

Capteurs

7. Capteurs de température

PAR F. MORAIN-NICOLIER

URCA - IUT de Troyes

Ge2i - S3

Table des matières

1	Introduction	1
2	Notion de température	2
2.1	Échelles de températures	2
	Échelles thermodynamiques	2
	Échelles dérivées	3
2.2	Température mesurée et à mesurer	3
	Température mesurée et a mesurer	3
	Conséquence sur le capteur (dans le cas d'un capteur de contact)	4
3	Thermométrie par résistance	5
3.1	Résistances métalliques	5
3.2	Thermistances	6
	CTN	6
	CTP	7
4	Effet thermo-électrique : thermocouples	7
4.1	Effets thermoélectriques	7
	4.1.1 Effet Peltier	7
	4.1.2 Effet Thomson	8
	4.1.3 Effet Seebeck	8
4.2	Utilisation des thermocouples	9
	4.2.1 Thermocouples usuels	9
	4.2.2 Caractéristiques générales	10
5	Pyrométrie optique	10
5.1	Principes physiques	10
	5.1.1 Rayonnement du corps noir	10
	5.1.2 Rayonnement thermique d'un corps réel	11
5.2	Principes généraux des pyromètres optiques	11
	5.2.1 Pyromètre à bande étroite (monochromatique)	11
	5.2.2 Pyromètres bichromatiques	12
	5.2.3 Pyromètres mesureurs d'énergie	12

1 Introduction

- La température est une grandeur physique dont la mesure est certainement la plus fréquente
- Elle détermine les propriétés de la matière :
 - de façon continue (pression et volume d'un gaz par ex.)

- de façon discontinue (changement de phase par ex.)
- Très nombreuses applications, par exemple :
 - médical (température → indication de la santé)
 - météorologie (tous les soirs !)
 - gastronomie (contrôle de cave, cuisson, etc.)
- Principes de mesures :
 - Méthodes mécaniques.** Dilatation d'un solide, liquide ou gaz, ...
 - Méthodes optiques.** Rayonnement infrarouge émis, ...
 - Méthodes électriques.** Variation de résistance, de bruit de fond, ...

2 Notion de température

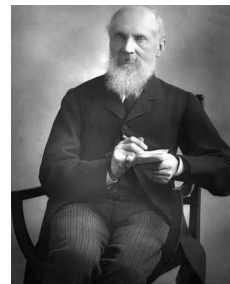
- Affecter une valeur numérique à la température pose un problème de fond
 - La température est une grandeur intensive :
 - multiplier ou diviser deux températures n'a pas de signification physique évidente
- Il est donc nécessaire de rechercher sur quelles bases physiques établir un système d'évaluation.

2.1 Échelles de températures

- A l'échelle macroscopique :
 - des échelles empiriques sont basées sur les modifications des propriétés physiques de matériaux par la température
 - échelles arbitraires qui ne donnent pas de signification intrinsèque à la température
- A l'échelle atomique :
 - la température est liée à l'énergie cinétique moyenne des constituants de la matière

Échelles thermodynamiques

Échelle de Kelvin. L'unité est le Kelvin (K). Le Kelvin est la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau.



William Thomson, plus connu sous son titre de lord Kelvin (1824-1907)

- La température de 0K correspond au zéro absolu
- zéro absolu : Les particules qui composent la matière sont toutes dans le même état d'énergie minimale ⇒ totale immobilité au sens classique

Échelle de Rankin. L'unité est le degré Rankin ($^{\circ}\text{R}$). La température du point triple de l'eau a pour valeur $491,69^{\circ}\text{R}$.

Échelles dérivées

Échelle Celsius. Déduite de l'échelle absolue de Kelvin par

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(^{\circ}\text{K}) - T_0, \quad (1)$$

avec $T_0 = 273,15\text{K}$.

Échelle Fahrenheit. Déduite de l'échelle absolue de Rankin par

$$T(^{\circ}\text{F}) = T(^{\circ}\text{R}) - T_0, \quad (2)$$

avec $T_0 = 459,67^{\circ}\text{R}$.

- Les définitions historiques de ces deux échelles sont instructives :

Échelle Celsius. $0^{\circ}\text{C} \rightarrow$ équilibre eau-glace, $100^{\circ}\text{C} \rightarrow$ ébullition de l'eau

Échelle Fahrenheit.

0°F . Plus basse température mesurée par Fahrenheit durant le rude hiver de 1708 à 1709 dans sa ville natale de Danzig

96°F . Température du sang
(une légende prétend que le point 0°F est la température la plus froide enregistrée en Angleterre et 100°F la température la plus chaude)

- Conversion entre les échelles Celsius et Fahrenheit :

$$T(^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{5}T(^{\circ}\text{C}) + 32. \quad (3)$$

2.2 Température mesurée et à mesurer

- La température mesurée à l'aide d'un capteur est celle T_c du capteur
- Elle dépend de :
 - la température T_x de l'environnement du capteur,
 - des échanges d'énergie dont le capteur est le siège.
- Dans le cas général, les énergies présentes sont :
 - l'énergie échangée entre le capteur et le milieu dont la température est mesurée,
 - l'énergie échangée entre le capteur et l'environnement externe,
 - l'énergie dissipée dans le capteur lorsqu'il est parcouru par un courant de mesure. (autoéchauffement)

Température mesurée et à mesurer

- La quantité de chaleur Q_r reçue par le capteur par unité de temps est

$$\frac{dQ_r}{dt} = K \frac{dT_c}{dt}. \quad (4)$$

K est la capacité calorifique du capteur.

- La quantité de chaleur Q_t transférée par le milieu au capteur, par unité de temps est

$$\frac{dQ_t}{dt} = G \cdot (T_x - T_c). \quad (5)$$

G est la conductance thermique entre le capteur et le milieu.

- Si les échanges thermiques entre le capteur et son environnement sont négligés,

$$Q_t = Q_r. \quad (6)$$

Donc,

$$K \frac{dT_c}{dt} = G \cdot (T_x - T_c). \quad (7)$$

La variation de T_c est donc régie par l'équation différentielle

$$\frac{dT_c}{T_x - T_c} = \frac{G}{K} dt. \quad (8)$$

La solution de cette équation est

$$\begin{cases} T_c(t) = T_x - \Delta T \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \\ \Delta T = T_x - T_{c0} \text{ ou } T_{c0} \text{ est la température initiale du capteur.} \end{cases} \quad (9)$$

- La représentation graphique de $T_c(t)$ est :

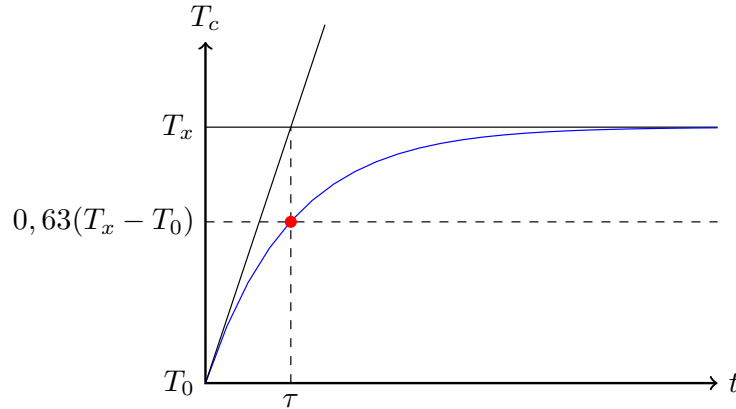


Figure 1. Évolution de la température T_c du capteur en réponse à un échelon de température.

→ L'équilibre n'est jamais atteint :

$$t > 5\tau \implies T_x - T_c < 0,007(T_x - T_0). \quad (10)$$

- Dans le cas où l'échange avec le milieu extérieur n'est pas négligeable :

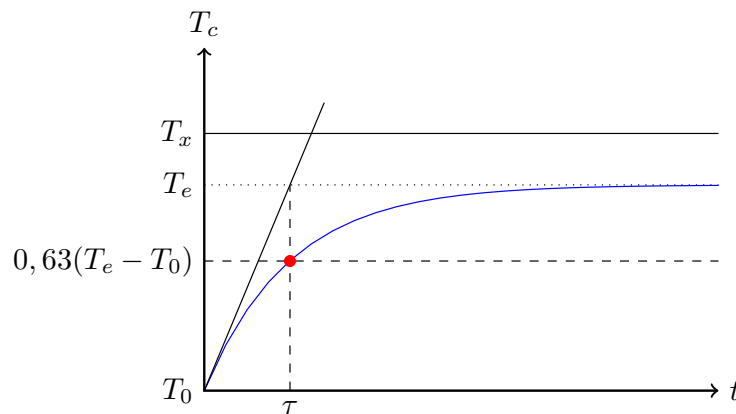


Figure 2. Évolution de la température T_c du capteur en réponse à un échelon de température, si échange avec l'extérieur.

→ T_c tend vers une température $T_e < T_x$.

Conséquence sur le capteur (dans le cas d'un capteur de contact)

- On cherche à obtenir un faible temps de réponse.
- Il faut donc une constante de temps τ la plus faible possible, on rappelle que

$$\tau = \frac{K}{G}. \quad (11)$$

→ Il faut donc :

une grande valeur pour G . (conductance thermique)

une petite valeur pour K . (capacité thermique)

Or,

$K \approx$ volume du capteur,

$G \approx$ surface de contact.

Un capteur de température efficace exige donc :

- un petit volume,
- une grande surface de contact.

3 Thermométrie par résistance

De façon générale, la valeur d'une résistance dépend de sa température T :

$$R(T) = R_0 \cdot f(T - T_0) \quad (12)$$

avec

R_0 . la résistance à la température T_0 ,

f . une fonction caractéristique du matériau, avec $f(0) = 1$ (correspond à $T = T_0$).

Deux matériaux sont couramment employés.

Les métaux.

$$R(T) = R_0(1 + AT + BT^2 + CT^3). \quad (13)$$

Les thermistances. mélanges d'oxydes semi-conducteurs :

$$R(T) = R_0 \cdot \exp^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}. \quad (14)$$

Définition 1. *Sensibilité thermique* (a.k.a. *coefficient de température*)

$$\alpha = \frac{dR}{dT}. \quad (15)$$

3.1 Résistances métalliques



- Capteur résistif au platine (PT100)
- Pour la mesure avec contact de la température de liquides
- Résistance de 100Ω à 0°C et $138,4\Omega$ à 100°C
- Modèle très courant

- La plupart des métaux présentent un coefficient de température de la résistivité de l'ordre de $3,4 \cdot 10^{-3}/^\circ\text{C}$.
- Le cuivre, le nickel et le platine sont principalement utilisés en raison
 - de leur linéarité,

- de leur facilité de mise en oeuvre.

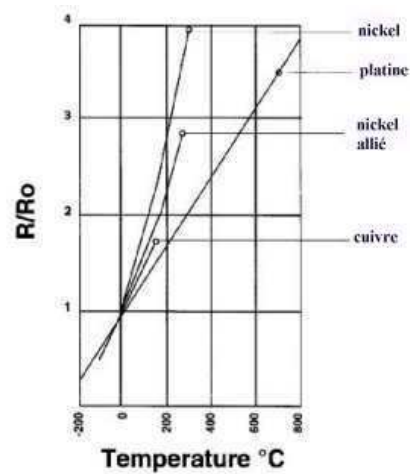


Figure 3. Évolution de la résistance relative en fonction de la température pour les matériaux exploités (ref. M. Hubin)

- Depuis les années soixante, la résistance de platine s'est imposée. Ce n'est pourtant pas le matériau le plus intéressant.
 - Aux basses températures (moins de 200°C) le nickel présente une bien meilleure tenue mécanique
 - ⇒ temps de réponse infiniment plus court
 - Le coefficient de température du nickel est environ le double du platine
 - la purification du platine est très délicate
 - ⇒ la résistivité du platine n'est pas exactement linéaire, oscillations au delà de 600°C.
- Bilan :
 - ⊕ . capteurs précis
 - ⊕ . simplicité de mise en oeuvre
 - ⊖ . auto-échauffement (effet Joule) ⇒ limite de courant

3.2 Thermistances



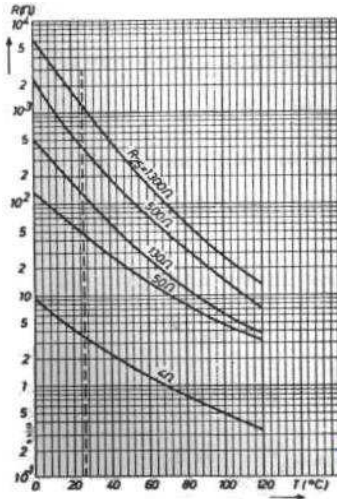
CTN



CTP

- Il s'agit de résistances à base de semi-conducteur et d'oxydes métalliques
- Thermiquement très sensible (env. 10 fois plus que les résistances métalliques)
- CTN (Coefficient de température négatif, NTC en anglais) ou CTP

CTN



- Modélisation de la forme :

$$R(T) = R_0 \cdot \exp^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$$

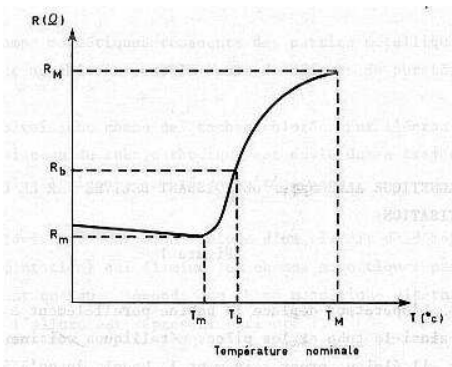
- Sensibilité thermique :

$$\alpha = \frac{-B}{T^2}, \tag{16}$$

avec B entre 3000K et 5000K.

- Grande sensibilité thermique
- Linéarité et stabilité inférieures aux résistances métalliques
 ⇒ utilisées dans une gamme de température plus étroite.

CTP



- Modification de résistance ($\times 1000$) dans un petit intervalle.
- Hautement non-linéaire
- Utilisées en détecteur de seuil de température.

- Bilan des thermistances :
 - ⊕. Très bonne sensibilité
 - ⊕. Facilité d'utilisation
 - ⊖. Utilisation dans des étendues de mesures étroites
 - ⊖. Interchangeabilité médiocre
 - ⊖. Auto-échauffement

4 Effet thermo-électrique : thermocouples

4.1 Effets thermoélectriques

4.1.1 Effet Peltier

Considérons deux conducteurs A et B différents mais à la même température T .

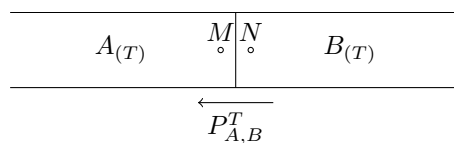


Figure 4. Effet Peltier

Il s'établit une différence de potentiels

$$V_M - V_N = P_{A,B}^T \quad (17)$$

- Cette d.d.p. ne dépend que de la nature des conducteurs et de leur température
- C'est la f.é.m. de Peltier

4.1.2 Effet Thomson

Soit deux points M et N à des températures différentes, à l'intérieur d'un conducteur homogène A .

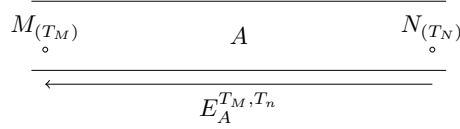


Figure 5. Effet Thomson

- Il s'établit une f.é.m. qui ne dépend que de la nature du conducteur A et des températures T_M et T_N

$$E_A^{T_M, T_N} = \int_{T_N}^{T_M} h_A dT. \quad (18)$$

- C'est la f.é.m. de Thomson
- h_A est le coefficient de Thomson du conducteur A

4.1.3 Effet Seebeck

Soit un circuit fermé

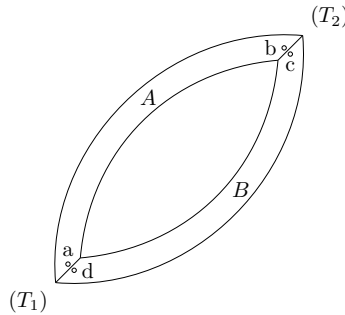


Figure 6. Effet Seebeck

- deux conducteurs A et B
- dont les jonctions sont aux températures T_1 et T_2

Ce couple est le siège d'une f.é.m. (de Seebeck) $E_{A,B}^{T_2, T_1}$ qui résulte des effets Peltier et Thomson combinés. On a :

$$V_{ab} = \int_{T_1}^{T_2} h_A dT \quad (19)$$

$$V_{bc} = P_{A,B}^{T_2} \quad (20)$$

$$V_{cd} = \int_{T_2}^{T_1} h_B dT \quad (21)$$

$$V_{da} = P_{B,A}^{T_1}. \quad (22)$$

La f.é.m. totale est la f.é.m de Seebeck :

$$E_{A,B}^{T_2, T_1} = V_{aa'} \quad (23)$$

où a' est un point proche de a .

Alors,

$$\begin{aligned} E_{A,B}^{T_2,T_1} &= V_{aa'} \\ &= V_{ab} + V_{bc} + V_{cd} + V_{da'} . \end{aligned} \quad (24)$$

Donc,

$$\begin{aligned} E_{A,B}^{T_2,T_1} &= P_{A,B}^{T_2} + P_{B,A}^{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} h_A dT + \int_{T_2}^{T_1} h_B dT \\ &= P_{A,B}^{T_2} \boxed{-P_{A,B}^{T_1}} + \int_{T_1}^{T_2} h_A dT \boxed{-\int_{T_1}^{T_2} h_B dT} , \end{aligned} \quad (25)$$

(en considérant que $V_{da'} = V_{da}$).

Au final, la f.é.m. de Seebeck est donc :

$$\boxed{E_{A,B}^{T_2,T_1} = P_{A,B}^{T_2} - P_{A,B}^{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} (h_A - h_B) dT,} \quad (26)$$

elle ne dépend que des deux conducteurs et de T_1 et T_2 .

4.2 Utilisation des thermocouples

Un thermocouple est constitué de :

- deux conducteurs A et B ,
 - dont les jonctions sont aux températures T_1 et T_2
- En général, la température d'une des jonctions est maintenue fixe et sert de référence.

4.2.1 Thermocouples usuels

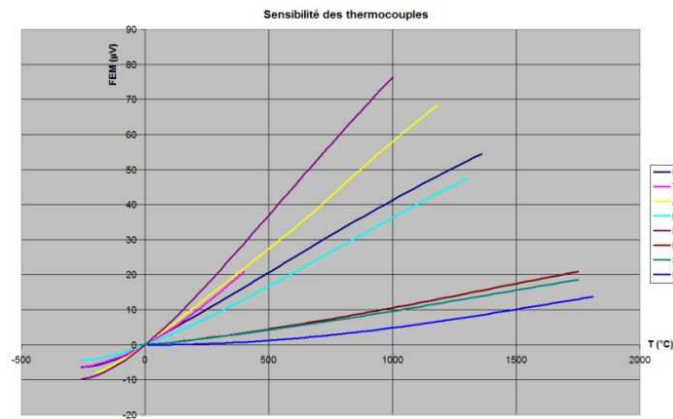


Figure 7. Sensibilité des thermocouples usuels

Code	Alliage positif	Alliage négatif	α ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) à 100°C	Domaine ($^\circ\text{C}$)
K	Chromel	Alumel	42	0 à +1100
T	Cuivre	Constantan	46	-185 à +300
J	Fer	Constantan	54	+200 à +700
N	Chromel-Silicium	Nisil	30	0 à +1150
E	Chromel	Constantan	68	0 à +800
R	Platine - 13% Rhodium	Platine	8	0 à +1600
S	Platine - 10% Rhodium	Platine	7	0 à +1550
B	Platine - 30% Rhodium	Platine - 6% Rhodium	1	+100 à +1600

Tableau 1. Thermocouples usuels

4.2.2 Caractéristiques générales

- ⊕ . Permet des mesures de températures ponctuelles
- ⊕ . La capacité calorifique du capteur peut être très élevée, assurant un temps de réponse faible
- ⊕ . C'est un capteur actif → pas d'autoéchauffement
- ⊕ . Domaine d'utilisation très large : -270°C (Cuivre/Or-Cobalt) jusqu'à $+2700^{\circ}\text{C}$ (Tungstène-Rhénium 5%/Tungstène-Rhénium 26%)
- ⊖ . La mesure exige une température de référence → incertitudes

5 Pyrométrie optique

- Basée sur la relation entre la température d'un corps et le rayonnement optique émis par ce corps
- Principal intérêt : détermination d'une température sans contact
- Mesure de température très élevée ($> 2000^{\circ}\text{C}$)
- Environnement très agressif (industrie chimique)
- Pièces en mouvements (ex. tôles dans un laminatoire)
- Lorsque la température n'est pas uniforme, relevé d'une carte des températures (thermographie)

5.1 Principes physiques

Rayonnement thermique — Tout corps émet spontanément et en permanence un rayonnement électromagnétique dont le spectre a une répartition énergétique fonction de la température

- Origine : transition radiatives provoquées dans les atomes par l'agitation thermique
- Les lois sont d'abord établies pour un corps idéal : le corps noir

Corps noir — absorption totale de tout rayonnement incident

- Un corps réel absorbe et réémet une partie du rayonnement (thermoïque) environnant.

5.1.1 Rayonnement du corps noir

On définit :

l'émittance E_n — puissance totale rayonnée dans un hémisphère, par unité de surface de l'émetteur

l'émittance spectrale $E_{\lambda,n}$ — densité spectrale de puissance rayonnée dans un hémisphère, par unité de surface de l'émetteur, à une longueur d'onde λ .

- **La loi de Planck** est la loi fondamentale de l'émission thermique.
- Elle donne l'émittance spectrale d'un corps noir en fonction de la longueur d'onde et de la température absolue T de cette source :

$$E_{\lambda,n} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(\exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1 \right)} \quad (27)$$

avec

- $C_1 = 2\pi h c^2 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{Wm}^2$ et $C_2 = hc/k = 1,43 \cdot 10^{-2} \text{mK}$,
- h : constante de Planck, $h = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{Ws}^2$,
- c : vitesse de la lumière (dans le vide), $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ms}^{-1}$,

- k : constante de Boltzmann, $k = 1,38054 \cdot 10^{-23} \text{WsK}^{-3}$.

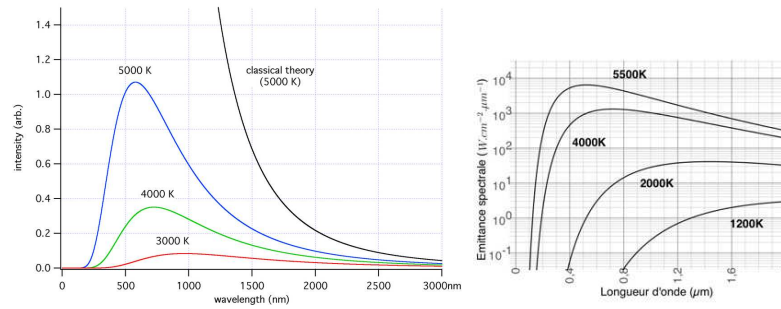


Figure 8. Loi de Planck

- Sur la figure 8, on remarque :
 - l'augmentation rapide de l'émittance avec la température,
 - le déplacement du spectre de l'infrarouge vers le visible (de $0,4\mu\text{m}$ à $0,8\mu\text{m}$) au fur et à mesure que la température augmente,
 - en dessous de 500°C , le rayonnement thermique est quasi totalement dans le domaine infrarouge,
 - dans le cas du soleil, ($T=5500\text{K}$) le maximum correspond au maximum de sensibilité de l'oeil.

5.1.2 Rayonnement thermique d'un corps réel

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

$$E_\lambda(T) = e(\lambda, T) \cdot E_{\lambda,n}(T), \quad (28)$$

où $E(\lambda, T)$ est l'émissivité à la longueur d'onde λ et à la température T du matériau constituant la cible.

- L'émissivité d'un corps est égale à son coefficient d'absorption (loi de Kirchhoff) :
- sa valeur vaut à 1 pour le corps noir, et est inférieure à 1 pour un corps réel,
- dépend, en particulier; de sa nature et de son état de surface.
- L'incertitude sur les valeurs exactes de $e(\lambda, T)$ est l'une des principales sources d'erreurs potentielles en pyrométrie optique.

5.2 Principes généraux des pyromètres optiques

On doit distinguer :

- les pyromètres monochromatiques,
- les pyromètres bichromatiques,
- et les pyromètres mesureurs d'énergie.

5.2.1 Pyromètre à bande étroite (monochromatique)

- Une fraction limitée du spectre de rayonnement thermique de la cible est sélectionnée.
- Un filtre optique assure la sélection.
- Un capteur photoélectrique transforme le rayonnement $E_\lambda(T)$ en signal électrique s_{el} .

L'expression de s_{el} est

$$s_{\text{el}} = \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_0 + \Delta\lambda/2} S_d(\lambda) \cdot K(\lambda) \cdot E_\lambda(T). \quad (29)$$

avec

$S_d(\lambda)$ — sensibilité du photodétecteur

$K(\lambda)$ — fonction du système optique

$E_\lambda(T)$ — émittance spectrale de la cible

Si le spectre reçu est étroit : $\lambda \cong \lambda_0$ dans la bande $\Delta\lambda$, alors :

$$s_{el} = S_d(\lambda_0) \cdot K(\lambda_0) \cdot e(\lambda_0, T) \cdot \frac{C_1 \cdot \Delta\lambda_0}{\lambda_0^5 \left(\exp \frac{C_2}{\lambda_0 T} - 1 \right)}. \quad (30)$$

- Lorsque le pyromètre est étalonné au moyen d'un corps noir, s_{el} correspond à une température T_n .
- Dans le cas d'une cible réelle d'émissivité $e(\lambda_0, T)$, la température T correspondant à s_{el} est :

$$T = \frac{1}{\frac{1}{T_n} + \frac{\lambda_0}{C_2} \ln e(\lambda_0, T)}. \quad (31)$$

Photodiode	Si	600°C
	Ge	200°C
Photorésistance	Pb S	100°C
	Pb Se	50°C
	In Sb	0°C
	Hg Cd Te	-50°C

Tableau 2. Limite d'emploi des capteurs photoélectriques en pyrométrie optique

5.2.2 Pyromètres bichromatiques

- Ce pyromètre peut être considéré comme un double pyromètre monochromatique exploitant deux plages voisines du rayonnement thermique.
- Le rapport des signaux électriques est alors *indépendant* de l'émissivité $e(\lambda, T)$ de la cible.
- C'est le grand intérêt de ce type de pyromètre.

5.2.3 Pyromètres mesureurs d'énergie

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