

Mesure des températures

Éléments de choix d'une chaîne et d'une méthode de mesure

par **Jacques ROGEZ**

Ingénieur de l'École Nationale Supérieure d'Électrochimie et d'Électrometallurgie de Grenoble

Docteur ès sciences

Chercheur CNRS (Centre national de la recherche scientifique) à l'IM2NP – Institut des matériaux, de Microélectronique et des Nanosciences de Provence (Marseille)

et **Jean LE COZE**

Ingénieur civil des Mines

Docteur ès sciences

Professeur à l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

1. Critères de choix	R 2 518 – 2
2. Choix du capteur et de la chaîne en fonction du domaine de température	– 7
3. Sensibilité	– 9
4. Exactitude	– 9
5. Temps de réponse	– 9
Pour en savoir plus	Doc. R2517

Le présent article de synthèse constitue une introduction à la rubrique Thermométrie, à ce titre, il sera fait de fréquents renvois aux différents articles de cette rubrique, où sont détaillées les méthodes particulières propres à chaque capteur.

Dans le présent article, les capteurs et méthodes d'utilisation seront exposées succinctement en faisant référence aux articles spécialisés de ce traité Mesures et Contrôle.

La complexité du choix d'une chaîne de mesure est, à l'évidence, liée au nombre de contraintes imposées par l'environnement d'utilisation. La nature de l'information souhaitée et la méthode de mesure seront aussi des critères importants du choix. Chaque cas particulier aura sa réponse propre et il n'est pas possible d'envisager ici tous les cas. Beaucoup de critères de choix peuvent paraître au premier abord incongrus, comme le poids du capteur, sa couleur..., mais peuvent avoir dans certains cas leur importance. Nous essaierons ici de passer en revue les critères les plus communs en réponse aux questions précédemment posées. La réponse sera souvent un compromis dont seul l'expérimentateur pourra juger de la pertinence.

Quelques éléments de choix ont déjà été rassemblés dans l'article « Mesure des températures. Questions à se poser avant la mesure » [R 2516].

1. Critères de choix

Le choix peut simplement être guidé par la **nature du matériau** à tester. Il faut, pour cela aussi, être à l'écoute des études spécifiques réalisées. Par exemple, dans le domaine de la santé, la mesure de la température corporelle est en particulier importante chez les nouveaux-nés et chez les enfants atteints de déficiences immunitaires. La décision d'une hospitalisation peut en dépendre. La conclusion de 44 études sur plusieurs milliers de cas recommande l'emploi du thermomètre à dilatation de liquide plutôt que la thermographie infrarouge tympanique.

Le **prix**, éminemment fluctuant d'un fournisseur à l'autre, ne sera pas abordé ici, bien que certainement décisif dans le choix final. On peut cependant annoncer ceci : à performances égales, le couple thermoélectrique est moins cher que la résistance.

Les tableaux **1** et **2** résument les caractéristiques principales des différents thermomètres (sensibilité dans le tableau **1**, fidélité et exactitude dans le tableau **2**), et le tableau **3** leurs avantages et inconvénients.

Il est évident que la technique idéale consiste en l'utilisation, dans le domaine que l'on étudie, des appareils dérivés des étalons d'interpolation, c'est-à-dire construits avec les mêmes matériaux, en admettant cependant des tolérances plus larges que celles des étalons. Chacun d'eux possède un intervalle de température recommandé. Cette démarche, hautement souhaitable au laboratoire, se révèle souvent trop onéreuse et inapplicable dans la pratique industrielle à cause des contraintes spécifiques et souvent draconiennes de cette activité. Seuls les étalons d'interpolation possèdent des courbes d'étalonnage graduées selon un pas très fin, et cela grâce aux formules d'interpolation élaborées par les organismes spécialisés.

Cependant, d'autres appareillages bâtis sur le même principe ou faisant intervenir des phénomènes physiques totalement différents sont capables de rendre de meilleurs services pratiques, plus adaptés aux contraintes industrielles :

- les couples thermoélectriques nickel-chrome/nickel allié (type K) ont une sensibilité de 40 à $42 \mu\text{V.K}^{-1}$ entre 300 et 400 K , alors que ceux dérivés de l'ancien étalon Pt-Rh10 %/Pt (type S) donnent entre 6 et $11 \mu\text{V.K}^{-1}$ et coûtent beaucoup plus cher ;
- le thermocouple Pt-Rh30 %/Pt-Rh6 % ne nécessite pas de correction de soudure froide, pour un prix et une sensibilité comparables, au-delà de 1500 K , à ceux de l'étalon ;

Tableau 1 – Sensibilité du phénomène thermométrique des principaux thermomètres

Thermomètres	Principe : une variation de température se traduit par...	Sensibilité du phénomène thermométrique : valeur et commentaire	Remarques
Thermomètres à dilatation de gaz (thermomomètres)	une variation de volume ou de pression d'une masse de gaz donnée	$\frac{1}{P_0} \frac{dP}{dT} = 3,7 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ Sensibilité convenable	
Thermomètres à dilatation de liquide :			
- à enveloppe de verre - à enveloppe métallique	une variation de volume du liquide. On mesure la différence de dilatation entre le liquide et son enveloppe	$\frac{1}{V_0} \frac{dV}{dT} = \begin{cases} 0,2 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1} \text{ (mercure)} \\ 10^{-3} \text{ K}^{-1} \text{ (pentane)} \end{cases}$	Précision la meilleure avec le mercure sensibilité globale fonction du rapport : volume du bulbe/diamètre du capillaire
Thermomètres à dilatation de solide :			
- à tige - à bilame	une variation de longueur d'un solide. On mesure la différence d'allongement entre la tige et le support ou entre deux lames de nature différente soudées (bilame)	$\frac{1}{L_0} \frac{dL}{dT} = 1,5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1} \text{ (Pyros)}$ $D = 0,15 \text{ mm.K}^{-1} \text{ (bilame)}$	Pyros = alliage à 72 % Ni + (Cr, Fe, W, Mn)
Thermomètres à tension de vapeur (thermomomètres)	une variation de la pression de vapeur saturante d'un liquide qui est indépendante des volumes occupés par le liquide et la vapeur (bulbe contenant un liquide en équilibre avec sa vapeur)	$\frac{dP}{dT} = 20 \text{ kPa.K}^{-1} (0,2 \text{ atm.K}^{-1}) \text{ (aniline)}$	Non linéaire
Repères (cônes, peintures, etc.)	une réaction physico-chimique réversible ou irréversible à une température critique donnée	$\Delta = 4 \text{ K} (T < 150 \text{ }^\circ\text{C})$ $\Delta = 20 \text{ K} (T = 500 \text{ }^\circ\text{C})$ $\Delta = 30 \text{ K} (T = 1000 \text{ }^\circ\text{C})$ $\Delta = 50 \text{ K} (T = 1500 \text{ }^\circ\text{C})$	

Tableau 1 – Sensibilité du phénomène thermométrique des principaux thermomètres (suite)

Thermomètres	Principe : une variation de température se traduit par...	Sensibilité du phénomène thermométrique : valeur et commentaire	Remarques
Thermomètres à résistance métallique :			
– platine – nickel – cuivre	une variation de la résistance électrique d'un corps conducteur	$\frac{1}{R_0} \frac{dR}{dT} = \begin{cases} 3,9 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1} \text{ (platine)} \\ 6,6 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1} \text{ (nickel)} \\ 3,9 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1} \text{ (cuivre)} \end{cases}$ Plusieurs dizaines de fois plus sensible qu'un couple thermoélectrique	Interchangeabilité des résistances de platine : $\pm 0,3 \text{ K}$ (à 0°C) ou $\pm 0,7 \%$ VM ou $\pm 0,2 \%$ EM (1)
Oxydes (thermistances)	une variation de la résistance électrique d'un corps semi-conducteur	$\frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\frac{b}{T^2}$ avec $1000 < b < 4\,000 \text{ K}$ Sensibilité dix fois supérieure à celle des résistances au platine, permettant de déceler 10^{-2} K	Interchangeabilité du capteur : $\pm 10 \%$ de la valeur en ohms à 0°C
Résistances au germanium Résistances au carbone	une variation de résistance électrique d'un corps non métallique	$\frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\frac{n}{T} \text{ avec } 1 < n < 3$ $\frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -10^{-1} \text{ K}^{-1} \text{ à } 5 \text{ K (germanium)}$ $= -10^{-3} \text{ K}^{-1} \text{ à } 100 \text{ K (carbone)}$ Sensibilité élevée	Précision : $\pm 0,1 \%$ au laboratoire (germanium) Étalonnage avant chaque mesure (carbone)
Couples thermoélectriques :			
Cu/Au-Co (***) Cu/constantan (T) Ni-Cr/constantan (E) Fe/constantan (J) Ni-Cr/Ni allié (K) Pt-Rh10 %/Pt (S) Pt-Rh30 %/Pt-Rh6 % (B) Pt-Rh20 %/Pt-Rh40 % (*) Ir-Rh60 %/Ir (**) W-Re3 %/W-Re25 % (W)	l'apparition d'une f.é.m. dans un circuit comportant deux conducteurs de nature différente, lorsque cette variation est appliquée entre les deux soudures du couple ainsi formé	$d\theta/dT$ (en $\mu\text{V.K}^{-1}$) = *** : 4 à 43 (4 à 300 K) T : 17 à 60 (80 K à 350 °C) E : 27 à 80 (70 K à 600 °C) J : 24 à 58 (70 K à 600 °C) K : 40 (0 à 1 100 °C) S : 9 à 12 (200 à 1 300 °C) B : 11 (1 000 à 1 700 °C) * : 4 (1 200 à 1 800 °C) ** : 6 (1 500 à 2 000 °C) W : 18 à 8 (1 500 à 2 400 °C) Sensibilité assez faible selon le type de couple et le domaine de température	Interchangeabilité des fils : en moyenne $\pm 0,75 \%$ VM ou $\pm 3 \text{ K}$ sauf couple S $\pm 0,4 \%$ VM ou $\pm 2,5 \text{ K}$ Dérives fonctions de l'atmosphère et de la nature du milieu
Pyromètres :			
– à radiation totale (PRT) – à récepteur sélectif (PRS) – à disparition de filament (PDF) – bichromatiques (P2C)	une variation des radiations du spectre émis. Dans le PRT le spectre entier est focalisé sur un capteur de température (couple thermoélectrique, résistance...). Dans le PRS seul un domaine restreint de longueur d'onde est reçu par un convertisseur photon-électron. Dans le PDF on compare la luminance monochromatique (généralement à $0,65 \mu\text{m}$) de la source à celle d'une lampe tare dont la relation courant-température est connue. Dans le P2C on sélectionne deux longueurs d'onde et on compare leur luminance à l'aide de récepteurs photoélectriques	$\frac{1}{M} \frac{dM}{dT} = \frac{4}{T} (\text{K}^{-1}) \text{ (PRT)}$ $\frac{1}{E} \frac{dE}{dT} = \frac{n}{T} (\text{K}^{-1}) \text{ avec } 4 < n < 12 \text{ (PRS)}$ $\frac{1}{\ell_\lambda} \frac{d\ell_\lambda}{dT} = \left(\frac{c_2}{\lambda}\right) \frac{1}{T^2} (\text{K}^{-1})$ $(c_2 = 1,4388 \text{ cm.K}) \text{ (PDF)}$ $\frac{1}{X} \frac{dX}{dT} = -\frac{1}{T} (\text{K}^{-1}) \text{ (P2C)}$ La sensibilité d'un pyromètre est de $0,4 \text{ K}$ à $1\,064^\circ \text{C}$ si l'œil est le comparateur. Elle peut être dix fois supérieure avec une cellule photoélectrique	PRT et PRS peu recommandés pour des mesures absolues PDF : $\frac{1}{i} \frac{di}{dT} = \frac{1}{T} \frac{d\lambda}{dT}$ P2C : correction automatique d'émissivité
(1) Valeurs données en % de : EM étendue de mesure ; PE pleine échelle (graduation maximale) ; VM valeur mesurée.			

Tableau 2 – Fidélité et exactitude des principaux thermomètres

Thermomètres	Principe : une variation de température se traduit par...	Fidélité f (% VM) (1) ou dérive du capteur δ (K)	Exactitude (précision) du dispositif industriel complet (1) (2) valeur et commentaire
Thermomètres à dilatation de gaz (thermomomètres)	une variation de volume ou de pression d'une masse de gaz donnée	(3)	± 2 % EM Précision convenable
Thermomètres à dilatation de liquide :			
- à enveloppe de verre	une variation de volume du liquide. On mesure la différence de dilatation entre le liquide et son enveloppe	$\delta = \begin{cases} 1\text{K} (400\text{ }^\circ\text{C} ; 1000\text{ h}) \\ 0,2\text{K} (20\text{ }^\circ\text{C} ; \text{plusieurs années}) \end{cases}$	± 1 % PE (enveloppe de verre)
- à enveloppe métallique			± 2 % EM (enveloppe métallique) Les thermomètres à échelle ajustable peuvent fournir 10^{-3} K mais leur emploi est délicat
Thermomètres à dilatation de solide :			
- à tige - à bilame	une variation de longueur d'un solide. On mesure la différence d'allongement entre la tige et le support ou entre deux lames de nature différente soudées (bilame)		± 2 à 3 % EM (à tige) ± 1 à 3 % EM (bilame)
Thermomètres à tension de vapeur (thermomomètres)	une variation de la pression de vapeur saturante d'un liquide qui est indépendante des volumes occupés par le liquide et la vapeur (bulbe contenant un liquide en équilibre avec sa vapeur)		$\pm 1,5$ % EM (milieu de l'échelle) de 5 à 50 K sur la valeur cherchée
Repères (cônes, peintures, etc.)	une réaction physico-chimique réversible ou irréversible à une température critique donnée	Mesures irréversibles	± 1 % VM (sur l'étalonnage du repère)
Thermomètres à résistance métallique :			
- platine - nickel - cuivre	une variation de la résistance électrique d'un corps conducteur	$\delta = 1$ K (650 °C ; 6 000 h) (platine)	Platine : $\pm 0,5$ à 1 % VM Exactitude dix fois supérieure à celle du couple thermoélectrique jusqu'à 1 064 °C
Oxydes (thermistances)	une variation de la résistance électrique d'un corps semi-conducteur	$\delta = 10^{-2}$ K (50 °C ; 3 à 4 mois) moins bon à $T > 300$ °C	± 1 % EM
Résistances au germanium Résistances au carbone	une variation de résistance électrique d'un corps non métallique	$f = 0,03$ % VM (germanium) $f = 0,1$ % VM (carbone) (en l'absence de cyclages)	$\pm 1,5$ % EM
Couples thermoélectriques :			
Cu/Au-Co (***) Cu/constantan (T) Ni-Cr/constantan (E) Fe/constantan (J) Ni-Cr/Ni allié (K) Pt-Rh10 %/Pt(S) Pt-Rh30 %/Pt-Rh6 % (B) Pt-Rh20 %/Pt-Rh40 % (*) Ir-Rh60 %/Ir (**) W-Re3 %/W-Re25 % (W)	l'apparition d'une f.é.m. dans un circuit comportant deux conducteurs de nature différente, lorsque cette variation est appliquée entre les deux soudures du couple ainsi formé	E : $\delta = 2$ K (600 °C ; 1 000 h) J : $\delta = 2$ K (875 °C) et 1 K (750 °C) en 1 000 h K : $\delta = 9$ K (1 000 °C) et 0,5 K (500 °C) en 1 000 h S : $\delta = 2$ à 10 K (1 400 °C ; 500 h) B : $\delta = 7$ à 18 K (1 350 °C ; 10 000 h) (*) : $\delta = 3$ à 10 K (1 700 °C ; 700 h) W : $\delta = 5$ à 15 K (2 000 °C ; 50 h)	T : ± 2 % (en dessous de 200 K) S : $\pm 0,5$ % VM W : $\pm 1,5$ à 2 % VM ***, T, E, J : en général : ± 1 % VM K, S, B, *, **, W : parfois : ± 1 % EM (selon l'appareil de lecture)

Tableau 2 – Fidélité et exactitude des principaux thermomètres (suite)

Thermomètres	Principe : une variation de température se traduit par...	Fidélité f (% VM) (1) ou dérive du capteur δ (K)	Exactitude (précision) du dispositif industriel complet (1) (2) valeur et commentaire
Pyromètres :			
<ul style="list-style-type: none"> - à radiation totale (PRT) - à récepteur sélectif (PRS) - à disparition de filament (PDF) - bichromatiques (P2C) 	<p>une variation des radiations du spectre émis. Dans le PRT le spectre entier est focalisé sur un capteur de température (couple thermoélectrique, résistance...). Dans le PRS seul un domaine restreint de longueur d'onde est reçu par un convertisseur photon-électron. Dans le PDF on compare la luminance monochromatique (généralement à 0,65 μm) de la source à celle d'une lampe tare dont la relation courant-température est connue. Dans le P2C on sélectionne deux longueurs d'onde et on compare leur luminance à l'aide de récepteurs photoélectriques</p>	<p>PRT et PRS : $f = 3$ à 15 (fonction de la température ambiante) PDF : $f = 2$ (ou meilleure si mesure de i par potentiomètre)</p>	<p>PRT : ± 1 à 1,5 % PE PRS : $\pm 0,5$ à 2 % PE PDF : $\pm 0,5$ à 1 % PE P2C : $\pm 0,5$ à 1 % PE</p> <p>Le pyromètre optique n'indique jamais, ou presque, la température thermodynamique du milieu. Un écart de plusieurs dizaines de degrés est courant si les corrections d'émissivité et d'absorption n'ont pas été effectuées. Dans les conditions de corps noir, la précision est très largement supérieure.</p>
<p>(1) Valeurs données en % de : EM étendue de mesure ; PE pleine échelle (graduation maximale) ; VM valeur mesurée. (2) Étalonnage : par comparaison, erreur $\geq \pm 0,5$ K à 1 064 °C ; par points fixes, erreur $\geq \pm 0,2$ K à 1 064 °C. Courbes d'interpolation : erreur supplémentaire de $\pm 1,5$ K (à 1 200 °C). Précision d'un potentiomètre à équilibrage automatique : $\pm 0,3$ % EM. (3) Les manomètres à tube déformables présentent une hystérésis mécanique : $f = \pm 0,5$ % PE.</p>			

Tableau 3 – Avantages et inconvénients des principaux thermomètres

Thermomètres	Références d'articles à consulter dans les Techniques de l'Ingénieur	Avantages	Inconvénients	Sécurité d'emploi
Thermomètres à dilatation de gaz	<i>Thermomanomètres</i> [R 2550]	<ul style="list-style-type: none"> - Appareillage simple, robuste, peu coûteux à l'achat et à l'entretien. - Échelle linéaire (sensibilité constante le long de l'échelle). - Autonomie de l'ensemble. - Temps de réponse intéressant. 	<ul style="list-style-type: none"> - Corrections d'espaces nuisibles délicates. Les diamètres intérieurs des tubes doivent être inférieurs à 0,2 mm. - Dimension extérieure du tube élevée (\varnothing 15 mm). - Correction de pression atmosphérique. 	- Médiocre.
Thermomètres à dilatation de liquide	<i>Thermomètres à dilatation de liquide dans le verre</i> [R 2530]	<ul style="list-style-type: none"> - Normalisation très poussée. - Autonomie, simplicité d'emploi. - Prix modeste. - Adaptation possible en régulation. - Indérégulables sauf accident de surchauffe. - Sensibilité aussi grande que l'on veut en modifiant le rapport des volumes bulbe/capillaire. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fragilité. - Correction de colonne émergente délicate due au gradient le long de la tige, surtout si le thermomètre est protégé par une enveloppe métallique. - Temps de réponse élevé. - Faible étendue de mesure si l'on veut une grande exactitude. - L'enveloppe de verre présente une hystérésis qui impose des étalonnages fréquents. 	<ul style="list-style-type: none"> - Thermomètres à enveloppe de verre : très bonne. - Thermomètres à enveloppe métallique : médiocre
Thermomètres à dilatation de solide	<i>Pyromètres à bilames</i> [R 2540]	<ul style="list-style-type: none"> - Échelle linéaire. - Régulation simple de température. - Les bilames sont peu coûteux et robustes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Les thermomètres à tige sont relativement fragiles et assez chers. - Les bilames sont sensibles à la surchauffe. 	<ul style="list-style-type: none"> - Thermomètre à tige : médiocre. - Bilame : assez bonne.
Thermomètres à tension de vapeur	<i>Thermomanomètres</i> [R 2550]	<ul style="list-style-type: none"> - Les mêmes avantages que les thermomètres à gaz. - Pas de correction de dilatation de l'enveloppe. - Le capillaire peut être très long (> 50 m). 	<ul style="list-style-type: none"> - Échelle non linéaire. - Dimension importante du bulbe (\varnothing = 15 mm). 	- Médiocre.

Tableau 3 – Avantages et inconvénients des principaux thermomètres (suite)

Thermomètres	Références d'articles à consulter dans les Techniques de l'Ingénieur	Avantages	Inconvénients	Sécurité d'emploi
Repères	<i>Détermination des températures superficielles par cristaux liquides</i> R2640] <i>Mesure des températures par méthodes repères</i> [R 2650]	– Contrôle possible dans les endroits inaccessibles ou des pièces mobiles.	– Nécessite une surveillance permanente. – La cinétique de la réaction physico-chimique implique généralement un retard de même que le transfert thermique dans le détecteur.	– Bonne.
Thermomètres à résistance métallique	<i>Thermomètres à résistance métallique.</i> [R 2570] <i>Étalonnage et vérification des thermomètres.</i> [R 2520]	– Faible encombrement $\varnothing < 2$ mm, parfois < 1 mm. – Gamme de température importante.	– Auto-échauffement par le courant de mesure qui doit rester faible (< 10 mA) et effet parasite des fils de jonction. – Mesure différentielle difficile. – Dimensions plus importantes que celles des couples thermoélectriques. – Prix assez élevé surtout pour l'appareil de mesure de la résistance. – Sensible à une contamination chimique à température élevée entraînant une dérive. – Recuits de stabilisation nécessaires lorsque la sonde subit des cycles thermiques. – Défauts d'isolement à haute température. – Non linéaire. – Particulière vigilance à l'étalonnage.	– Résistance de platine : bonne. – Résistance de nickel ou de cuivre : médiocre.
Oxydes (thermistances)	<i>Thermistances CTN et autres thermomètres à semi-conducteur</i> [R 2580]	– Encombrement très réduit $< 0,1$ mm. – Pas de problème de fils de jonction car les résistances à mesurer sont importantes ($> 10^3 \Omega$).	– Fidélité médiocre aux cyclages thermiques. – Non-linéarité imposant un étalonnage en plusieurs points. – Soigner l'isolement en raison de la résistance élevée.	– Assez bonne.
Résistances au germanium et au carbone		– Dimensions faibles (de l'ordre de quelques millimètres). – Mesures simples aux basses températures.	– Sensibilité aux cycles thermiques surtout pour le carbone. – Non-linéarité. – Mauvaise interchangeabilité.	– Résistance au germanium : bonne. – Résistance au carbone : assez bonne.
Couples thermo-électriques	<i>Couples thermo-électriques</i> [R 2590] <i>Étalonnage et vérification des thermomètres</i> [R 2520] <i>Température de surface. Mesure par contact</i> [R 2730]	– Interchangeabilité bonne (± 2 K) et aisée. – Grande variété de couples utilisables dans un grand domaine de température (4 K-2 900 K) avec le même appareillage électrique. – Mesures différentielles et ponctuelles aisées. – Mesures de températures de surface par soudure du couple sur la surface. – Remplacement des pyromètres lorsque les émissivités sont inconnues. – Bonne reproductibilité jusqu'à 1 300 K.	– Influence des gradients sur les fils d'alliage qui ne sont pas toujours homogènes. – Instabilité par contamination et recristallisation au-delà de 1 500 K. – Défauts d'isolement au-delà de 1 800 K ou isolement difficile. – Non-linéarité. – Nécessité d'une correction automatique ou manuelle due à la température de la soudure froide.	– Assez bonne à bonne (selon le domaine de température). – Médiocre au-delà de 1 400 °C.
Pyromètres	<i>Pyrométrie optique</i> [R 2610]	– Accession aux hautes températures. – Durée de vie illimitée. – Grande souplesse d'utilisation. – Mesures sans contact. – Automatisation courante. – Temps de réponse pouvant être très faible (quelques ms).	– Étalonnage délicat car dépendant du milieu visé. L'étalonnage est généralement fait par comparaison avec un couple thermoélectrique.	– Pyromètre à radiation totale : médiocre. – Pyromètre à récepteur sélectif : assez bonne. – Pyromètre à disparition de filament : bonne. – Pyromètre bichromatique : bonne.

- une thermistance, au voisinage de la température ambiante, est 10 fois plus sensible qu'une résistance de platine. Elle permet, sans appareillage complexe, la détection de très faibles variations de température (10^{-2} K), à condition d'accepter une incertitude plus importante sur la détermination du niveau exact de température ;
- le thermomètre à dilatation de liquide est un outil fiable et d'exactitude correcte ;
- le couple thermoélectrique Pt-Rh10 %/Pt n'est plus considéré selon l'EIT-90 (échelle internationale de température de 1990) comme instrument étalon. Les couples thermoélectriques sont cependant largement utilisés avec succès entre 4 et 2 700 K (couples Au-Co/Cu à basse température et W-Re à haute température) ;
- la résistance de platine, étalon entre 13,8 K et 961,78 °C, s'emploie de 2 à 1 350 K ;
- les pyromètres dans l'infrarouge peuvent réaliser des mesures à partir de – 60 °C.

La comparaison des qualités des divers capteurs permet de tirer quelques **conclusions** :

- Contrairement au thermocouple, les systèmes résistifs nécessitent l'emploi d'alimentations externes qui appartiennent à la chaîne de mesure et donc doivent être considérés avec autant de soin que le capteur proprement dit.
- Les résistances thermiques ainsi que les thermistances génèrent de la chaleur entraînant des corrections.
- Le couple thermoélectrique est moins stable et moins précis que la résistance thermique.
- La thermistance est sans conteste la plus sensible alors que le couple thermoélectrique est le moins sensible.
- La résistance thermique de platine est linéaire avec la température alors que la thermistance ne l'est pas.
- Par contre, le signal de sortie de la thermistance est important contrairement à celui du couple thermoélectrique qui demande une amplification avec les problèmes de bruit de fond et de dérive concomitants.
- Le couple thermoélectrique est simple, robuste et facilement interchangeable. Les résistances thermiques et les thermistances sont fragiles et doivent être nécessairement protégées. Le montage des résistances thermiques et plus délicat que celui des thermocouples : elles nécessitent des mesures à quatre fils avec tous les problèmes de résistances de contact qui y sont liés.

En premier lieu, on privilégiera évidemment la **fidélité** de la chaîne. Cette qualité est quasiment imposée aux constructeurs si l'instrument qu'ils proposent veut garder le qualificatif d'instrument de mesure. Dans le choix, on tiendra compte tout d'abord du domaine de température imposé, ensuite de la sensibilité, de l'exactitude et du temps de réponse souhaités. On retiendra qu'une mesure ponctuelle, avec toutes les nuances que cette dénomination engendre, n'est pas forcément la solution idéale.

2. Choix du capteur et de la chaîne en fonction du domaine de température

L'ordre de grandeur des températures à mesurer influe profondément sur le choix du capteur, tandis que l'intervalle exploré autour de la valeur moyenne permet de préciser le choix de la chaîne de mesure.

Chaque type de thermomètre possède un domaine de travail optimal. En changeant d'intervalle de température, on est contraint de faire appel à des méthodes de mesure totalement différentes. Cette remarque est valable lorsque l'on désire augmenter notablement l'exactitude.

On se reportera au tableau 4 qui indique les divers domaines de travail pour chaque méthode de mesure envisagée. Pour une exploitation industrielle aisée, il est bon de ne pas sortir des limites usuelles repérées par un trait continu dans ce tableau.

Les couples thermoélectriques sont présents dans un grand domaine de mesure. Beaucoup sont utilisables entre – 268 °C et 2 316 °C.

Les résistances thermiques sont plus limitées au domaine – 270 °C à 850 °C.

Les thermistances se cantonnent aux températures comprises entre – 40 °C et 150 °C.

Les possibilités de choix sont les plus nombreuses entre 200 et 500 K. En dehors de ces limites, les possibilités sont d'autant plus restreintes que l'on s'en écarte davantage.

Au-dessous de 200 K, les méthodes les plus utilisées sont : les résistances (platine, germanium, carbone) et certains couples thermoélectriques. Les thermomètres à tension de vapeur ou à dilatation de gaz ne sont utilisables que par des laboratoires très spécialisés.

Lorsque l'on travaille au-dessous de 10 K, les possibilités se raréfient encore : susceptibilité paramagnétique (d'utilisation très spéciale) ou tension de vapeur de l'hélium. Les plus simples à mettre en œuvre sont les résistances de carbone et de germanium.

De 800 à 1 300 K, les couples thermoélectriques sont des instruments de choix, du point de vue de la sécurité de mesure et de la facilité de mise en œuvre. Les pyromètres à radiation totale ou à récepteur sélectif, relativement peu précis dans l'absolu, offrent cependant de grandes facilités dans le contrôle industriel continu.

Au-delà de 1 300 K, on arrive franchement dans le domaine privilégié des méthodes optiques. Jusqu'à 1 800 K, on peut certes utiliser des couples de métaux précieux. Cependant, au-delà de 1 600 K, les difficultés liées à la fidélité à long terme permettent de moins en moins les mesures permanentes. L'utilisation de couples de métaux réfractaires (par exemple W-Re), possible en pratique jusqu'à 2 700 K, pose de sérieux problèmes de maintenance et de sécurité d'emploi.

Les limites d'utilisation peuvent être imposées par les dimensions du capteur : par exemple, les couples thermoélectriques Pt-Rh10 %/Pt de diamètre 0,3 mm ne peuvent être utilisés de façon fiable que jusqu'à 1 650 K, alors que, si le diamètre atteint 0,5 mm, on peut repousser les limites de 200 K.

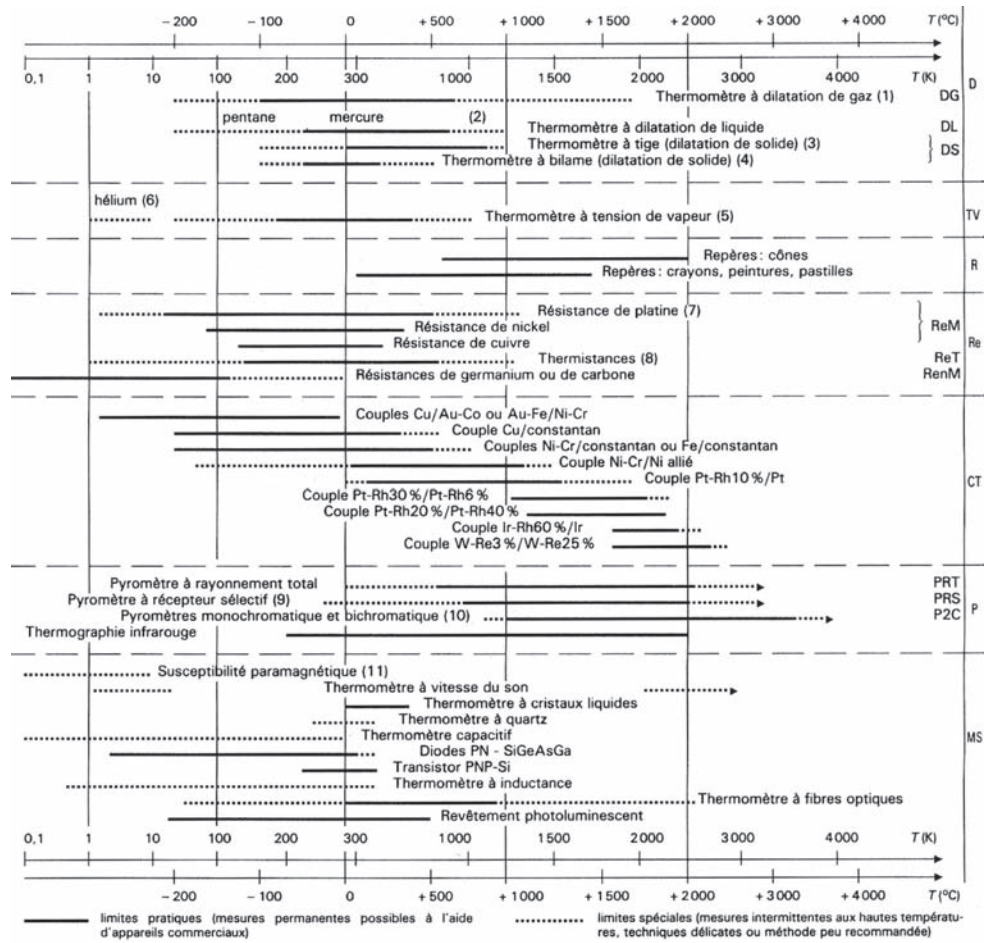
De même, les isolants des gaines et des enveloppes utilisées peuvent présenter des températures maximales d'utilisation plus faibles que celles du capteur lui-même (fluage de la silice, diffusion et transport des impuretés, isolement défectueux de l'alumine à haute température).

Enfin, l'environnement de la mesure peut être un facteur limitant dans la gamme de température d'utilisation : aux très basses températures, l'obtention d'un contact thermique satisfaisant est un aspect déterminant pour les résistances sujettes au phénomène d'auto-échauffement ; la condensation d'impuretés gazeuses à la température ambiante est susceptible de provoquer des défauts d'isolement aux températures plus basses.

L'extension du domaine de température d'utilisation des capteurs pose des problèmes délicats qui proviennent du fait que, hormis le thermomètre à gaz (loi des gaz parfaits), aucun système thermométrique n'utilise un phénomène physico-chimique idéalement pur, c'est-à-dire représentable par une grandeur qui ne soit fonction que de la température.

Par exemple, la relation résistance-température dans le thermomètre à résistance fait intervenir des phénomènes tels que variations de dimensions, création de lacunes, fluage intergranulaire, recristallisation à haute température. À basse température, divers phénomènes ont une influence contraire sur la résistivité : par exemple, la supraconductivité et la diffraction des électrons de conduction sur les joints de grains qui diminue leur libre parcours moyen.

Tableau 4 – Domaine de température propre à chaque thermomètre



D) : thermomètres à dilatation (DG, DL, DS)

TV) : thermomètres à tension de vapeur

R) : méthodes repères

Re) : thermomètres à résistance (ReM : résistance métallique, ReT : thermistance, RenM : résistance non métallique)

CT) : couples thermoélectriques

P) : pyrométrie (PRT, PRS, PDF, P2C)

MS) : méthodes spéciales

(1) Au laboratoire de métrologie, cet instrument permet la comparaison de l'EIT-90 avec l'échelle thermodynamique entre 3 K et 1 064, 43 °C. Des mesures jusqu'à 1 900 K ont même été réalisées. La température minimale atteinte est 0,3 K. En deçà, la tension de vapeur de l'hélium devient trop faible.

(2) Dispositif non commercialisé-enveloppe de silice-gallium liquide.

(3) 1 000 K en régime permanent.

(4) Intervalle utilisé en pratique : 220 K à 420 K.

(5) Peu recommandé au-delà de 670 K. Intervalle de mesure limité par la température ambiante T_0 , de 170 K à T_0 transmission par la vapeur, de T_0 à 970 K transmission par le liquide.

(6) Le thermomètre à tension de vapeur d'hélium est utilisé par les métrologistes entre 0,2 K et 5,2 K.

(7) Les appareils de grande exactitude ($\pm 10^{-2}$ K) servent à l'interpolation de l'EIT-90 entre 13,8033 K et 961,78 °C. Il s'agit alors de montages de résistances de platine très soignées à trois ou quatre conducteurs. Au-dessous de 14 K, il n'est plus très précis (étalonnage à ± 3 mK) ni très sensible (0,1 mK).

(8) Exceptionnellement jusqu'à 1 370 K, avec Al_2O_3 , à partir de 1 K avec ZnO , SnO_2 .

(9) Mesures possibles à partir de la température ambiante.

(10) Définition de l'EIT-90 à partir de 961,78 °C par la loi du rayonnement de Planck.

(11) En étudiant la susceptibilité du système de spins nucléaires, les mesures peuvent s'effectuer jusqu'à 10^{-5} K.

En définitive, aucun thermomètre ne pouvant balayer toute la gamme des températures, **chaque thermomètre a un domaine privilégié** où la loi physique constitue une excellente approximation. Lorsque l'on sort de ce domaine apparaissent des parasites en tous genres (dérives difficiles à contrôler à haute température, disparition ou insensibilité du phénomène à basse température). Il est passionnant de voir les efforts déployés dans les laboratoires de métrologie pour maîtriser ces dérives : analyse à haute température de la trempe des lacunes, fluages et recristallisation des fils platine, transport en phase gazeuse à partir des enveloppes, ou recherches encore plus théoriques sur les phénomènes inductifs, capacitifs, magnétiques, pyroélectriques, etc.

3. Sensibilité

■ La **sensibilité** d'un capteur est une qualité essentielle. Cependant, une trop grande sensibilité peut masquer l'allure principale du phénomène étudié par une amplification excessive de détails non représentatifs. Il vaut mieux dégrossir une étude avec un capteur peu sensible pour affiner ensuite l'observation, plutôt que l'inverse. De plus, un capteur de sensibilité élevée coûte cher et sa mise en œuvre est délicate.

Il convient de bien orienter le choix du capteur en fonction de la température envisagée, car la sensibilité de celui-ci est rarement constante sur un large domaine de température. Le capteur n'est que le premier maillon de la chaîne de mesure qui vise à amplifier le signal délivré par le capteur. L'amplification mécanique ou électronique permet aisément des gains de 10^5 et plus. La sensibilité de la chaîne complète est le produit de la sensibilité du capteur par les divers gains successifs des éléments de la chaîne. Il faut être conscient que la chaîne, d'une part, accroît dans les mêmes proportions l'importance du signal et celle du bruit généré ou lu par le capteur et, d'autre part, possède son bruit propre. Une sensibilité trop faible que l'on croit compenser par un gain d'amplification élevé n'est pas une solution acceptable. Cependant, utiliser une sensibilité très élevée peut être illusoire, car la définition de l'échelle thermométrique a sa propre limite. Par exemple à 800 K, l'exactitude limite donnée par l'EIT-90 n'est que de 3 mK et, à 1 500 K, elle est de 100 mK. Ces sensibilités sont rarement atteintes industriellement.

■ Linéarisation des mesures

Un capteur qui a une sensibilité constante dans tout l'intervalle de mesure est **linéaire**. C'est une garantie de facilité de lecture et de constance d'exactitude en tout point. Cet aspect est cependant mineur vis-à-vis de la fidélité. En effet, les défauts de linéarité du capteur sont souvent très facilement corrigés par un traitement du signal à l'intérieur même de la chaîne de mesure.

Les constructeurs proposent de plus en plus des thermomètres linéaires. Il en résulte un emploi plus commode de l'appareil. Lorsque la linéarisation intervient sur l'organe de lecture généralement numérisé, la méthode de détection n'est pas modifiée. Dans ce cas, la mesure de type potentiométrique repose sur la comparaison de la f.é.m. cherchée avec une f.é.m. de référence interne, modifiée progressivement par tranches selon le niveau atteint. Si les tensions de référence sont bien choisies, on obtient un rapport de f.é.m. fonction linéaire de la température et affiché directement en degrés, après correction automatique de la température de source froide si nécessaire. La linéarisation de la lecture, même si elle n'est qu'un artifice électronique, est susceptible de simplifier les

procédures d'étalonnage, en ce sens que, si l'on est certain de la linéarité de la réponse par un étalonnage électrique interne par exemple, le nombre de points d'étalonnage purement thermométriques peut être très largement réduit.

Une autre procédure de linéarisation des mesures consiste en la construction de détecteurs spéciaux ou en l'utilisation d'alliages à réponse linéaire. Dans le cas des sondes à résistance, on met en série différents métaux (nickel, manganine) dont les réponses individuelles se compensent pour donner une relation globale linéaire [29]. Des résistances de cuivre de fortes valeurs (200 et 2 000 Ω) sont disponibles sous de faibles dimensions avec une bonne linéarité entre 250 et 450 K. Signalons enfin un montage de plusieurs thermistances en parallèle, associées à des résistances fixes : il fournit une relation linéaire à $\pm 0,04\%$ entre 300 et 400 K avec des sensibilités de lecture de $10 \Omega \cdot K^{-1}$ (ou $5 V \cdot K^{-1}$). En augmentant le nombre de détecteurs élémentaires du montage, on arrive toujours à diminuer les écarts par rapport à la linéarité, mais on accroît les dimensions de la sonde ainsi que le temps de réponse [30].

4. Exactitude

Dans le tableau 2 sont données les exactitudes maximales atteintes par les capteurs.

5. Temps de réponse

Pour chaque type d'appareil, diminuer le temps de réponse revient généralement à atténuer la sensibilité. On tourne la difficulté en amplifiant le signal à mesurer, mais cela n'est pas sans limite car on amplifie également les bruits parasites d'origines diverses : dans les mesures ultrasensibles, il faut tenir compte du bruit propre à la mesure, qui varie comme $\tau^{-1/2}$, τ étant la constante de temps de l'appareil. Ce bruit se manifeste par une fluctuation apparente de la grandeur mesurée. On n'a pas intérêt à chercher un temps de réponse faible car les phénomènes thermiques sont généralement lents.

À titre d'indication, on peut dire qu'il n'y a pas de problème pour trouver des appareils répondant à un signal rapide (échelon unité), en moins de 1 s. Le temps de réponse de couples thermoélectriques et de thermistances peut être très court selon le montage. Des résistances thermiques de petites dimensions sont plus rares car plus difficiles à monter.

Il faudra cependant faire bien attention à la bande morte du système, qui est en relation directe avec la sensibilité maximale.

Dans le cas des pyromètres optiques mesurant une énergie, le temps de réponse peut dépendre de la température mesurée : par exemple 0,01 s au-dessous de 700 K et 0,1 s au-delà (cellule photoélectrique). Pour garder un temps de réponse τ raisonnable, on est contraint de limiter la sensibilité. Par exemple, un pyromètre à disparition de filament, couplé à un photomultiplicateur, aura les caractéristiques suivantes : vers 1 400 K, $\tau < 1$ s (sensibilité $\pm 0,2$ K) ; vers 1 200 K, $\tau = 4$ s (sensibilité $\pm 0,6$ K) ; vers 1 000 K, $\tau = 6$ s (sensibilité ± 1 K).