

Chapitre 3. Mesure de température

3-1 Introduction :

" Il fait chaud ", " il fait froid ", " c'est chaud ", " c'est froid " ... que d'expressions du langage courant pour traduire le fait que la température fait partie du quotidien humain.

La première notion de température est physiologique, sensitive. Cependant, nos sensations sont insuffisantes pour établir une échelle de température et comparer des températures.

L'observation, l'expérience nous apprennent qu'un système se transforme (par exemple changement de volume) lorsque nos sensations de température évoluent. Ce constat va nous permettre de préciser quantitativement le paramètre physique température.

3-1-2 Les différentes unités de température

La température est une grandeur intensive, qui peut être mesurée de deux façons différentes :

- A l'échelle atomique, elle est liée à l'énergie cinétique moyenne des constituants de la matière ;
- Au niveau macroscopique, certaines propriétés des corps dépendant de la température (volume massique, résistivité électrique, etc...) peuvent être choisies pour construire des échelles de température.

3-1-3 Les échelles de température

La plus ancienne est l'échelle centésimale (1742), attribuant arbitrairement les valeurs 0 et 100 degrés à la glace fondante et à l'eau bouillante, sous la pression atmosphérique normale. La température ainsi définie dépendant du phénomène choisi (la dilatation d'un fluide) pour constituer le thermomètre étalon, on utilise de préférence l'échelle Celsius, définie à partir de l'échelle Kelvin par :

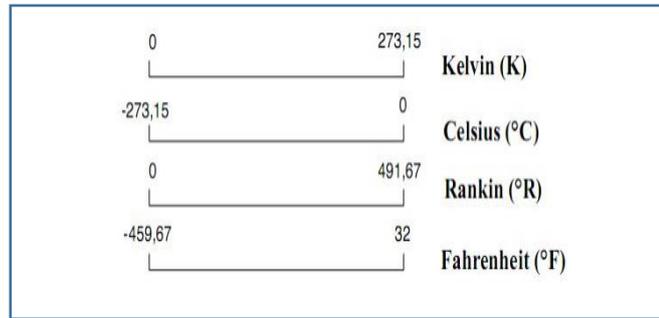
$$T (^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15$$

Kelvin : défini à partir du point triple de l'eau, qui vaut 273,16 K « Le kelvin est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau » 0 K est le zéro absolu (aucune agitation thermique)

- **Celsius** : $T (^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15$, le zéro absolu vaut donc $- 273,15 ^{\circ}\text{C}$
- **Fahrenheit** : L'échelle fahrenheit attribue une plage de $180 ^{\circ}\text{F}$ entre la température de solidification de l'eau et sa température d'ébullition (solidification de l'eau à $32 ^{\circ}\text{F}$ et point d'ébullition à $212 ^{\circ}\text{F}$). Ainsi :

$$T (^{\circ}\text{F}) = (9/5 T (^{\circ}\text{C})) + 32 \text{ ou}$$

$$T (^{\circ}\text{C}) = 5/9(T (^{\circ}\text{F}) - 32)$$



Echelles de température

3-2 Les thermomètres à résistance

La composition de chaque métal lui confère une résistance spécifique au passage du courant électrique. On appelle résistivité cette valeur qui, pour la plupart des métaux, varie en proportion directe de la température. Sur certains intervalles de température, cette variation est linéaire. La pente de sa variation s'appelle coefficient de température de la résistance ou sensibilité thermique. Cette linéarité forme la base de la mesure de la température par la résistance électrique. Les thermomètres à résistance sont essentiellement une bobine de fil de haute précision dont la résistance varie avec la température.

3-2- le principe

Le conducteur est un élément métallique. On peut établir une relation bijective entre la résistance R et la température T et ainsi mesurer T en mesurant R. Cette relation est de la forme :

$$R = R_0(1 + aT + bT^2 + cT^3)$$

Avec :

- T la température en °C,
- R₀ la résistance à 0 °C,
- a, b et c des coefficients positifs, spécifiques au métal

le platine est le matériau le plus utilisé.

3-3 Thermométrie à thermistance

Une thermistance est un agglomérat (accumulation) d'oxydes métalliques frittés, c'est-à-dire rendus compacts par haute pression exercée à température élevée, de l'ordre de 150 bars et 1000°C.

La résistance électrique d'une thermistance est très sensible à l'action de la température.



Thermistances

3-3-1 Principe des thermistances

Elles sont obtenues par frittage à haute température de poudre d'oxyde métallique. Exemple de composition d'une thermistance : Fe_2O_3 : Oxyde ferrique, $MgAl_2O_3$: Aluminate de magnésium, Zn_2TiO_4 : titane de zinc.

Leur résistance varie à l'inverse de la température suivant la loi théorique :

$$R_T = R_0 e^{(B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}))}$$

Avec : R_T : Résistance à la température absolue T.

B : « Constante » comprise entre 2000 à 9000°K, suivant les thermistances.

R_0 : Résistance à la température absolue T_0 (en degrés K).

T_0 : Température absolue à laquelle R_0 a été mesuré ($T_0 = 273,16^\circ K$)

Le courant passant dans la thermistance doit être le plus faible possible afin de ne pas augmenter sa température par *effet joule*. La puissance dissipée est de l'ordre du micro **Watt**, voir inférieure. Parfois ce courant ne passe dans la thermistance qu'au moment de la mesure.

Remarque : Il est difficile d'obtenir des thermistances ayant les mêmes caractéristiques. Lorsqu'une thermistance est soumise à une pression sa résistance diminue. Il faut donc les isoler mécaniquement de la pression. Par faibles profondeurs (inférieures à 100 m) elles sont noyées dans une perle de verre ; pour des profondeurs plus importantes, elles seront protégées par un cylindre d'inox. Ces protections ont l'inconvénient d'augmenter leurs temps de réponse.

3-3-2 Linéarisation d'un capteur a thermistance

Afin d'obtenir une tension de sortie S qui varie quasi linéairement avec la température, il faut réaliser un montage diviseur en plaçant une résistance R1 en série avec la thermistance (voir schéma ci-dessous). La tension de sortie aux bornes de R1 s'exprime :

$$s = v \left(\frac{R_1}{R_1 + R_T} \right) \dots\dots(1)$$

Avec : $R_T = R_0 e^{(B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}))} \dots\dots(2)$

On pose $R_e = R_0 e^{(-\frac{B}{T_0})}$

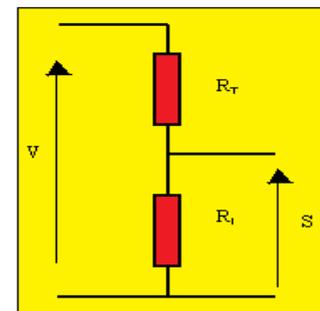
(2) devient : $R_T = R_e e^{\frac{B}{T}} \dots\dots(3)$

En basant sur le principe de la fonction de transfert (f) :

De (1) : $\frac{s}{v} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_T} \right) = f \dots\dots(4)$

Par dérivation de (4) : $f' = \left(\frac{R_1}{(R_1 + R_T)^2} \right) \frac{dR_T}{dT}$

$$f'' = \left(\frac{2R_1}{(R_1 + R_T)^3} \right) \left(\frac{dR_T}{dT} \right)^2 - \left(\frac{R_1}{(R_1 + R_T)^2} \right) \frac{d^2 R_T}{dT^2} \dots\dots(5)$$



Par dérivation (3) : $\frac{dR_T}{dT} = \frac{B}{T^2} R_e e^{\left(\frac{B}{T}\right)}$

$$\frac{d^2R_T}{dT^2} = \frac{2B}{T^3} R_e e^{\left(\frac{B}{T}\right)} + \frac{2B}{T^4} R_e e^{\left(\frac{B}{T}\right)} \rightarrow \frac{d^2R_T}{dT^2} = (B + 2T) \frac{B}{T^4} R_e e^{\left(\frac{B}{T}\right)}$$

Nous voulons obtenir une tension de sortie qui varie presque *linéairement* avec la température de part et d'autre d'une température moyenne T_m . Pour cette température T_m la valeur de *la thermistance* est :

$$R_m = R_e e^{\left(\frac{B}{T_m}\right)} \text{ D'où : } \frac{dR_T}{dT} = \frac{B}{T^2} R_m$$

$$\frac{d^2R_T}{dT^2} = (B + 2T_m) \frac{B}{T_m^4} R_m \dots (6)$$

Replaçant (6) dans (5) :

$$f'' = \left(\frac{2R_1}{(R_1 + R_T)^3}\right) \left(\frac{B}{T^2} R_m\right)^2 - \left(\frac{R_1}{(R_1 + R_T)^2}\right) (B + 2T_m) \frac{B}{T_m^4} R_m$$

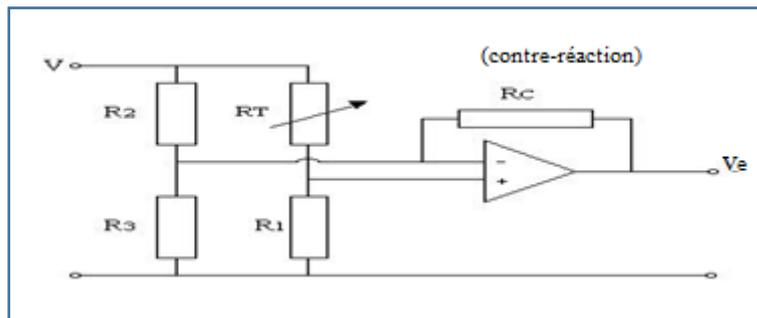
Cette dérivée seconde s'annule (point d'inflexion) et la tension de sortie est alors quasi proportionnelle à la température pour :

$$2R_1 R_m^2 B^2 - R_1 B R_m (B + 2T_m) (R_1 + R_m) = 0$$

La valeur optimale de la résistance R qu'il faut placer en série avec la thermistance a pour valeur :

$$R_1 = R_m \left(\frac{B - 2T_m}{B + 2T_m}\right) \dots (7) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Avec : } T_m \text{ est la température au milieu de la plage de mesure.} \\ R_m \text{ la valeur de la thermistance à la température } T_m. \end{array} \right.$$

Pour le montage électronique assurant ce fonctionnement, on propose ;



Exemple d'application sur la linéarisation :

Considérant par exemple la chaîne de thermistances AANDERAA. Dont, l'écart par rapport à la loi moyenne + 0,1°C. Résolution possible après étalonnage de chaque thermistance + 0,03°C.

Constante de temps 12 s ; Coefficient B ≈ 2966.1 °K

La variation de la valeur de la thermistance (R_m)

en fonction de la température (T_m), est illustrée

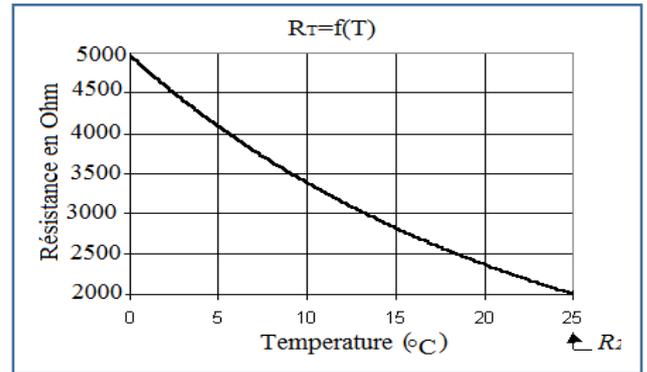
dans la figure suivante :

De la courbe on constate :

0°C, $R_0 = 5000 \Omega$ et à 25°C, $R_{25} = 2000 \Omega$

D'où nous déduisons de l'équation (2) ;

$$B = \frac{\ln\left(\frac{R_{25}}{R_0}\right)}{\frac{1}{T_{25}} - \frac{1}{T_0}} \longrightarrow B = 2981.8^\circ\text{K}$$



On suppose que le capteur doit mesurer des températures entre -5°C et 15°C. Nous en déduisons que :

$$T_m = 5 + 273.16 = 278.15 \text{ }^\circ\text{K}$$

Puis à l'aide de (3) nous trouvons : $R_m = 4108.3 \Omega$

D'où en utilisant (7) : $R_1 = 2818 \Omega$

Pour avoir une tension nulle ($V_e = 0$ volts) à la sortie de l'amplificateur lorsque la température est de 0°C, il faut que :

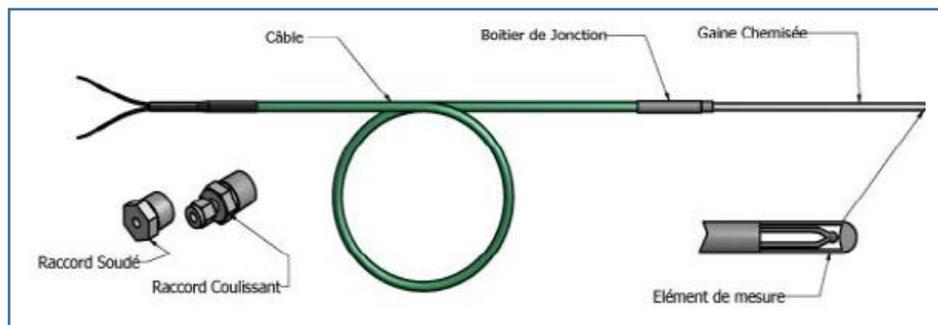
$$\frac{R_2}{R_3} = \frac{R_0}{R_1}$$

Une fois les valeurs de R_2 et de R_3 choisies il reste à calculer la valeur de contre-réaction R_c afin d'obtenir, en ajustant le gain de l'amplificateur A, la tension de sortie "Ve" souhaitée

$$A = \frac{R_c(R_2 + R_3)}{R_2 R_3}$$

3-4 Thermocouple ou thermoélectrique

Un thermocouple est constitué de deux conducteurs A et B soudés à leurs extrémités formant ainsi une jonction dite soudure chaude. Cette dernière constitue l'élément sensible du thermocouple.



Constitution d'un thermocouple industriel

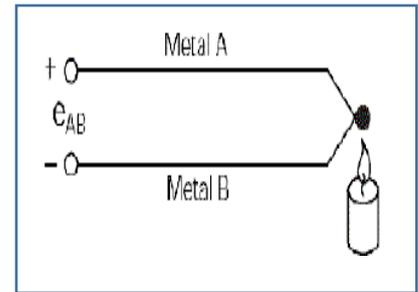
3-4-1 Principe de fonctionnement

Un thermocouple utilise principalement l'Effet Seebeck afin d'obtenir une mesure de la température. Si on réunit à une extrémité deux fils métalliques de natures différentes et que l'on élève la température de cette extrémité, il apparaît une tension e_{AB} aux extrémités restées libres.

On appelle :

Soudure chaude : Jonction l'ensemble thermocouple soumis à la température à mesurer (la jonction capteur)

Soudure froide : Jonction l'ensemble thermocouple maintenu à une température connue ou à 0°C (la jonction Référence)



Les phénomènes thermoélectriques dans les chaînes de conducteurs métalliques ou semi-conducteurs décrivent les conversions d'énergie qui s'opèrent en leur sein, effet Joule mis à part, entre énergie d'agitation thermique et énergie électrique des charges en mouvement.

À la jonction de deux conducteurs A et B différents mais à la même température, s'établit une différence de potentiel qui ne dépend que de la nature des conducteurs et de leur température T (effet Peltier).

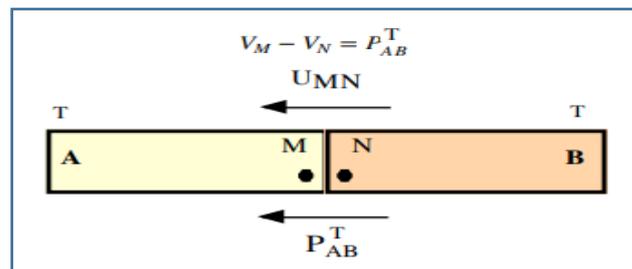


Figure 1 : Effet Peltier

La loi de Volta nous dit que dans un circuit isotherme, constitué de conducteurs différents, la somme des f.e.m. de Peltier est nulle. On a donc : $P_{AB}^T + P_{BC}^T = P_{AC}^T$

Entre deux points M et N à température différente, à l'intérieur d'un conducteur homogène A s'établit une force électromotrice qui ne dépend que de la nature du conducteur et des températures aux points M et N (Effet Thomson) :

$$T_A^{T_M T_N} = \int_{T_N}^{T_M} h_A dT$$

C'est la force électromotrice de Thomson ; h_A : coefficient de Thomson du conducteur A (fonction de la température). Soit un circuit fermé, constitué de deux conducteur A et B dont les jonctions sont à des températures t_1 et t_2

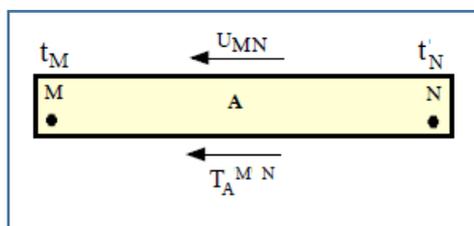


Figure 2 : Effet Thomson

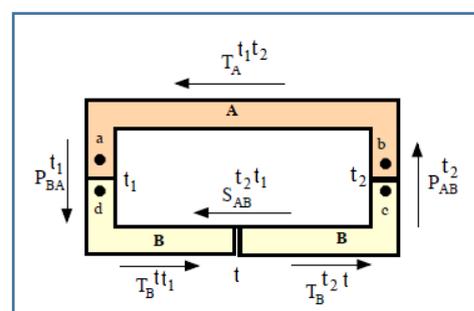


Figure 3 : Effet Seebeck

Le circuit de la figure 3 constitue un couple thermoélectrique. Ce couple est le siège d'une force électromotrice dit de Seebeck qui résulte des effets de Peltier et de Thomson qui s'y produisent.

$$S_{AB}^{t_2 t_1} = T_B^{t_2 t} + P_{AB}^{t_2} + T_A^{t_1 t_2} + P_{AB}^{t_1} + T_B^{t t_1}$$

Remarque : $P_{AB}^{t_1} = -P_{BA}^{t_1}$, $T_A^{t_1 t_2} = -T_A^{t_2 t_1}$

3 4-1 Différents types de thermocouples

Le domaine d'utilisation et le prix d'un thermocouple dépendent des métaux utilisés. A chaque couple de métaux, on associe une lettre normalisée. Voici les désignations correspondant aux principaux thermocouples utilisés dans l'industrie :

Thermocouples	Gamme de Températures	f.e.m (mV)	Précision
Cuivre / Constantan Type T (diamètre 1.63 mm)	-270 à 370°C	-6.258 à 19.027	± 2% de -100°C à -40°C ± 0.8% de -40°C à 100°C ± 0.75% de 100°C à 350°C
Fer / Constantan Type J (diamètre 3.25 mm)	-210 à 800°C	-8.096 à 45.498	± 3°C de 0°C à 400°C ± 0.75% de 400°C à 800°C
Chromel / Alumel Type K (diamètre 3.25 mm)	-270 à 1250°C	-5.354 à 50.633	± 3°C de 0°C à 400°C ± 0.75% de 400°C à 1250°C
Chromel / Constantan Type E (diamètre 3.25 mm)	-270 à 870°C	-9.835 à 66.473	± 3°C de 0°C à 400°C ± 0.75% de 400°C à 1250°C
Platine-Rhodium (10%) / Platine Type S (diamètre 0.51 mm)	-50 à 1500°C	-0.236 à 15.576	± 2.5°C de 0°C à 600°C ± 0.4% de 600°C à 1600°C
Platine-Rhodium (13%) / Platine Type R (diamètre 0.51 mm)	-50 à 1500°C	-0.226 à 17.445	± 1.4°C de 0°C à 538°C ± 0.25% de 538°C à 1500°C
Platine-Rhodium (30%) / Platine-Rhodium (6%) Type B (diamètre 0.51 mm)	0 à 2760°C	0 à 12.426	± 0.5% de 870°C à 1700°C

3-5 Pyromètre

La pyrométrie optique est une méthode de mesure de la température basée sur la relation entre la température d'un corps et le rayonnement optique (infrarouge ou visible) que ce corps émet. Les capteurs utilisés sont donc des capteurs optiques, photo-électrique ou thermiques. L'intérêt de la pyrométrie optique est de permettre la détermination d'une température sans contact avec l'objet ; c'est donc une méthode appropriée quand les conditions expérimentales n'autorisent pas l'utilisation de capteurs thermométriques classiques :

- Température très élevée (> 2000°C)

- Mesures à grande distance
- Environnement très agressif
- Pièce en mouvement
- Localisation des points chauds



Figure.4

3-5-1 Principes physiques

Tout corps émet spontanément et en permanence un rayonnement électromagnétique dont le spectre continu a une répartition énergétique fonction de la température : c'est le rayonnement thermique.

Les lois de cette émission sont d'abord établies pour un corps idéal, le corps noir.

- **Le corps noir** : il est caractérisé par une absorption totale de tout rayonnement incident.
- **Le corps réel** : son rayonnement thermique se rapproche plus ou moins de celui du corps noir suivant son pouvoir absorbant.

3-5-2 Lois du rayonnement thermique de corps noir

- **Emittance En** : c'est la puissance totale rayonnée dans un hémisphère par unité de surface de l'émetteur ($w.m^{-2}$).
- **Loi de Stefan** : $E_n = \sigma * T^4$ Avec $\sigma = 5.6810 - 8 w.m^{-2}K^{-4}$ constante de Stefan
- **Emittance spectrale $E_{\lambda,n}$** : C'est la densité spectrale de puissance rayonnée dans un hémisphère par unité de surface de l'émetteur, à une longueur d'onde λ .

Loi de Planck est la loi fondamentale de l'émission thermique ; elle donne l'émittance spectrale d'une source (en $wm^{-3}.sr^{-1}$) qui est un corps noir en fonction de la longueur d'onde et de la température absolue T de cette source :

$$E_{\lambda,n}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} \quad \text{Avec } C_1 = 2\pi h C^2 \text{ et } C_2 = hC/k$$

h : Constante de Planck = $6.6256 \cdot 10^{-34} w.s^2$

C : vitesse de la lumière = $2.998 \cdot 10^8 m.s^{-1}$

k : Constante de Boltzmann = $1.38054 \cdot 10^{-23} wsK^{-1}$

Evolution de l'émittance spectrale en fonction de la longueur d'onde pour diverses températures :

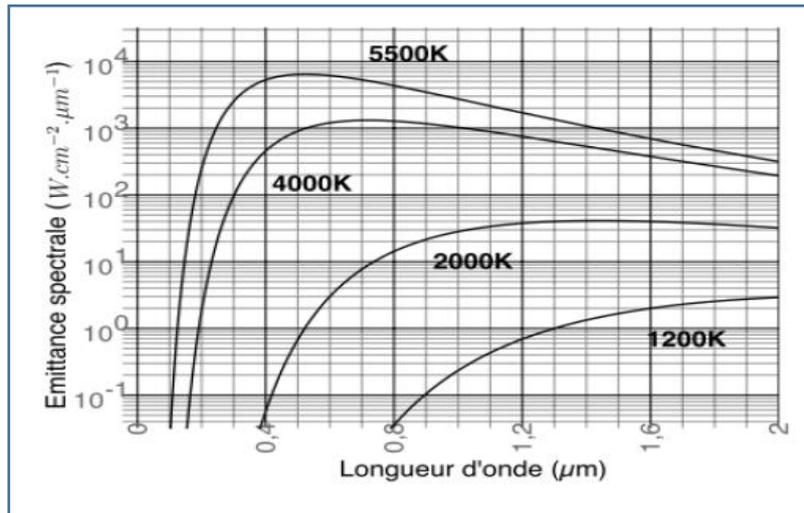


Figure 5 : l'émittance spectrale en fonction de la longueur d'onde pour diverses températures

Sur la figure, on remarque l'augmentation rapide de l'émittance avec la température et le déplacement du spectre de l'infrarouge vers le visible (de $0.4 \mu m$ à $0.8 \mu m$) au fur et à mesure que la température augmente.

Remarque :

- En dessous de $500^{\circ}C$, le rayonnement thermique est quasi totalement dans le domaine infrarouge ;
- Dans le cas du soleil, ($T = 5500 K$) E_{λ} max correspond au maximum de sensibilité de l'œil.

3-5-3 Lois du rayonnement thermique de 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 ;

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

$e(\lambda, T)$: Émittance du corps réel à la longueur d'onde λ et à la température T . Elle est égale à son coefficient d'absorption (loi de Kirchhoff). Elle est inférieure à 1 et dépend de la nature du corps réel et de son état de surface. L'incertitude sur sa valeur est l'une des principales sources d'erreurs potentielles en pyrométrie optique.