

- Les transferts thermiques -

Notions et contenus	Capacités exigibles
Transferts thermiques - Flux thermique conductif en géométrie unidimensionnelle ; résistance thermique. - Flux thermique conducto-convectif : loi de Newton. - Modélisation de l'évolution de la température d'un système incompressible et indilatable au contact d'un thermostat. - Approche descriptive du rayonnement du corps noir. Loi du déplacement de Wien, loi de Stefan-Boltzmann.	- Exploiter la relation entre flux thermique, résistance thermique et écart de température, l'expression de la résistance thermique étant fournie. - Effectuer un bilan d'énergie pour un système incompressible et indilatable en contact avec un thermostat : établir et résoudre l'équation différentielle vérifiée par la température du système. - Utiliser les expressions fournies des lois du déplacement de Wien et de Stefan-Boltzmann pour expliquer qualitativement l'effet de serre.

On a vu dans le **cours de Physique 06** que le **TRANSFERT THERMIQUE** était un des deux moyens possibles pour un système d'échanger de l'énergie avec le milieu extérieur (l'autre moyen étant le travail). On a également vu qualitativement que cet échange d'énergie pouvait se produire de trois manières différentes : par conduction, par convection et par rayonnement.

Le but de ce chapitre est d'introduire la notion de **flux** associé à chacun de ces transferts thermiques, ce qui nous permettra de calculer la température dans des systèmes où elle n'est pas uniforme.

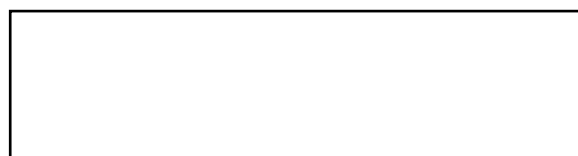


I- Définition générale du FLUX THERMIQUE

Quand deux systèmes ou quand deux parties d'un système sont à des températures différentes, **le transfert thermique s'opère spontanément de la partie la plus chaude vers la partie la plus froide**, et ce, quel que soit le type de transfert thermique mis en jeu (conduction, convection ou rayonnement).

Mais **ce transfert thermique n'a pas lieu instantanément** : le flux thermique est une grandeur dont la valeur permettra de connaître la « vitesse » à laquelle a lieu ce transfert thermique et dont le signe indiquera si le système perd ou gagne de l'énergie via ce transfert thermique.

☛ Définition :



Le **flux thermique** est aussi appelé **puissance thermique**.

☛ **Interprétation du signe** : Comme l'indique la définition, un flux thermique algébriquement reçu par un système est une grandeur algébrique : sa valeur pourra donc être positive ou négative.

• $\Phi_{\text{reçu}} > 0$:

• $\Phi_{\text{reçu}} < 0$:



On peut aussi rencontrer la notion de **flux thermique perdu** par un système. Les formules sont donc similaires, mais l'interprétation du signe est évidemment l'inverse : un flux perdu de signe positif signifie que le système perd effectivement de l'énergie alors qu'un flux perdu de signe négatif signifie que le système en gagne.

☞ **Application 1** : Alors qu'il fait 5°C dehors, une pièce est chauffée à 20°C . On estime que le flux thermique perdu au travers de la fenêtre est de $0,10\text{ kW}$. Quelle énergie est perdue par la pièce au travers de cette fenêtre pendant une journée entière ?

II- Le flux thermique CONDUCTIF

1) Description

Reprenons l'exemple de la fenêtre évoquée dans l'Application 1. Du fait de la différence de température qui existe entre l'intérieur de la pièce (maintenue à la température $T_C = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) et l'extérieur (température $T_F = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$), un transfert thermique par conduction a lieu au travers de la vitre en verre (le verre est en effet un matériau conducteur). Ce transfert thermique a ici lieu depuis l'intérieur (zone chaude de température T_C) vers l'extérieur (zone froide de température T_F), et il est d'autant plus « rapide », donc **le flux thermique est d'autant plus grand**, que :

- la **différence de température entre l'intérieur et l'extérieur est grande** ;
- le matériau constituant la fenêtre est **peu isolant**, c'est-à-dire **peu résistant** au transfert thermique.

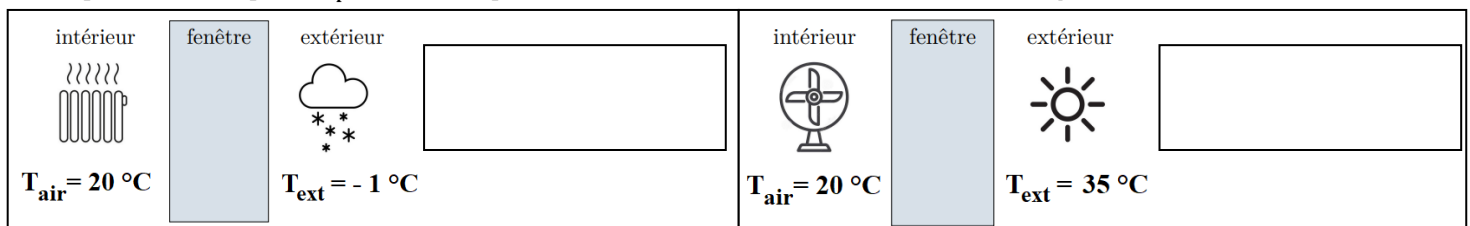
☛ **Définition** : Le flux thermique conductif Φ au travers d'un matériau de **résistance thermique** R_{th} séparant une **zone chaude de température** T_C d'une **zone froide de température** T_F est tel que :



Cette relation est à rapprocher de la **loi d'Ohm** écrite pour un conducteur ohmique en convention récepteur ($i = \frac{U_{AB}}{R}$) avec les analogies suivantes :

- # i = intensité du courant électrique circulant de A vers B (= flux de charges électriques), analogue au flux thermique Φ ;
- # $U_{AB} = V_A - V_B$ = différence de potentiel électrique entre A et B, analogue à la différence de température $T_A - T_B$;
- # R = résistance électrique du conducteur ohmique, analogue à la résistance thermique R_{th} ;

☞ **Application 2** : Exprimer le flux thermique reçu algébriquement par l'air de la pièce au travers de la fenêtre en fonction de la température de la pièce $T_{pièce}$, de la température extérieure T_{ext} et de la résistance thermique du verre R_{verre} .



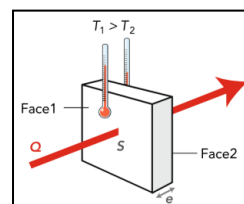
☞ **Application 3** : Calculer la valeur de l'énergie algébriquement reçue par l'air de la pièce pendant **20 minutes** dans la situation de droite (on prendra $R_{verre} = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$).

2) Résistance thermique d'une paroi

a/ Paroi constituée d'un matériau unique

La résistance thermique R_{th} d'une paroi constituée d'un matériau unique est reliée à sa surface S , à son épaisseur e et à la conductivité thermique λ du matériau qui le constitue par la relation :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda \times S} \quad (\text{Formule fournie})$$



* Conductivité thermique λ d'un matériau : c'est une grandeur exprimée en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ dont la valeur est propre à chaque matériau et qui est d'autant plus grande que ce matériau facilite le transfert thermique. Les matériaux **les plus conducteurs sont caractérisés par une grande valeur de conductivité thermique**, alors que les matériaux **les plus isolants ont une très faible valeur de conductivité thermique**.

Elle est numériquement égale à l'énergie transférée en une seconde, au travers d'une paroi de 1 m^2 de ce matériau, d'épaisseur 1 m , lorsque la différence de température entre ses deux faces est de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Conductivité thermique des matériaux (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)			
Matériaux isolants	0,028		polyuréthane
	0,040		laine minérale, liège
	0,058		vermiculite
	0,065		perlite
Bois et dérivés	0,17	0,19	feuillus durs
	0,12	0,13	résineux
Maçonneries	0,27	0,41	briques 700-1000 kg/m^3
	0,54	0,75	briques 1000-1600 kg/m^3
	0,90	1,1	briques 1600-2100 kg/m^3
Verre	1,0	1,0	
Béton armé	1,7	2,2	
Pierres naturelles	1,40	1,69	tuft, pierre tendre
	2,91	3,49	granit, marbres
Métaux	45		acier
	203		aluminium
	384		cuvre

b/ Paroi constituée de plusieurs matériaux

Dans le bâtiment, les parois sont rarement constituées d'un unique matériau. Deux situations sont rencontrées :

• Association en SERIE :

Dans ce cas, **le même flux thermique traverse les matériaux les uns après les autres** (à l'image de l'intensité du courant électrique qui est la même dans toutes les résistances d'une association en série).

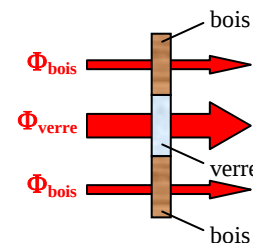


L'ensemble est équivalent à un unique matériau dont la résistance thermique équivalente vaut :

$$R_{Th}(\text{équivalent}) = R_{Th}(\text{matériau 1}) + \dots + R_{Th}(\text{matériau n})$$

• Association en PARALLELE :

Dans ce cas, **le flux thermique traversant chaque matériau est différent** (à l'image de l'intensité du courant électrique qui est différente dans chaque résistance d'une association parallèle) mais **tous sont soumis à la même différence de température** (tout comme les résistances sont toutes soumises à la même différence de potentiel en électricité).



L'ensemble est équivalent à un unique matériau dont la résistance thermique équivalente serait telle que :

$$\frac{1}{R_{Th}(\text{équivalent})} = \frac{1}{R_{Th}(\text{matériau 1})} + \dots + \frac{1}{R_{Th}(\text{matériau n})}$$

III- Le flux thermique CONDUCTO-CONVECTIF

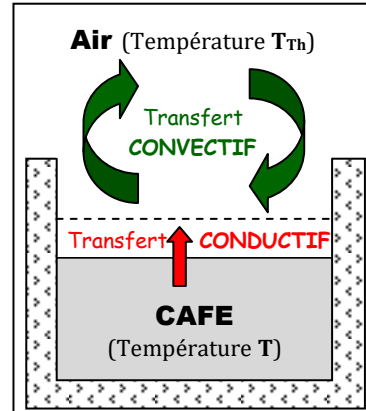
1) Description

Prenons l'exemple d'une bouteille thermos contenant initialement du café à la température $T_c = 50^\circ\text{C}$; imaginons de plus qu'on a oublié de fermer la bouteille. Sur les côtés et sur le fond du thermos, le café est au contact de parois parfaitement calorifugées : le café ne peut donc pas réaliser de transferts thermiques. En revanche, la surface supérieure du café est en contact avec **l'air qu'on peut**, du fait des dimensions énormes de l'atmosphère, **assimiler à un thermostat** de température $T_{Th} = 20^\circ\text{C}$: un transfert thermique va donc avoir lieu du café vers l'air jusqu'à ce que le café prenne la température de l'air. Mais en réalité, deux types de transferts thermiques sont ici mis en jeu :

- A la surface du café, les molécules du liquide réalisent un **transfert thermique CONDUCTIF** avec les molécules d'air situées à proximité ; cela concerne une couche d'air d'épaisseur très faible, de l'ordre de quelques millimètres.

- La couche d'air qui a subi le transfert thermique conductif voit ainsi sa température augmenter et prendre une valeur supérieure à T_{Th} . Cette couche d'air va alors réaliser un **transfert thermique CONVECTIF** avec l'air environnant en s'élevant (car sa densité est plus faible que l'air situé au-dessus d'elle), et en étant remplacée par de l'air à la température T_{Th} de densité plus forte. Le café encore très chaud peut donc continuer à céder de l'énergie à l'air ambiant en répétant ce cycle un grand nombre de fois.

➔ Un transfert thermique conductif et un transfert thermique convectif étant mis en jeu simultanément, on parle de **transfert thermique CONDUCTO-CONVECTIF**.



Pour modéliser un tel transfert thermique entre un système à la température T (qui va évoluer) en contact avec un thermostat à la température T_{Th} (qui est constante par définition), on utilise la loi phénoménologique de Newton ci-dessous :

☛ **Loi phénoménologique de Newton** : Le flux thermique conducto-convectif Φ algébriquement reçu par un système de température T dont la surface S est au contact d'un thermostat de température T_{Th} vaut :



☞ **Application 4** : Commenter le signe obtenu pour le flux conducto-convectif algébriquement reçu dans le cas où :

$T > T_{Th}$:

$T < T_{Th}$:

2) Evolution de la température d'un système

Considérons dans cette partie un *système incompressible et indilatable* (solide ou liquide) de température T , de capacité thermique C , sans mouvement macroscopique, dont la surface S est au contact d'un thermostat de température T_{th} .

- Application du 1^{er} principe de la thermodynamique sur une durée élémentaire dt :

- Intervention de la capacité thermique C ($= C_V = C_P$) du système :

- Equation différentielle vérifiée par la température T :

- Solution de l'équation différentielle :

- ☛ Solution particulière : il s'agit d'une expression de T « évidente » qui doit être une constante puisque le second membre (E) de notre équation différentielle est une constante :

- ☛ Solution de l'équation homogène : Il s'agit d'une expression de T qui est solution de l'équation différentielle sans le second membre :

Si l'équation homogène (H) est : $ay' + by = 0$

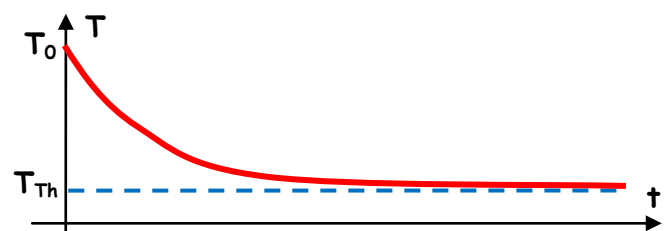
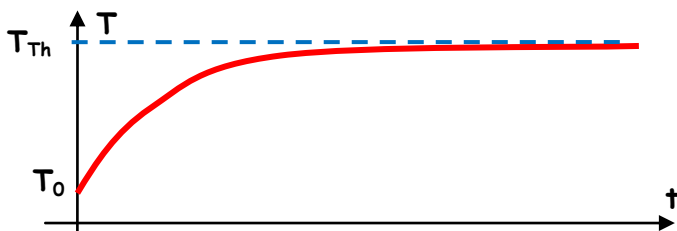
l'ensemble $\mathcal{S}_H$ des solutions de (H) est :

$$\mathcal{S}_H = \left\{ x \mapsto K e^{-\frac{b}{a}x}, K \in \mathbb{R} \right\}$$

- ☛ Solution générale de l'équation différentielle : C'est la somme de la solution particulière T_1 et de la solution T_2 de l'équation homogène :

- ☛ Utilisation de la condition initiale pour trouver la valeur de la constante K :

- ☛ Evolution de la température T du système en fonction du temps :



➤ **Application 5** : A l'aide de la forme canonique de l'équation différentielle, déterminer la dimension du terme $\frac{hS}{C}$.

• **Durée caractéristique de l'évolution** :

☛ **Expression** : Le temps caractéristique τ d'évolution de la température du système est :

☛ **Interprétation** :

☛ **Détermination graphique** : On lit la valeur de τ à l'abscisse du point de croisement de l'asymptote horizontale du graphique $T = f(t)$ et de la tangente à l'origine de ce même graphique.

➤ **Application 6** : Repérer τ sur les graphiques précédents.

IV- Le flux thermique par RAYONNEMENT

On a vu dans le *Cours de Physique 06* que le rayonnement était un troisième type de transfert thermique : il a lieu sans support matériel, il est véhiculé par des **ondes électromagnétiques**, et a lieu à distance, sans contact entre la source et le récepteur et sans échauffement du milieu intermédiaire. De plus, contrairement à la conduction et à la convection, cette transmission d'énergie est instantanée.

Lorsqu'un corps reçoit un rayonnement électromagnétique, trois possibilités lui sont offertes : il peut le **réfléchir** et/ou le **laisser passer** et/ou l'**absorber**. Dans la suite, on s'intéressera à des **corps particuliers** appelés **CORPS NOIRS**.

☛ **Définition** :

☛ **Conséquence** :



- **L'appellation corps « noir » ne présage en rien de la couleur de ce corps** : certes, ce modèle décrit bien des objets usuels de couleur noire comme **le charbon**, mais il décrit aussi assez bien **les Etoiles** comme le Soleil.

- Les longueurs d'onde du rayonnement émis par un corps noir n'ont aucun lien avec celles du rayonnement absorbé.

Lorsqu'un corps noir est en équilibre thermodynamique à une température T , le type et la quantité de rayonnement émis ne dépend que de la température T du corps et pas de sa composition. Il obéit alors aux deux lois suivantes :

• **Loi de déplacement de WIEN** : Parmi toutes les ondes électromagnétiques émises par un corps noir dont la température de surface vaut T (en K), celle émise avec la plus grande intensité est caractérisée par une longueur d'onde $\lambda_{\max}$ (en m) vérifiant la relation :

(Formule fournie)

$$T \times \lambda_{\max} = k$$

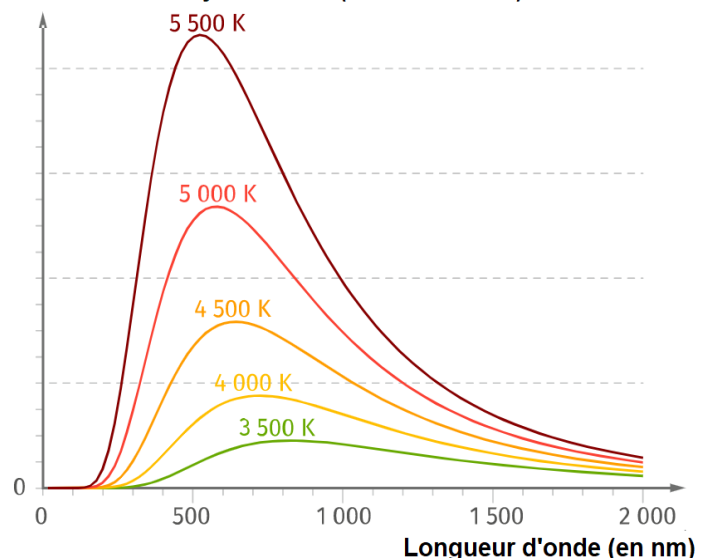
avec $k = 2,89.10^{-3} \text{ K.m}$

• **Loi de Stefan-Boltzmann** : Le flux thermique surfacique ϕ (en W.m^{-2}) émis par rayonnement par la surface d'un corps noir dont la température de surface vaut T (en K) vaut :

(Formule fournie)

$$\phi_{\text{émis}} = \sigma \times T^4 \quad \text{avec } \sigma = 5,67.10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4} \text{ (Constante de Stefan-Boltzmann)}$$

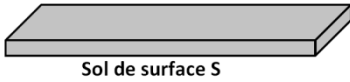
Intensité du rayonnement (unité arbitraire)



Le flux thermique surfacique ϕ émis par un corps est relié au flux thermique Φ qu'il émet et à la surface S au travers de laquelle a lieu le transfert thermique par la relation : $\phi = \frac{\Phi}{S}$.

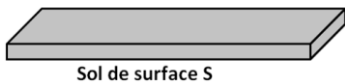
Application 7 : L'effet de serre

a) En hiver, on estime le flux thermique surfacique provenant du Soleil et absorbé par le sol à $\Phi_{\text{solaire reçu}} = 290 \text{ W.m}^{-2}$. En assimilant le sol à un corps noir, déterminer sa température T_{sol} une fois l'équilibre thermique atteint.



b) Dans quel domaine d'ondes électromagnétiques se situe le principal rayonnement émis par le sol ?

c) Une vitre plane et horizontale est disposée à quelques mètres au-dessus du sol. Cette vitre est totalement transparente au rayonnement solaire (lumière visible et ultraviolets). En revanche, elle se comporte elle-même comme un corps noir dans le domaine d'ondes électromagnétiques principalement émis par le sol. Déterminer la température T_{sol} du sol une fois l'équilibre thermique atteint pour le sol et pour la vitre.



▪ Système = Sol

Pour que l'**équilibre thermique** soit atteint au niveau du sol, il faut que :

▪ Système = Vitre

Pour que l'**équilibre thermique** soit atteint au niveau de la vitre, il faut que :