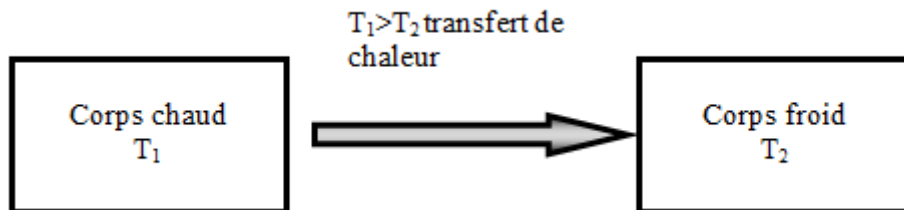


Les transferts thermiques sont très importants dans le domaine de l'énergie. Ils sont présents dans tous les systèmes thermiques (installations thermiques, PAC, chaudière, habitation).

1. Les différents modes de transferts de chaleur

D'après le second principe de la thermodynamique, on peut admettre que la chaleur (ou l'énergie thermique) ne peut passer que d'un corps qui est chaud vers un corps à température plus basse.

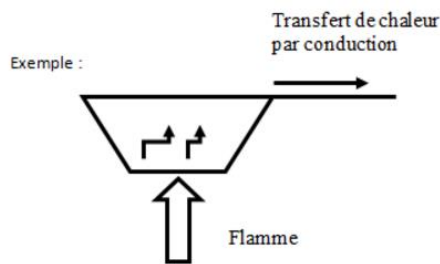


Tant que les 2 éléments sont en liaison entre eux, il y a échange de la chaleur jusqu'à ce que les 2 corps soient à la même température ($T_1 = T_2$).

Le transfert d'énergie ou de chaleur mentionné ci-dessus peut se produire selon 3 modes :

- Par contact : la conduction
- A distance : le rayonnement
- Mixte : la convection

1.1. La conduction :



Lorsque l'on utilise une casserole en métal, on constate qu'après un petit moment, le manche se réchauffe progressivement alors que c'est le fond de la casserole qui est sur la source de chaleur.

La transmission de la chaleur se fait de proche en proche, c'est-à-dire de molécule en molécule, dans le métal, de l'endroit le plus chaud à l'endroit le plus froid.

Définition : La conduction est l'échange de chaleur entre 2 points d'un même solide (ou alors d'un même liquide au repos).

Application : On retrouve ce transfert de chaleur dans toutes les parois d'un bâtiment.

Le coefficient de conductivité thermique :

Définition : Le coefficient de conductivité thermique est une caractéristique physique du matériau qui exprime la capacité d'un corps à conduire la chaleur.

Il est noté λ et son unité est le $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Exemple de valeur de λ pour différents matériaux

Matériau	Conductivité thermique λ [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
Béton armé	1,75
Laine de verre	0,036
Polystyrène extrudé	0,035
Verre	1

La résistance thermique :

Définition : La résistance thermique d'un matériau exprime la capacité du matériau à s'opposer au flux de chaleur qui le traverse.

Elle est notée R son unité est $\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$.

La résistance thermique pour la conduction est alors équivalente à : $R_{cd} = \frac{\lambda}{e}$
Avec λ le coefficient de conductivité thermique et e l'épaisseur du matériau.

Le coefficient de transmission thermique surfacique :

Bien souvent, la paroi est caractérisée non pas par sa faculté à s'opposer au flux de chaleur mais bien au contraire par son aptitude à laisser passer la chaleur.

Le coefficient de transmission thermique surfacique est l'inverse de la résistance thermique.

Ce coefficient est noté U son unité est le $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

$$U = \frac{1}{R}$$

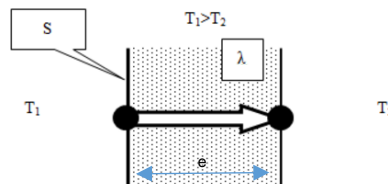
Le flux thermique par conduction :

La valeur du flux de chaleur par conduction à travers une paroi est plus grande si :

- La surface d'échange est importante.
- L'écart de température de part et d'autre de la paroi est grand.
- La nature du matériau est favorable au transfert de chaleur.
- L'épaisseur de la paroi est faible.

Il s'exprime en Watt :

$$\phi_{cd} = U \times S \times (T_1 - T_2)$$



Avec U le coefficient de transmission surfacique

S la surface d'échange en m^2 .

$T_1 - T_2$ l'écart de température entre les points 1 et 2.

Exercice 1 :

Soit un vitrage simple d'épaisseur 5 mm, de coefficient de conductivité $\lambda = 1,15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

La température de surface du vitrage intérieure est 22°C , la température de surface du vitrage extérieure 10°C .

- Calculer la résistance thermique du vitrage.
- Déterminer le flux thermique dissipé à travers ce vitrage pour une surface de 10 m^2 .

Exercice 2 :

La déperdition thermique d'un mur en béton de 30 m^2 de surface est 690 W .

Le mur a une épaisseur de 10 cm et la température de sa face intérieure est 25°C .

- Calculer la température de la face extérieure. On donne $\lambda_{\text{béton}} = 1,75 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

1.2. Le rayonnement

Lorsque l'on gare une voiture en plein soleil, la carrosserie se réchauffe et voit sa température augmentée considérablement.

Pourtant, il n'y a aucun échange de chaleur par contact (conduction), de plus, l'air environnant est à température inférieure et donc ne peut pas fournir d'apport d'énergie thermique à la carrosserie.

On appelle ce alors ce phénomène le transfert de chaleur par rayonnement (entre le soleil et la carrosserie).

Définition : Quelle que soit sa température, un corps émet un rayonnement thermique. Ce rayonnement (sous forme d'onde électromagnétique) est émis et reçu en permanence par plusieurs corps séparés entre eux par une ambiance transparente ou semi transparente (vide, gaz, air).

Les échanges thermiques par rayonnement entre plusieurs corps dépendent de :

- La température des corps.
- La géométrie des corps.
- La nature de l'ambiance qui les sépare.

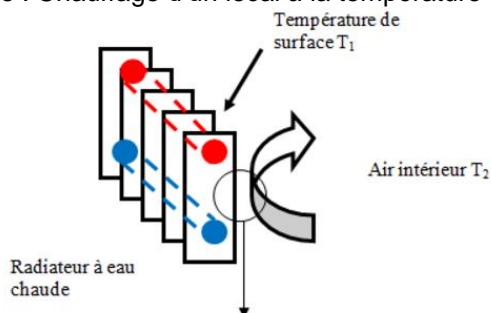
Application : Ce transfert de chaleur est omniprésent dans le bâtiment, on le retrouve par exemple :

- Entre le soleil et les parois.
- Entre les parois des pièces.
- Entre les personnes....

Cette multitude d'échanges thermique qui intervient par rayonnement en fait un transfert de chaleur extrêmement compliqué.

1.3. La convection

Exemple : Chauffage d'un local à la température T_2 par un radiateur à la température T_1 ($T_1 > T_2$).

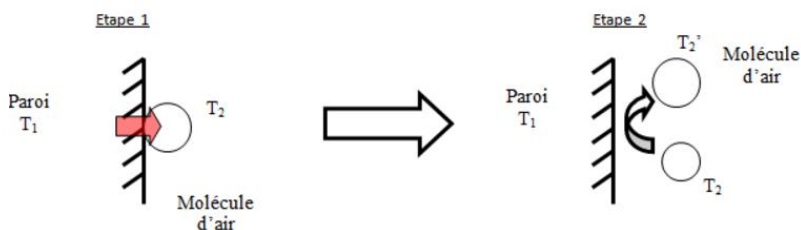


L'air de la pièce se réchauffe au contact de la paroi du radiateur ce qui réchauffe la pièce entière.

Etape 1 : Il y a en fait transfert de chaleur par conduction entre une molécule d'air et la paroi en contact, l'énergie est transférée du radiateur vers l'air vu que $T_1 > T_2$.

Etape 2 : La chaleur gagnée par la molécule d'air fait que sa température augmente et sa masse volumique diminue. L'air ainsi chauffé devient alors plus léger et s'élève, laissant sa place à une autre molécule.

Le cycle peut alors continuer.



Définition : La convection est un transfert de chaleur entre un fluide et une paroi, l'échange de chaleur étant lié au mouvement du fluide.

On distingue 2 types de convection.

- **La convection naturelle** : Le mouvement du fluide est simplement la conséquence de la variation de la masse volumique du fluide.
- **La convection forcée** : Le mouvement de fluide est la conséquence d'une action extérieure (ventilateur ou pompe).

La résistance thermique d'échanges superficiels :




Définition : La résistance thermique d'échanges superficiels d'une paroi est l'inverse des coefficients d'échanges superficiels.

Elle est notée R_{se} pour l'extérieur et R_{si} pour l'intérieur et son unité est $m^2.K.W^{-1}$.

$$R_{se} = \frac{1}{h_{se}} \quad \text{et} \quad R_{si} = \frac{1}{h_{si}}$$

h étant le coefficient d'échanges superficiels.

Tableau de valeur par défaut des résistances superficielles :

	Pari en contact avec : - l'extérieur, - un passage ouvert, - un local ouvert.			Pari en contact avec : - un autre local, - chauffé ou non chauffé, - un comble, - un vide sanitaire.		
	$\frac{1}{h_i}$	$\frac{1}{h_e}$	$\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}$	$\frac{1}{h_i}$	$\frac{1}{h_e}$	$\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}$
Pari verticale ou faisant avec le plan horizontal un angle supérieur à 60° 	0,11	0,06	0,17	0,11	0,11	0,22
Pari horizontale ou faisant avec le plan horizontal un angle égal ou inférieur à 60°, flux ascendant (toiture) 	0,09	0,05	0,14	0,09	0,09	0,18
flux descendant (plancher bas) 	0,17	0,05	0,22	0,17	0,17	0,34

Le flux thermique par convection :

La valeur du flux de chaleur par convection entre une paroi et un fluide environnant est plus grande si :

- La surface d'échange est grande.
- L'écart de température entre la paroi et le fluide est important.
- La capacité du fluide à prélever ou céder de la chaleur.

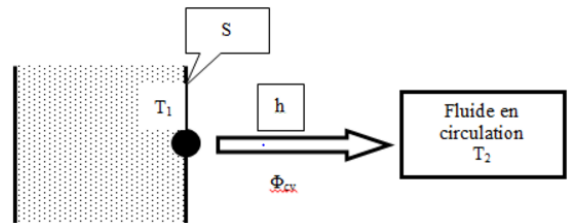
Il s'exprime en Watt :

$$\phi_{cv} = h \times S \times (T_1 - T_2)$$

Avec h le coefficient d'échanges superficiels.

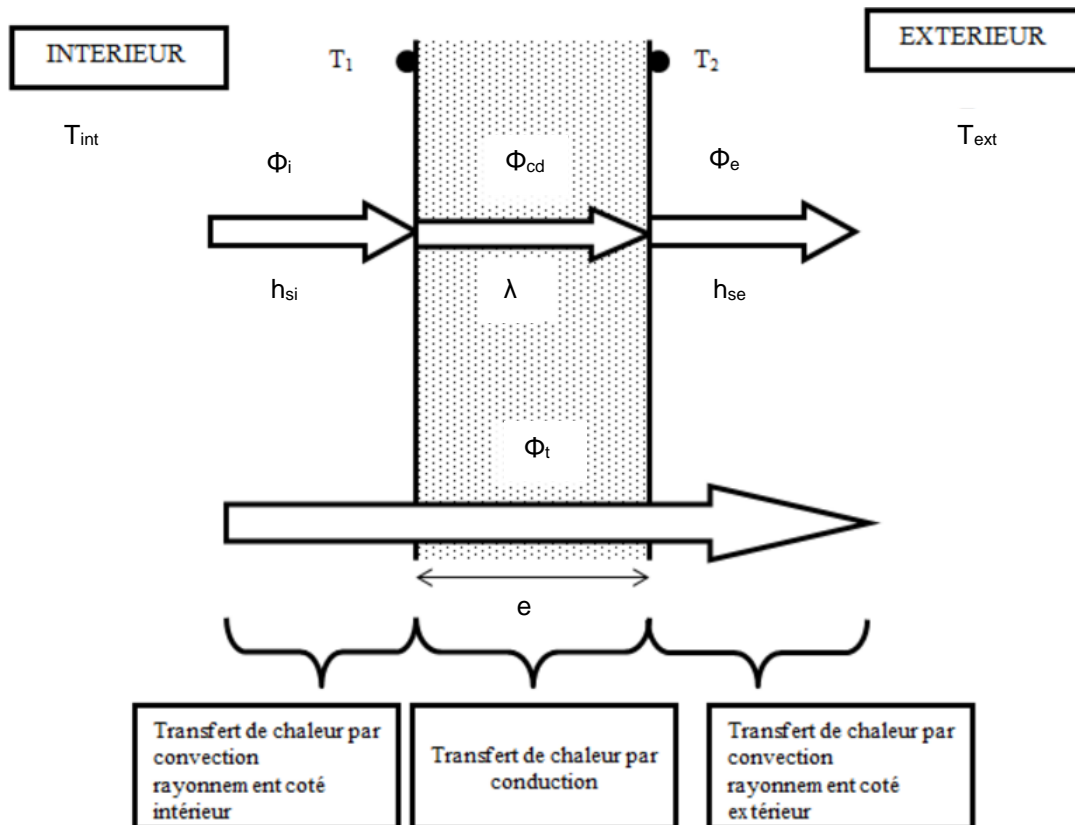
S la surface d'échange en m^2 .

$T_1 - T_2$ l'écart de température entre les points 1 et 2.



2. La résistance thermique globale d'une paroi :

Cas d'une paroi simple :



	Convection rayonnement coté intérieur	conduction	Convection rayonnement coté extérieur
Flux de chaleur	$\Phi_i = h_{si} \times S \times (T_i - T_1)$	$\Phi_{cd} = \frac{\lambda}{e} \times S \times (T_1 - T_2)$	$\Phi_e = h_{se} \times S \times (T_2 - T_e)$
Résistance thermique	$R_{thsi} = \frac{1}{h_{si}}$	$R_{th} = \frac{e}{\lambda}$	$R_{thse} = \frac{1}{h_{se}}$
Densité de flux de chaleur	$\varphi_i = h_{si} \times (T_i - T_1)$	$\varphi_{cd} = \frac{\lambda}{e} \times (T_1 - T_2)$	$\varphi_e = h_{se} \times (T_2 - T_e)$

La conservation du flux thermique donne $\Phi_t = \Phi_i = \Phi_{cd} = \Phi_e$

$$\Phi_t = \frac{1}{R_t} \times S \times (T_i - T_e) \quad \text{Avec} \quad R_t = R_{thsi} + R_{th} + R_{thse}$$

Exercice 3 :

Les murs latéraux d'un local industriel (5m x 2,5m) maintenu à la température constante $\theta_i = 20^\circ \text{C}$ sont réalisés en béton banché d'épaisseur $e = 20 \text{ cm}$ et de conductivité thermique, $\lambda = 1,2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Les résistances thermiques superficielles interne et externe ont respectivement pour valeur : $1/h_{si} = 0,11 \text{ W}^{-1}.\text{m}^2.\text{K}$ et $1/h_{se} = 0,06 \text{ W}^{-1}.\text{m}^2.\text{K}$

- Exprimer puis calculer la résistance thermique de la paroi.
- Exprimer puis calculer le flux thermique Φ , transmis lorsque la température extérieure est $\theta_e = 0^\circ \text{C}$.
- Calculer le flux thermique transmis par unité de surface de la paroi φ .
- Dessiner le mur à l'échelle 1:10 et tracer l'évolution de température.

3. Type de chaleur

3.1. La chaleur sensible

Définition : Quand un corps est chauffé ou refroidi, l'augmentation ou la diminution de cette température sans changement d'état physique est appelée la chaleur sensible.

Par exemple il faut fournir 419 kJ de chaleur (sensible) pour chauffer un litre d'eau de 0°C à 100°C .

Le qualificatif de sensible prend tout son sens quand on précise que ce terme correspond à une variation de température d'un corps, qui peut être mesurée à l'aide de nos sens.

Expression de la chaleur sensible :

La chaleur sensible Q_{sensible} exprimée en Joule est fonction de :

- la variation de Température mesurée ΔT ,
- la masse du système M en kg,
- la capacité thermique massique du système C en $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

$$Q_{\text{sensible}} = M.C.\Delta T$$

$M.C$ correspond à l'inertie thermique du système.

L'élévation de température d'un corps, pour une énergie fournie, est inversement proportionnelle à la masse du corps, et à sa capacité thermique massique.

Matériau	$C (\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1})$
Air	≈ 1000
Eau	≈ 4200
Béton	≈ 900
Laine de verre	≈ 670
Bois	≈ 2700
Alu	≈ 880
Acier	≈ 470

3.2. La chaleur latente

Définition : Tous les corps purs ont la capacité de changer d'état physique, les solides peuvent devenir des liquides, les liquides peuvent devenir des gaz.

Ces changements d'état nécessitent l'ajout ou le retrait d'énergie sans modifier la température d'un corps. Donc la chaleur qui permet un changement d'état sans modifier la température d'un corps se nomme la chaleur latente.

Par exemple, lorsqu'on ajoute la quantité de chaleur nécessaire pour transformer de l'eau en vapeur, c'est bien de la chaleur latente, car l'eau reste pendant cette transformation à 100°C.

Une substance peut changer d'état physique de plusieurs façons, il existe donc plusieurs chaleurs latentes :

- Chaleur latente de liquéfaction : quantité de chaleur pour passer de l'état solide à l'état liquide.
- Chaleur latente de vaporisation : quantité de chaleur pour passer de l'état liquide à l'état gazeux.
- Chaleur latente de condensation : quantité de chaleur pour passer de l'état gazeux à l'état liquide.
- Chaleur latente de solidification : quantité de chaleur pour passer de l'état liquide à l'état solide.

Expression de la chaleur latente :

La chaleur latente L (aussi appelée Enthalpie de changement d'état) est exprimée en $J \cdot kg^{-1}$ est fonction de :

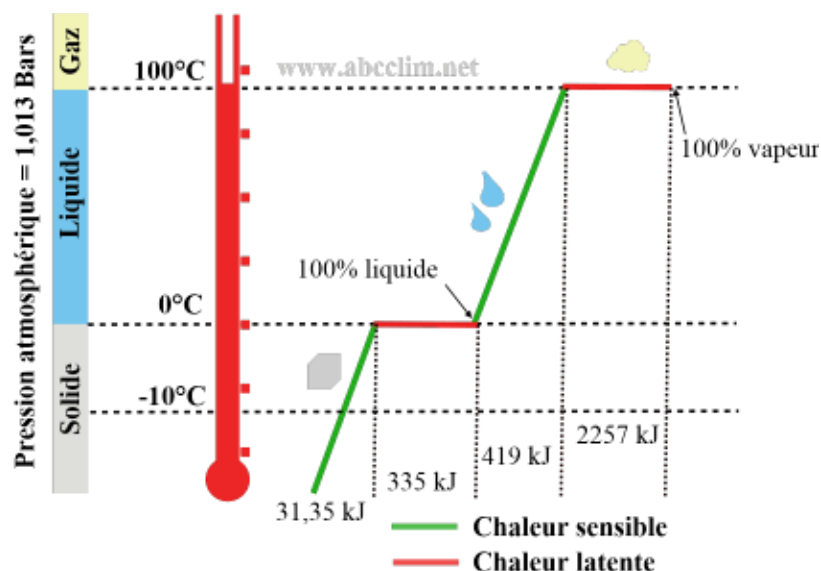
- la masse du système M en kg,
- l'énergie nécessaire au changement d'état du système Q_L en Joule.

$$Q_L = M \cdot L$$

substance	Chaleur de fusion(cal/g)	Chaleur de fusion(J /g)
eau	79.72	333,55
méthane	13.96	58.41

Exemple de l'évolution d'un kilogramme de glace à la pression atmosphérique :

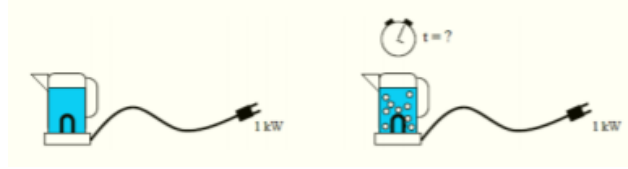
Pour augmenter ou diminuer la température d'un corps nous devons soit retirer, soit ajouter une certaine quantité d'énergie, l'unité qui permet de quantifier cette énergie est le Joule (J).



Exercice 4 :

Une bouilloire électrique a pour puissance $P \approx 1 \text{ kW}$ lorsqu'elle est alimentée par la prise secteur (tension efficace de 230V). On y place 1 L d'eau à 10°C .

- Quelle est l'énergie nécessaire pour faire bouillir l'eau ?
- En combien de temps l'eau va bouillir ?

**Exercice 5 :**

Pour refroidir une boisson anisée de 10 cl à 20°C , on ajoute 2 glaçons de 8g chacun. En faisant l'hypothèse que le verre n'échange pas de chaleur avec l'extérieur, déterminez la température de la boisson lorsque les glaçons ont fondu.

- Masse du verre $m_v = 200\text{g}$
- Capacité calorifique du verre $C_v = 700 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Capacité calorifique de l'eau $C_e = 4200 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Capacité calorifique de la glace $C_g = 2060 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Chaleur latente de fusion de la glace $L = 350.10^3 \text{ J.kg}^{-1}$