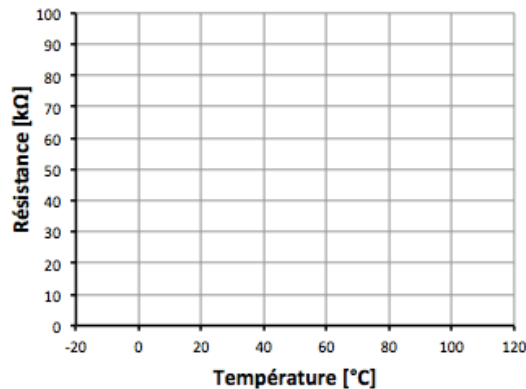


Chapitre 6 – Exercices et questions

Exercice 6.1 Capteurs de température à résistance

Pour les capteurs de température basés sur des résistances électriques, on a principalement deux classes de matériaux : les métaux (RTD) et les NTC.

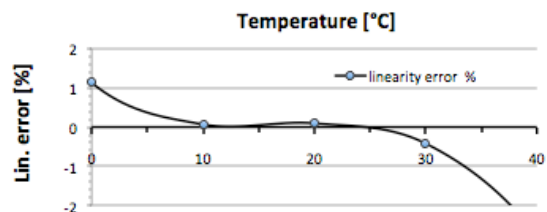
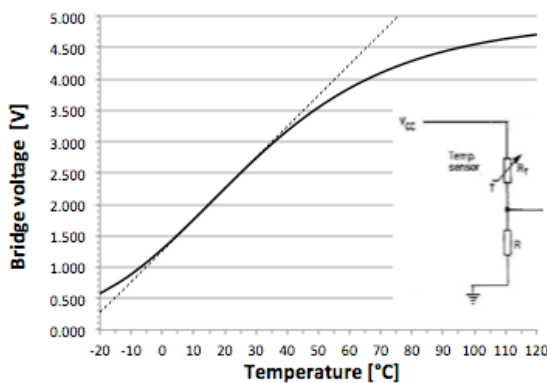
1. Dessiner la courbe de résistance en fonction de la température pour ces deux classes de matériaux. Expliquez les comportements.
2. Dessiner le schéma d'une mesure à quatre fils et expliquer pourquoi on élimine l'effet de résistance des fils.



Exercice 6.2 Thermistors

Un thermistor (NTC) a les paramètres suivants : $B=3435\text{ K}$, $R_{25^\circ\text{C}}=10\text{ k}\Omega$

1. Calculer la valeur de la résistance à 35°C
2. On place le thermistor dans un diviseur résistif avec une résistance de référence de $10\text{ k}\Omega$ et une tension d'alimentation de $V_0=5\text{V}$. Graphe ci-dessous. Notez que le diviseur résistif linéarise la mesure dans une certaine gamme de température.
 - a. Calculer la tension exacte mesurée à 35°C .
 - b. Calculer la tension mesurée à 35°C si on linéarise $V_m(T)$ autour de 25°C :
$$V_m = V_{offset} + \alpha (T - 25) \quad (\text{à vous de calculer } V_{offset} \text{ et } \alpha)$$



Exercice 6.3 Capteur de température à diode (PTAT)

On peut mesurer la température avec une diode grâce à la dépendance thermique du courant direct (forward).

1. Ecrire la formule pour la dépendance de la tension aux bornes de la diode (mode forward) en fonction de la température (sans expliciter la dépendance de I_0 sur T)
2. Comme I_0 dépend fortement de la température, on ne peut pas utiliser cette formule pour calculer la température. Expliquer comment, par une mesure différentielle, on peut s'affranchir de I_0 pour trouver T (baser votre explication sur un schéma).

Exercice 6.4 Thermocouples

1. Dessiner le schéma de mesure typique d'un thermocouple et justifier l'usage d'une jonction de référence.
2. Si la jonction de référence n'est pas mise à une température de référence connue, on peut faire une « compensation électronique » qui utilise un capteur de température (par ex. un capteur qui délivre un courant variant avec la température). On place pour ceci une résistance en série dans le circuit du thermocouple. Dessiner le schéma et dire comment on peut calculer cette résistance (on connaît la sensibilité du thermocouple et la sensibilité du capteur thermique).

Exercice 6.5 Capteur infrarouge thermique

- Dessiner le modèle thermique équivalent d'un bolomètre
- écrire l'équation de bilan thermique (avec les paramètres ci-dessous)

Φ_{rad} : intensité IR sur le capteur [W/m^2]

$T(t)$: température de l'élément

$C_{th} = m c_v$: capacité thermique du capteur

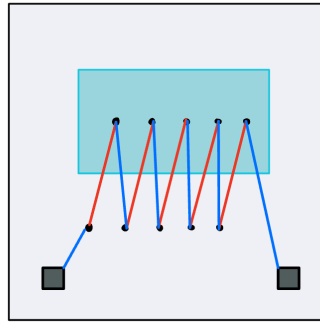
G_{th} : conductance thermique [W/K]

ε : émissivité

A : surface

Exercice 6.6 Thermopile

- A) Dessiner (vu de dessus) un capteur IR à thermopile (bien spécifier comment sont placés les thermocouples et les positions des jonctions « chaudes » et « froides »).

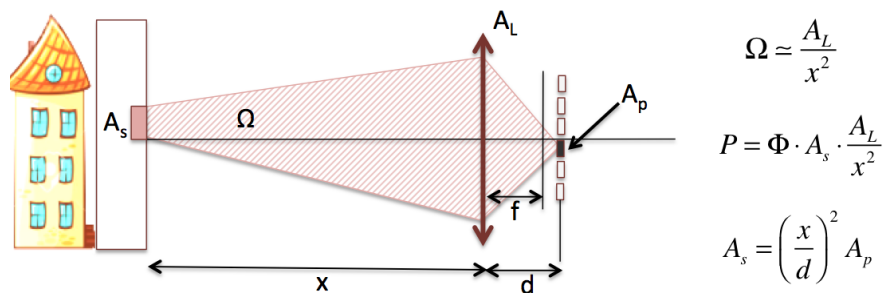


- B) Dans une thermopile, on inclut généralement un capteur de température ambiante. A quoi sert ce capteur ?
- C) La sensibilité d'un capteur IR à thermopile augmente linéairement avec le nombre de jonctions. Il est donc favorable de faire un grand nombre de jonction. Cependant, afin de déterminer la résolution, il est important de vérifier comment le bruit du capteur dépend du nombre de jonctions.

Expliquez comment varie le rapport signal sur bruit d'une thermopile en fonction du nombre de jonctions.

Exercice 6.7 Imageurs à micro-bolomètres

Une matrice de micro-bolomètres est utilisée pour une mesure thermographique. Le schéma optique est donné ci-dessous :



A_p : surface du pixel A_L : surface de la lentille A_s : surface « imagée » par un pixel
 f : focale de la lentille x : distance de l'objet d : distance du plan focal

Le flux thermique total imagé par un pixel [W] et capté par la lentille est donné par :

$$P = \Phi \cdot \frac{1}{d^2} A_p \cdot A_L \quad \frac{1}{d} + \frac{1}{x} = \frac{1}{f} \quad P = \Phi \cdot A_p \cdot A_L \cdot \left(\frac{1}{f} + \frac{1}{x} \right)^2$$

Questions :

1. Quel est le flux thermique *net* (puissance) reçu un pixel si on considère les paramètres suivants :

Distance $x \gg f$, rayon de la lentille $r=1$ cm, $f=2$ cm, pixel carré de $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$, température ambiante $T=300\text{K}$, température de la zone imagée $T=302\text{K}$, émissivité de la source $\varepsilon=1$.

2. Quelle est l'élévation de température du pixel si la conductance thermique du pixel sur le substrat est de $G_{th} = 10^{-6} \text{ W/K}$ pour cette taille de pixel (et on considère une émissivité du pixel $\varepsilon=1$)

Exercice 6.8 Capteurs pyroélectriques

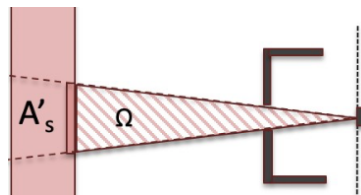
Expliquer pourquoi un capteur pyroélectrique atteint sa sensibilité maximale pour une fréquence de modulation du signal de source supérieure à sa fréquence de coupure thermique ?

Quel phénomène limite la réponse du capteur à haute fréquence ?

Exercice 6.9 Thermométrie IR

Une thermopile est utilisée comme capteur de température IR. L'angle d'ouverture est de 30° , la température de la cible est 40°C (émissivité $e=0.9$) et la température de l'instrument est de 20°C . Émissivité de la thermopile $e=1$. Surface de la thermopile 4 mm^2 .

1. Quelle est la puissance IR captée par la thermopile ?
1. Quelle est la tension de mesure de la thermopile si la sensibilité est 20 V/W (sur le détecteur)?
2. Quelle est l'erreur de mesure si l'émissivité de la cible était 0.8 (et non 0.9)?



Exercice 6.10 Thermopile - calcul de sensibilité.

An IR sensor is used to detect hot spots in forests to prevent fires. The sensor is made with 64 pairs of junctions using a silicon/aluminum junctions. Each The silicon/aluminum thermocouple has a sensitivity $S_{AB} = 146 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

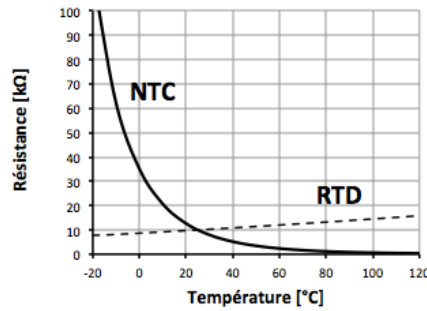
The absorber is made of a thin gold foil, $10 \mu\text{m}$ thick and 2 cm^2 in area, coated black to increase absorption. Gold has a density 19.25 g/cm^3 and a heat capacity $C = 129 \text{ J/kg}/^\circ\text{C}$. The absorber is not ideal, and its conversion efficiency is only 85% (i.e., 85% of the incoming heat is absorbed). We will denote efficiency as $e = 0.85$.

The window of the sensor has an area $A = 2 \text{ cm}^2$. It takes the sensor 200 ms to reach thermal steady state. This steady state temperature is due to the balance between absorbed heat and heat loss.

Remember it take about 5 times constants τ to reach steady state.

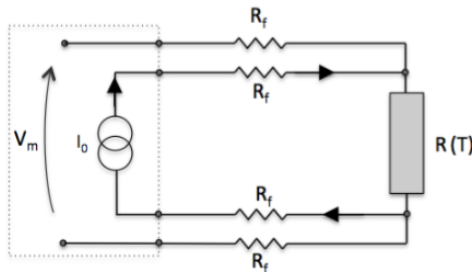
Calculate the sensitivity ($S = V_{out}/P_{in}$) of the sensor. P_{in} in W/m^2 , i.e. P_{in} is the power per unit area impinging on the detector window.

Exercice 6.1 Corrigé:



Les NTC sont des semiconducteurs intrinsèques. Leur résistivité est élevée. Elle diminue lorsque la température augmente car la densité des porteurs de charge augmente dans la bande de conduction (à cause de l'énergie thermique qui permet de franchir la bande interdite). La courbe est fortement non-linéaire, mais la pente (=sensibilité) est élevée.

Les RTD sont des conducteurs métalliques dont la résistance augmente avec la température. La sensibilité thermique est plus faible que les semiconducteurs, mais ils ont une meilleure linéarité.



On utilise une source de courant. Les deux fils de mesure de la tension sont directement connectés aux bornes du capteur. Si l'élément mesure de tension (voltmètre) a une résistance interne très élevée, quasiment aucun courant passe par les fils de mesure de tension, donc 1) pas d'erreur due à la chute de tension dans ces fils et 2) tout le courant passe par le capteur, pas d'erreur due à la résistance des fils de courant.

Exercice 6.2 Corrigé:

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

1. Résistance à 35°C : $B=3435 \text{ K}$ $R_{25^\circ\text{C}}=10 \text{ k}\Omega \Rightarrow R_{35^\circ\text{C}}=6878 \Omega$

2. Tension après diviseur : $V_0=5 \text{ V} \Rightarrow V_m=2.96 \text{ V}$

$$V_m = \frac{R_C}{R_C + R_{th}} \text{ avec } R_C=10 \text{ k}\Omega$$

Le but du capteur est de mesurer la température. Nous mesurons V_m , et avons besoins de passer de V_m à T .

Pour linéariser autour de 25°C, nous allons écrire :

$$V_m = V_{offset} + \alpha(T^\circ\text{C} - 25^\circ). \text{ Nous devons donc trouver } \alpha$$

$V_{offset} = \frac{V_0}{2}$ car c'est la tension du diviseur résistif à 25°C (on prend $R_{fixe} = 10 \text{ k}\Omega$ pour un diviseur équilibré à 25°C))

$$V = V_{\{offset\}} + \alpha(T - 25)$$

on peut donc écrire $\alpha = \frac{dV}{dT}$

$$V = \frac{R_c \cdot V_0}{R_c + R_t(T)}$$

$$R_t = R_0 \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$$

$$\frac{dV}{dT} = - \frac{R_c \cdot V_0}{(R_c + R_T)^2} \cdot \frac{d}{dT} (R_c + R_T)$$

$$\frac{dR_T}{dT} = R_0 \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \cdot B \frac{d}{dT} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

$$\frac{dR_T}{dT} = B R_0 \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \left(-\frac{1}{T^2} \right) = -\frac{R_T B}{T^2}$$

$$\frac{dV}{dT} = \frac{R_c \cdot V_0}{(R_c + R_T)^2} \cdot R_T \cdot \frac{B}{T^2}$$

A 25°C, $R(T) = R_0 = 10 \text{ k}\Omega$

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dT} &= \frac{R_c \cdot R_0}{(R_c + R_0)^2} \cdot \frac{B}{T^2} \cdot V_0 \\ &= \frac{V_0}{4} \cdot \frac{B}{T^2} \quad T = 25 + 273 \\ &= 0.0484 \end{aligned}$$

et donc $\alpha = 0.0484$

Et donc à 25°C, le V linéarisé est :

$$V = \frac{V_0}{2} + 0.0484 \cdot 10$$

V_m linéarisé à 35°C : $V_{m,lin} = 2.984 \text{ V}$

Par la formule complète $V_m = 2.96 \text{ V}$.

Erreur de non-linéarité : $(V_m - V_{m,lin}) / V_m = -0.71\%$

Exercice 6.3 Corrigé:

PTAT : le courant direct à travers une diode donnée par $I = I_0 \exp(qV / k_B T)$. La tension aux bornes de la diode serait donc proportionnelle à $1/T$ pour un I courant fixé. Néanmoins, la valeur de I_0 dépend aussi fortement de la température.

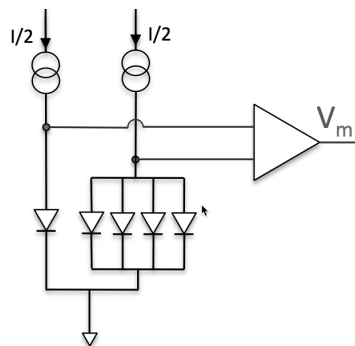
1. Tension aux bornes de la diode : $V_1 = \frac{k_B T}{q} [\ln(I) - \ln(I_0)]$

2. Pour éliminer l'inconnue I_0 , on fait une mesure différentielle, par exemple entre une diode et N diodes en parallèle

$$V_N = [\ln(I) - \ln(N \cdot I_0)] q / K_B T = [\ln(I) - \ln(I_0) - \ln(N)] q / K_B T$$

Si on mesure la différence de tension (pour un même courant) entre une diode et N diodes, il reste une expression très simple qui ne dépend plus de I_0 et ne comporte aucun paramètre géométrique :

$$V_1 - V_N = \frac{k_B T}{q} \cdot \ln(N)$$



1 diode

$$V_1 = \frac{k_B T}{q} \left[\ln\left(\frac{I}{2}\right) - \ln(I_0) \right]$$

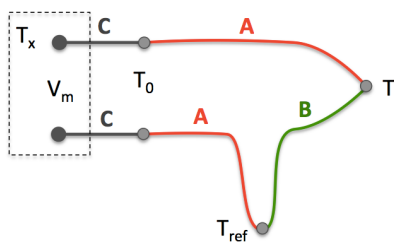
N diodes en parallèle

$$V_N = \frac{k_B T}{q} \left[\ln\left(\frac{I}{2}\right) - \ln(I_0) - \ln(N) \right]$$

Différence

$$V_1 - V_N = \frac{k_B T}{q} \cdot \ln(N)$$

Exercice 6.4 Corrigé:



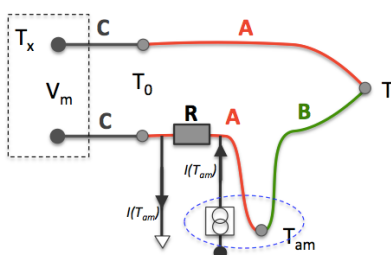
$$V_m = S_C(T_0 - T_x) + S_A(T - T_0) + S_B(T_{ref} - T) + S_A(T_0 - T_{ref}) + S_A(T_x - T_0)$$

$$S_C(T_0 - T_x) = -S_C(T_x - T_0)$$

$$S_A(T - T_0) + S_A(T_0 - T_{ref}) = S_A(T_0 - T_{ref})$$

$$V_m = S_{AB}(T - T_{ref})$$

La jonction de référence permet d'éliminer les paramètres inconnus des fils C et de T_0 et T_x (pour autant que T_0 et T_x soient identiques sur les deux fils)



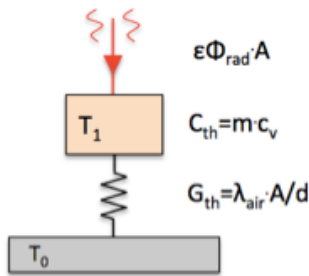
Calcul de la résistance de compensation :

$$R \cdot S_{th} \cdot T_{am} = S_{AB} \cdot T_{am} \Rightarrow R = \frac{S_{AB}}{S_{th}}$$

S_{th} est la sensibilité du capteur de température (en A/K)

Exercice 6.5 Corrigé:

Le microbolomètre est constitué d'un capteur de température suspendu (ou placé sur une membrane) et isolé thermiquement de son support. La radiation IR chauffe le capteur et augmente sa température par rapport au support. Le capteur du bolomètre est une résistance.



$$\varepsilon \Phi_{rad} A = C_{th} \frac{dT_1}{dt} + (T - T_0) G_{th}$$

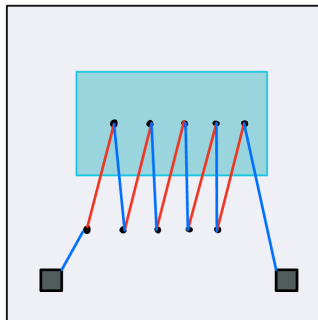
$$\varepsilon \Phi_{rad} A = h \cdot A \cdot \rho \cdot c_v \frac{dT_1}{dt} + (T - T_0) \frac{\lambda_{air}}{d} A \quad \tau_{th} = \frac{C_{th}}{G_{th}} = \frac{d \cdot h \cdot \rho c_v}{\lambda_{air}}$$

$$\varepsilon \Phi_{rad} = h \cdot \rho \cdot c_v \frac{dT_1}{dt} + (T - T_0) \frac{\lambda_{air}}{d}$$

A : surface h : épaisseur d : gap ρ : densité Φ_{rad} : intensité IR [W/m^2]

Exercice 6.6 Corrigé:

A) Le capteur est exposé à la radiation IR sur toute sa surface. Les jonctions « chaudes » sont sur une membrane mince (donc isolée thermiquement du substrat). Les jonctions « froides » sont sur le cadre du capteur, qui est à température ambiante.



Un absorbeur peut être déposé sur les jonctions chaudes (zone grise dans le schéma)

Les jonctions placées sur la membrane subissent une élévation de température car elles sont plus isolées thermiquement du substrat les jonctions en contact direct avec le cadre. Le rayonnement IR donne lieu à une élévation de température de jonctions sur la membrane.

Les jonctions chaudes et froides alternées en série forment la thermopile qui somme les tensions aux bornes de chaque couple.

B) Le capteur de température ambiante (placé sur le cadre du capteur) permet de compenser la variation de sensibilité des thermocouples S_{AB} en fonction de la température.

C) La tension de mesurée est proportionnelle à N

Le bruit est dû aux résistances des fils, et donc proportionnel à la racine de N

Le rapport signal sur bruit est ainsi \sqrt{N}

Exercice 6.7 Corrigé:

1. Puissance reçue par le pixel : $P = 2.4 \cdot 10^{-8} W$

$$\text{Car } P = \frac{\varepsilon \sigma (T^4 - T_{amb}^4) A_{pixel} A_{lentille}}{f^2}$$

2. Elévation de température : $\Delta T = P/G_{th} = 0.024 \text{ } ^\circ\text{C}$

Exercice 6.8 Corrigé:

Voir note de cours slides slides 74-77

Exercice 6.9 Corrigé:

Le bilan de flux de radiation sur le capteur (reçu – émis)

$$\phi_{rad} \approx \sigma (\varepsilon_{obj} T_{obj}^4 - \varepsilon_{capt} T_{capt}^4) \cdot A_d \cdot 4\pi \cdot \sin^2 \varphi$$

Et nous avons $V_m = S_0 \cdot \phi_{rad}$

1. pour une émissivité de 0.9,

$\phi_{rad} = 242 \text{ } \mu\text{W}$ pour angle de 15° (ouverture de 30°).

Comparer à exo 6.7. Ici plus de puissance car capteur plus grand : 1 seul capteur de 4 mm^2 pour toute la lumière, pas de petits pixels de $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$.

2. $V_m = 4.84 \text{ mV}$

3. Si émissivité de l'objet n'est que 0.8, alors l'objet émet moins de radiation pour une même température. Il n'y que $59 \text{ } \mu\text{W}$ de puissance net reçue et V_m passe de à 1.17 mV

Si la vraie émissivité est 0.8 et que nous pensons (à tort) qu'elle est 0.9, nous allons largement sous-estimer la température.

Erreur de température

$$T_{obj} = \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon_{obj}} \left[T_{capt}^4 + \frac{V}{4 \pi A_d S_0 \sigma \sin^2 \varphi} \right]}$$

1.17 mV correspond à $39.99 \text{ } ^\circ\text{C}$ si $\varepsilon_{obj} = 0.8$, mais donne 30.9° si $\varepsilon_{obj} = 0.9$

Erreur de 9°

Exercice 6.10 Corrigé

La température de la partie froide du capteur est T_0 .

La température de la partie chaude du capteur est T_1 .

$$\Delta T = T_1 - T_2$$

Puissance absorbée par capteur = $e A P_{in}$

rappel P_{in} en $[\text{W}/\text{m}^2]$. e : efficacité de conversion du capteur

$$V = N S_{AB} \Delta T$$

$$\Delta T = \frac{e A P_{in}}{G_{th}}$$

$$G_{th} = m \frac{c_v}{\tau}$$

$$\text{donc } V = N S_{AB} (e A P_{in}) \tau \frac{1}{m c_v}$$

$$\frac{V}{P_{in}} = N S_{AB} e A \tau \frac{1}{m c_v}$$

$\tau \approx 40 \text{ ms}$ car on indique 200 ms pour arriver à l'équilibre, ce qui prend environ 5τ

$N = 64$. $S_{AB} = 146 \text{ } \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. $e = 0.85$. $A = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$. $m = 10 \cdot 10^{-6} \times 2 \cdot 10^{-4} \times 19.25 \cdot 10^3 = 3.85 \cdot 10^{-5} \text{ kg}$
 $c_v = 129 \text{ J/kg}/^\circ\text{C}$

$$\frac{V}{P_{in}} = \mathbf{1.3 \cdot 10^{-5} \text{ V.m}^2/\text{W}}$$

Par exemple, pour 10 W/m^2 de puissance incidente (à peu près 1/100 soleil) le signal est $130 \text{ } \mu\text{V}$.