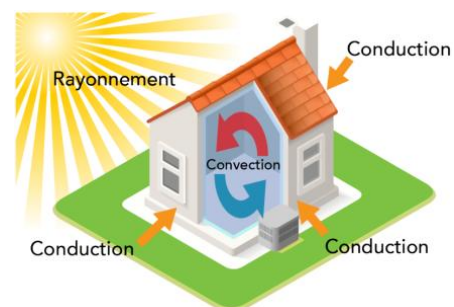


- Les transferts thermiques -

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 constante.



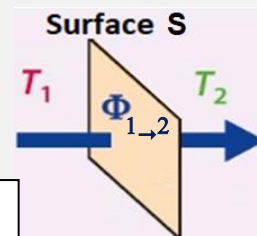
I- Définition générale du FLUX THERMIQUE

Quand deux systèmes ou quand deux parties d'un système sont à des températures différentes, **un transfert d'énergie (appelé 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** : pour quantifier la « vitesse » à laquelle a lieu ce transfert thermique, on a créé une grandeur appelée « **FLUX THERMIQUE** ».

☛ Définition :

☛ **Formule** : $Q_{1 \rightarrow 2}$ ou $\delta Q_{1 \rightarrow 2}$ = quantité d'énergie thermique transférée de la zone 1 vers la zone 2 pendant une durée Δt ou dt .

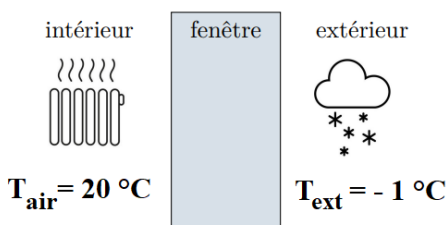


Le **flux thermique** est aussi appelé **puissance thermique**.

☛ **Interprétation du signe** : Le flux thermique est une grandeur algébrique : il pourra donc être positif ou négatif.

- $\Phi_{1 \rightarrow 2} > 0$:
- $\Phi_{1 \rightarrow 2} < 0$:

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



II- Le flux thermique CONDUCTIF

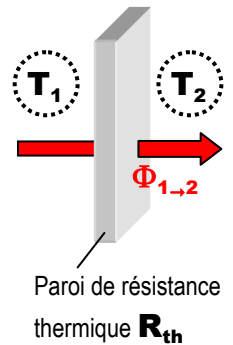
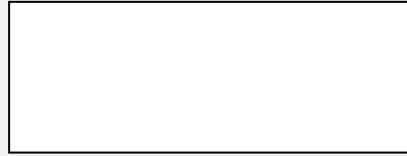
1) Description

Reprenons l'exemple traité dans l'*Application 1*. Du fait de la différence de température qui existe entre l'intérieur de la pièce (maintenue à la température $T_1 = 20\text{ °C}$) et l'extérieur (température $T_2 = -1\text{ °C}$), un transfert thermique par conduction a lieu au travers de la fenêtre en verre (ce matériau est en effet conducteur). Ce transfert thermique a ici lieu depuis l'intérieur (zone chaude de température T_1) vers l'extérieur (zone froide de température T_2), 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** : Soit une paroi de **résistance thermique R_{th}** séparant un milieu de **température T_1** d'un milieu de **température T_2** .

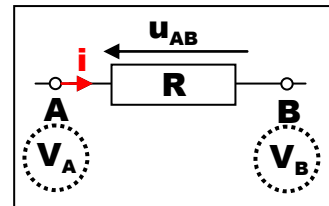
Le **flux thermique CONDUCTIF $\Phi_{1 \rightarrow 2}$** au travers de cette paroi **dans le sens $1 \rightarrow 2$** vaut :



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

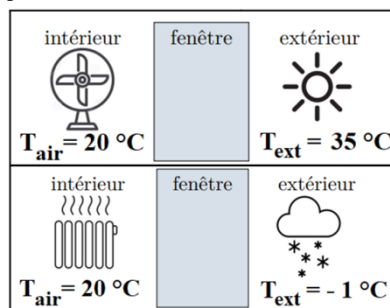
i = intensité du courant électrique circulant de A vers B (= flux de charges électriques), analogue au flux thermique $\Phi_{1 \rightarrow 2}$;

$u_{AB} = V_A - V_B$ = différence de potentiel électrique entre A et B, analogue à la différence de température $T_1 - T_2$;



☞ **Application 2** : Commenter le signe de $\Phi_{1 \rightarrow 2}$ selon les valeurs de T_1 et T_2 .

☞ **Application 3** : Le système étudié est l'air intérieur. Exprimer puis calculer le flux algébriquement reçu par le système de la part de l'extérieur dans les deux situations suivantes (on prendra $R_{verre} = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ K.W}^{-1}$). Commenter les signes obtenus.

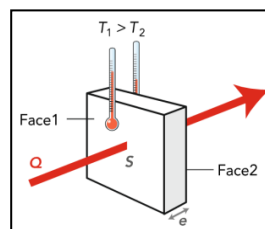


2) Résistance thermique d'une paroi

a/ Paroi constituée d'un matériau unique

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

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda \cdot S} \quad \begin{array}{l} \text{(Formule fournie en 1^{ère} année)} \\ \text{Formule à connaître en 2^{ème} année} \end{array}$$



Conductivité thermique des matériaux (en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)			
Matériaux isolants	0,028		polyuréthane
	0,040		laine minérale, liège
	0,058		vermiculite
	0,065		perlite
	0,17	0,19	feuillus durs
Bois et dérivés	0,12	0,13	résineux
	0,27	0,41	briques 700-1000 kg/m³
Maçonneries	0,54	0,75	briques 1000-1600 kg/m³
	0,90	1,1	briques 1600-2100 kg/m³
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		cuivre

* Conductivité thermique λ d'un matériau : c'est une grandeur exprimée en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ 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 °C .

b/ Paroi constituée de plusieurs matériaux

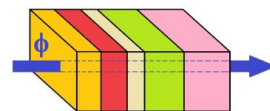
Dans le bâtiment, les parois sont rarement constituées d'un unique matériau. Deux situations sont rencontrées :

• 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 :

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

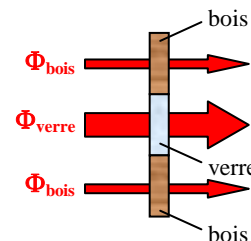


• Association en PARALLELE :

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

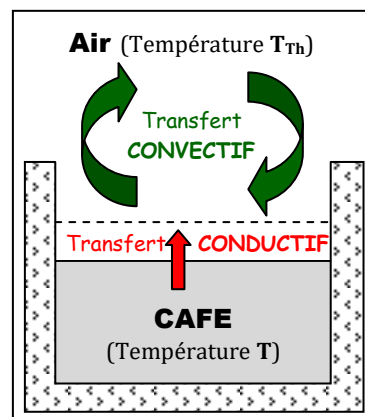
1) Description

Prenons l'exemple d'une bouteille thermos contenant initialement du café à la température $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; 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 $T_{Th} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$: un transfert thermique va donc avoir lieu du café vers l'air jusqu'à ce que le café prenne la température de l'air. 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 qui sont plus froides ; cela concerne une couche d'air d'épaisseur très faible, de l'ordre de quelques millimètres.

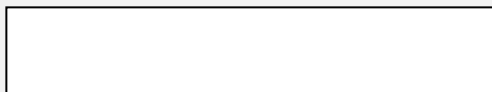
- La couche d'air qui a subi le transfert thermique conductif voit ainsi sa température augmenter et prendre une valeur supérieure à T_{Th} : un **transfert thermique CONVECTIF** a donc lieu entre cette couche d'air et l'ensemble de l'air environnant qui est plus froid, ce qui se traduit par un déplacement de cette couche d'air vers le haut (sa densité étant plus faible que celle de l'air environnant plus froid), permettant de placer de nouvelles molécules d'air à la température T_{Th} au contact de la surface du café ... Le cycle se répète alors 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 est susceptible d'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 T_p : il s'agit d'une expression de T « évidente » qui doit ici être une constante car le second membre de l'équation différentielle (ce qui est à droite du signe $=$) est une constante :

☛ Solution T_{eh} de l'équation homogène : il s'agit d'une expression de T qui est solution de l'équation différentielle quand le second membre est nul :

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

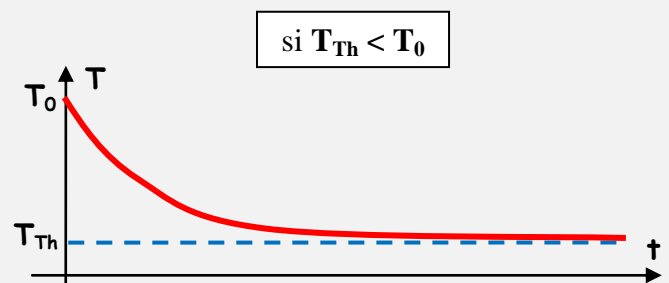
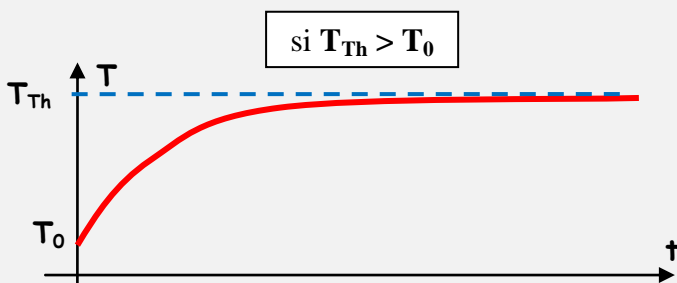
l'ensemble \mathcal{S}_H des solutions de (H) est :

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

☛ Solution générale de l'équation différentielle : C'est la somme de la solution particulière T_p et de la solution T_{eh} 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 de l'intersection de l'asymptote horizontale et de la tangente à l'origine du graphique $T = f(t)$.

➤ **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 λ_{\max} (en m) vérifiant la relation :

(Formule fournie)

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

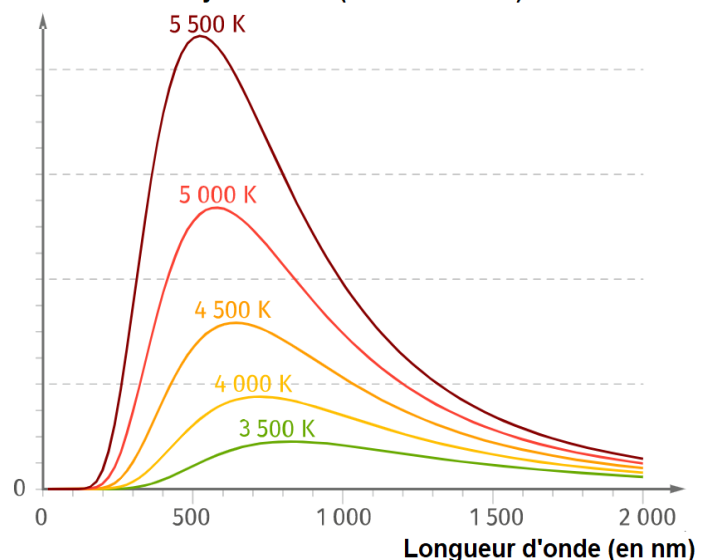
avec $k = 2,89.10^{-3} \text{ K.m}$

• **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 : $\phi = \frac{\Phi}{S}$.

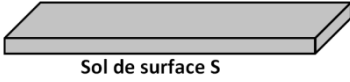
Application 7 : L'effet de serre

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.



▪ Système = Sol

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



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) ;

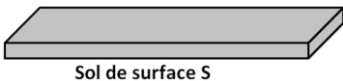
se comporte comme un **CORPS NOIR dans le domaine d'ondes électromagnétiques principalement émis par le sol.**

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 :