédical - Pharma
- Construction et travaux publics
- Électronique - Photonique
- Énergies
- Environnement - Sécurité
- Génie industriel
- Ingénierie des transports
- Innovation
- Matériaux
- Mécanique
- Mesures - Analyses
- Procédés chimie - Bio - Agro
- Sciences fondamentales
- Technologies de l'information

**Pour des offres toujours plus adaptées à votre métier,
découvrez les offres dédiées à votre secteur d'activité**

Depuis plus de 70 ans, Techniques de l'Ingénieur est la source d'informations de référence des bureaux d'études, de la R&D et de l'innovation.

LES AVANTAGES ET SERVICES compris dans les offres Techniques de l'Ingénieur

ACCÈS



Accès illimité aux articles en HTML

Enrichis et mis à jour pendant toute la durée de la souscription



Téléchargement des articles au format PDF

Pour un usage en toute liberté



Consultation sur tous les supports numériques

Des contenus optimisés pour ordinateurs, tablettes et mobiles

SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



Questions aux experts*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



Impression à la demande

Commandez les éditions papier de vos ressources documentaires



Alertes actualisations

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

ILS NOUS FONT CONFIANCE



www.techniques-ingenieur.fr

CONTACT : Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : infos.clients@teching.com