

	Sciences et Technologies de l'Industrie et du Développement Durable		
	INGÉNIERIE, INNOVATION ET DÉVELOPPEMENT DURABLE		
	Approche fonctionnelle et structurelle des produits	Cours	2I2D

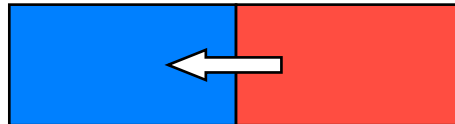
L'ÉNERGIE THERMIQUE

1. Introduction

L'objectif de cette séquence est d'étudier la manière dont est transmise l'énergie de manière à optimiser l'efficacité des systèmes. L'énergie est présente sous plusieurs formes, nous nous intéresserons plus particulièrement ici à l'énergie Thermique.

2. Notions de base

2.1. La température



La température se déplace toujours de la source chaude vers la source froide.

Il existe différentes échelles pour exprimer la température, voici les principales :

- Le degré Celsius (°C)
- Le kelvin (K)
- Le degré fahrenheit (°F)

2.2. L'énergie

L'énergie existe sous deux formes principales :

- Sous forme mécanique : Le travail
- Sous forme thermique : La chaleur

Elle s'exprime en Joules (J) :

2.3. La chaleur

2.3.1. Énergie

Nous nous intéresserons dans cette partie à la chaleur.

Définition :

C'est la forme d'énergie qui a pour caractéristique de modifier la température d'un corps.

Elle existe sous deux formes :

La chaleur sensible	La chaleur latente
C'est la part de la chaleur échangée qui fait varier la température.	C'est la part de la chaleur échangée qui fait changer d'état le système.
Q_s : Quantité de chaleur sensible échangé (J). m : Masse du corps considéré (kg). C_p : Capacité calorifique massique (J/(kg.K)). ΔT : Variation de température du corps (°C).	Q_L : Quantité de chaleur échangée (J). m : Variation de la masse du corps considéré (kg). L : Chaleur latente de changement d'état (J/kg).

2.3.2. Puissance portée par un fluide

Puissance portée sous forme sensible	Puissance portée sous forme latente
La chaleur sensible C'est la part de la chaleur échangée qui fait varier la température.	La chaleur latente C'est la part de la chaleur échangée qui fait changer d'état le système.
P_s : Puissance sensible (W). D_m : Débit massique (kg/s). C_p : capacité calorifique massique (J/(kg.K)). ΔT : Variation de température du corps (°C).	P_L : Puissance latente (W). D_m : Débit massique (kg/s). L : Chaleur latente de changement d'état (J/kg).

Exemple 1 : Chauffage d'un bassin de piscine.

Lors des opérations de nettoyage d'une piscine, un bassin de nage d'un volume de $V_{\text{eau}} = 630 \text{ m}^3$ est rempli d'eau froide à $T_{\text{initiale}} = 10 \text{ °C}$.

Afin de réchauffer ce bassin pour accueillir les baigneurs, sa température doit être élevée à $T_{\text{finale}} = 28 \text{ °C}$.

On donne : $C_{p_{\text{eau}}} = 4185 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ $\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ Kg/m}^3$

- Quelle est la quantité d'énergie Q nécessaire au chauffage du bassin ?

- Quelle puissance thermique P faut-il apporter à ce bassin afin de l'amener à T_{finale} en 24h ?

- À titre de comparaison, la puissance d'une chaudière gaz à condensation équipant une maison de plus de 150 m^2 est de l'ordre de 35 kW, en combien de temps cette dernière pourrait mettre à température l'eau de la piscine, en supposant qu'il n'y ait aucune perte thermique ?

Exemple 2 : Système de pompe à chaleur à eau chaude.

Une pompe à chaleur eau/eau réchauffe de l'eau chaude basse température (eau de chauffage) avec un débit de $D_1 = 1100 \text{ L/h}$. La température de cette eau passe de $\theta_{\text{initiale}} = 35^\circ\text{C}$ à $\theta_{\text{finale}} = 40^\circ\text{C}$ lors de son passage dans la pompe à chaleur.

On donne : $C_{p_{\text{eau}}} = 4185 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ $\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ Kg/m}^3$

Quelle est la puissance thermique P transportée par le débit d'eau ?

3. Les transferts de chaleur

3.1. Introduction

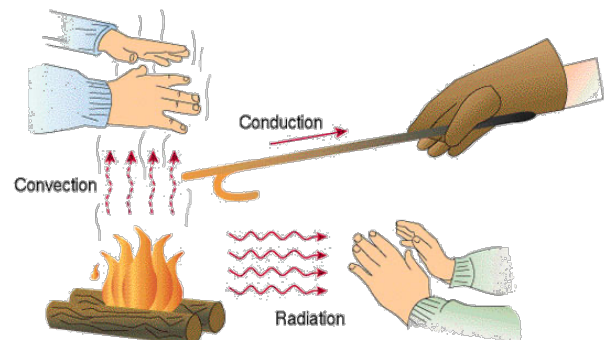
Deux corps solides, liquides ou gazeux en contact l'un avec l'autre sont en équilibre thermique s'ils sont à la même température.

Dans le cas contraire, il y a un transfert de chaleur entre ces deux corps. Le transfert se fera toujours de la source chaude vers la source froide.

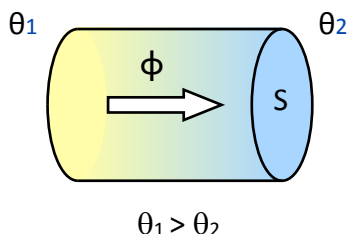


Il se caractérise sous trois formes :

- Conduction (solide)
- Convection (Liquide ou gaz/solide)
- Rayonnement, radiation (Transfert à distance)



3.2. Les flux de chaleur



La formulation générale du flux de chaleur est :

ϕ : Flux de chaleur ou débit de chaleur entre la source froide et la source chaud (J/s ou W).

Q : Énergie cédée par une source ou récupérée (J).

Δt : Temps du transfert de chaleur (s).

Le flux surfacique (φ) ou densité de flux :

φ : Densité de flux thermique (W/m^2).

S : Surface (m^2).

Le flux surfacique est utilisé si l'on veut comparer des transferts. En effet, le flux de chaleur est ramené à une unité de surface (on divise par S).

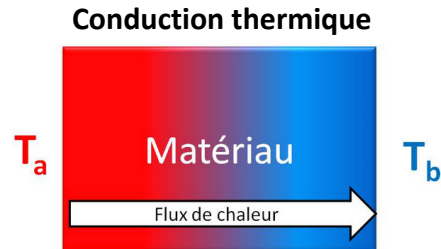
4. La conduction thermique

Dans ce transfert, la chaleur se propage à l'intérieur de la matière (source chaude vers source froide) sans déplacement de matière, l'échange s'effectue par conduction thermique.

La conduction va être générée si :

- Le milieu de transfert est solide.
- Une différence de température existe.

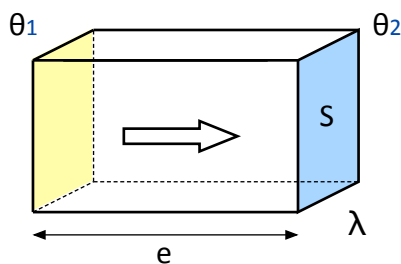
La conduction s'effectue sans déplacement de matière.



4.1. Généralités

Nous étudierons uniquement la conduction à travers une paroi plane à notre niveau et dans cet exemple.

Transfert de chaleur par conduction :



La conduction est fonction des caractéristiques du matériau (conductivité thermique du matériau).

Le métal par exemple est plus conducteur de chaleur que le plastique.

Il y a conduction quand $\theta_1 > \theta_2$.

4.2. Paroi plane :

ϕ : Flux surfacique (W/m^2)

λ : Conductivité thermique du matériau ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$).

$\Delta\theta$: Écart de température (K ou $^{\circ}\text{C}$).

e : Épaisseur de la paroi (m).

Caractéristiques de certains matériaux :

Nature du corps	Masse volumique	Chaleur massique	Conductivité thermique
Notation	ρ	C	λ
Unité	kg / m^3	$\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$	$\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})$
Argent	10500	230	418
Cuivre	8940	380	389
Aluminium	2700	860	200
Acier	7850	490	46
Béton	2300	960	0,92
Verre	2530	840	1,20
Polystyrène	44		0,025
Laine de verre	200	0,67	0,040

4.2.1. Résistance thermique

Soit R_{th} , la résistance thermique de la paroi. Elle définit la capacité de la paroi à laisser passer la chaleur.

R_{th} : Résistance thermique (K/W).

λ : Conductivité thermique du matériau (W/(m.K)).

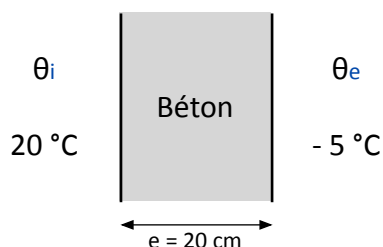
e : Épaisseur de la paroi (m).

4.2.2. Le flux thermique

ϕ : Flux thermique (W).

Exemple 3 :

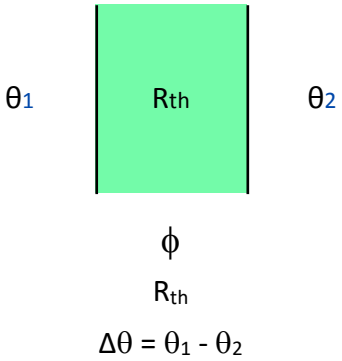
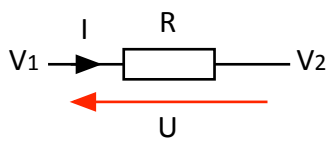
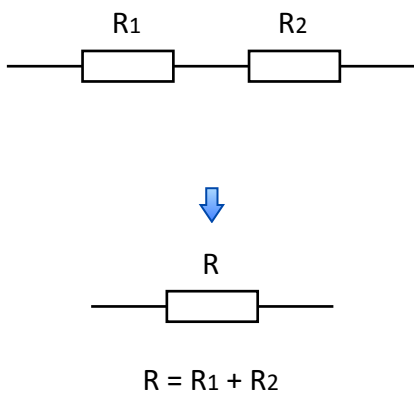
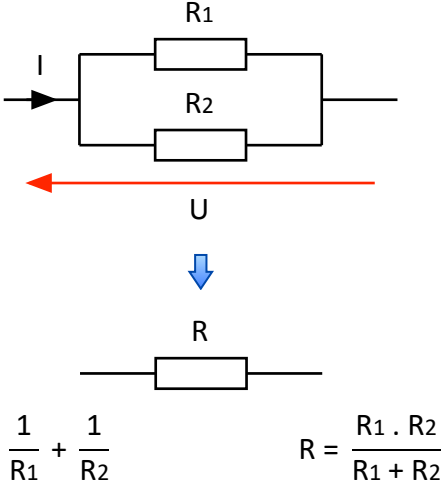
- Déterminez la densité de flux thermique ϕ (flux surfacique) perdu par la paroi suivante :



On suppose qu'il s'agit d'un appartement de 70 m^2 situé dans les étages (avec aucune perte par le plancher ni par le plafond) et présentant un contact avec l'extérieur de 17 m de long (on néglige l'effet des fenêtres ou portes fenêtres et les ponts thermiques) et de $2,7\text{ m}$ de hauteur.

- Calculer la puissance totale du dispositif de chauffage qu'il faut installer afin de maintenir la température intérieure à 20 °C .

4.3. Analogie entre la thermique et l'électricité

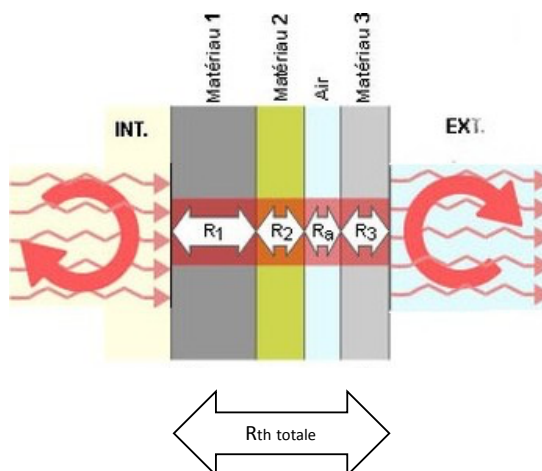
 <p>θ_1 R_{th} θ_2</p> <p>ϕ R_{th} $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$</p>	 <p>V_1 I R V_2</p> <p>U</p> <p>I R $U = V_1 - V_2$</p>
 <p>R_1 R_2</p> <p>R</p> <p>$R = R_1 + R_2$</p>	 <p>R_1 R_2</p> <p>I U</p> <p>R</p> <p>$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ $R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$</p>

4.4. Parois parallèles

4.4.1. Association de parois planes

Si l'on étudie le transfert d'énergie calorifique à travers un mur d'une habitation, on trouve différents matériaux.

En appliquant l'analogie avec les lois électriques vues ci-dessus, on peut écrire pour le mur ci-dessous :



4.4.2. Applications

Exercice 1 (appartement de l'exemple 3) :

On isole les parois donnant sur l'extérieur à l'aide d'un polystyrène de 10 cm d'épaisseur placé sur l'extérieur (diminution des ponts thermiques).

- Déterminer la résistance thermique de l'ensemble béton et polystyrène.

- Déterminer la puissance de chauffage nécessaire afin de maintenir la température ambiante à 20°C dans ces nouvelles conditions ?

Exercice 2 (exemple dans l'habitat) :

Soit un vitrage simple d'épaisseur $e = 5 \text{ mm}$, de coefficient de conductibilité $\lambda = 1,15 \text{ W/(m.K)}$.

La température de surface du vitrage intérieure est $\theta_i = 22 \text{ °C}$, la température de surface du vitrage extérieure $\theta_e = 10 \text{ °C}$.

- Réaliser un schéma explicatif.

- Calculer la résistance thermique du vitrage d'une surface de $S = 10 \text{ m}^2$.

- Déterminer le flux thermique ϕ dissipé à travers la paroi d'une surface de $S = 10 \text{ m}^2$.

- Réaliser le schéma pour une vitre double vitrage d'épaisseurs ($e_{\text{verre}} = 5 \text{ mm}$ et $e_{\text{Argon}} = 8 \text{ mm}$).

- En déduire l'expression de la résistance totale.

- Calculer sa valeur sachant que $\lambda_{\text{Argon}} = 0,01772 \text{ W/(m.K)}$.

- Déterminer le flux thermique nécessaire au maintien d'une température intérieure de 20°C

- Conclure sur la nécessité de bien étudier l'isolation d'un habitat.

Exercice 3 (exemple électronique) :

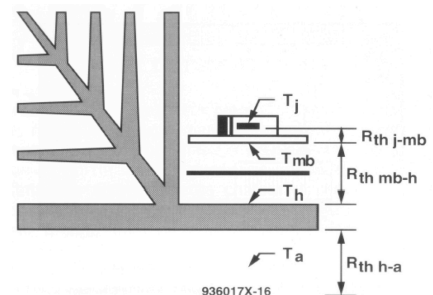
Le constructeur d'un transistor de puissance (boîtier BDY 38) définit une température maximum de jonction de $\theta_j = 150^\circ\text{C}$ (cœur du composant), ainsi que les valeurs de résistances thermiques suivantes :

$R_{thjA} = 40^\circ\text{C/W}$ résistance thermique totale entre la jonction et l'air ambiant sans radiateur.

$R_{thjb} = 1,5^\circ\text{C/W}$ résistance thermique entre la jonction et le boîtier.

$R_{thbr} = 0,75^\circ\text{C/W}$ résistance thermique de contact entre le boîtier et le radiateur (heatsink) avec des rondelles de micas.

Remarque : ϕ est appelé puissance dissipée (P_d) en électronique.



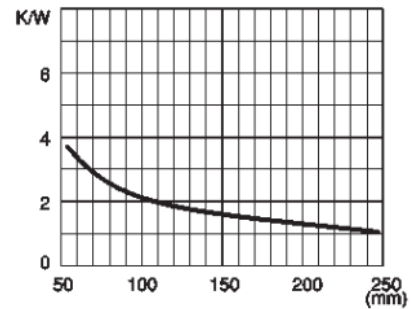
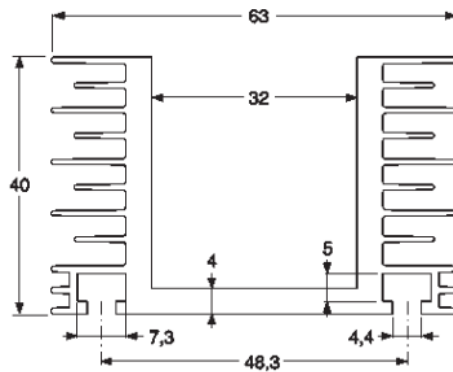
La température ambiante étant de $\theta_a = 25^\circ\text{C}$, calculer la puissance maximum P_d que peut supporter ce transistor (BDY 38) sans radiateur après avoir proposé un schéma.

Le transistor devra dissiper 30 W , il sera donc monté sur un dissipateur CO 335 P. Une rondelle de micas isole électriquement le dissipateur du boîtier.

- Calculer R_{thha} et en déduire la longueur de dissipateur nécessaire à l'aide de la documentation ci-après ($P_d \cdot \Sigma R_{th} = \Delta\theta$).

DISSIPATEUR

CO 335 P



SEEM

Le fabricant indique que la puissance totale (maximum) dissipée par ce type de transistor est de 115 W.

- Quelle grandeur peut être modifiée et quelle solution préconisez-vous pour atteindre ces performances ?

5. La convection thermique

Ce mode de propagation n'existe que dans les fluides (liquide, gaz ...), c'est un phénomène très complexe liant mécanique des fluides et transferts thermiques.



5.1. Flux thermique surfacique

Loi de Newton - Flux surfacique :

θ_p = température de la paroi (K ou °C).

θ_m = température moyenne du fluide (K ou °C).

h : Coefficient d'échange thermique par convection ($W/(m^2.K)$).

ϕ : Flux surfacique (W/m^2)

Il est possible d'augmenter le flux transmis par convection, en accélérant la vitesse du fluide par un ventilateur ou un circulateur (exemple : circuit de chauffage) : c'est la convection forcée.



5.2. Résistance thermique par convection

R_{th} : Résistance thermique (K/W).

h : Coefficient d'échange thermique par convection (W/(m².K)).

Attention : La convection est présente des deux côtés d'une paroi.

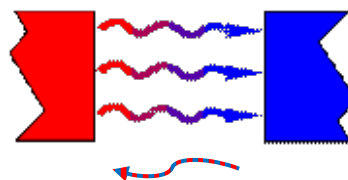
6. Rayonnement thermique

Ce mode de propagation n'existe que dans le vide ou les milieux transparents. C'est le mode de propagation du soleil.

6.1. Flux thermique surfacique

La densité de flux φ = Flux émis – Flux reçu

corps 1 Φ émis corps 2



θ en K

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

ε : Émissivité de la surface

6.2. Remarques

Si l'on veut augmenter l'énergie transmise par radiation on a intérêt à augmenter l'écart entre θ_1 et θ_2 , car ils sont à la puissance 4 dans la formule).

En France, on peut utiliser l'outil CALSOL de l'INES pour estimer l'énergie thermique obtenue par irradiation solaire sur une surface (<http://ines.solaire.free.fr/>).

7. Synthèse

Conduction	Convection	Irradiation
$\varphi = \frac{\lambda \times \Delta\theta}{e}$	$\varphi = h \times \Delta\theta$	$\varphi = \varepsilon \times \sigma \times (\theta_1^4 - \theta_2^4)$
θ en K ou °C	θ en K ou °C	θ en K uniquement