

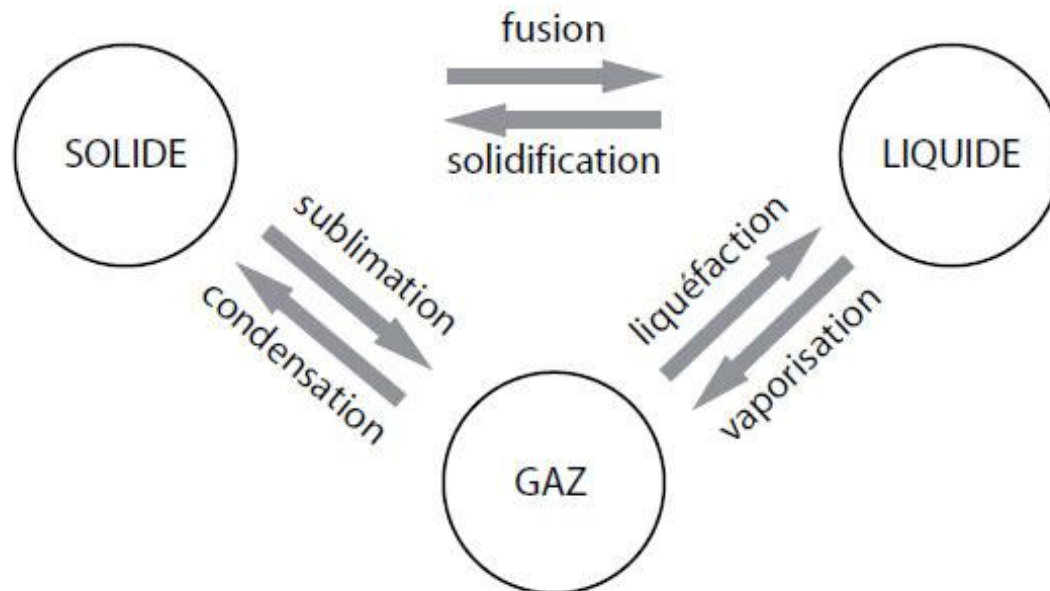
TRANFERT THERMIQUE

NOTIONS DE TEMPÉRATURE ET DE CHALEUR

La température mesure le niveau d'agitation : plus l'agitation moléculaire croît, plus la température est élevée.

Les propriétés des corps matériels varient avec leur température

Lorsqu'elle s'élève, ils se dilatent ; dans certaines conditions précises (qui dépendent aussi de la pression) on observe aussi des transitions de phase.



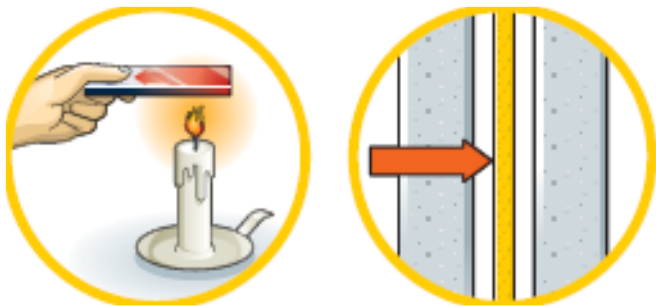
La chaleur est mode de transfert d'énergie entre deux systèmes Elle passe spontanément du corps chaud au corps froid jusqu'à l'équilibre de la température et s'exprime en Joule.

$$1 \text{ cal} = 4,1868 \text{ J}$$

D'un point de vue microscopique, l'agitation moléculaire se transmet par contact.

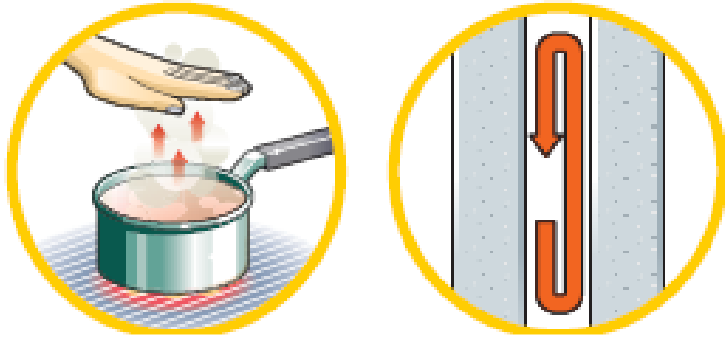
Certaines matières conduisent mieux la chaleur que d'autres : par exemples, les métaux conduisent bien la chaleur, alors que les plastiques, le verre, sont des isolants.

- Transmission de la chaleur par **conduction** (concerne principalement les corps solides) et les fluides.



Plus le matériau est isolant, moins il y a de conduction.

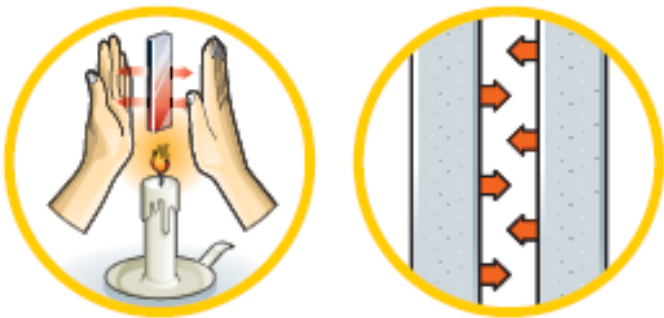
- Transmission de la chaleur par **convection** (concerne principalement les gaz et les fluides).



L'air circule par différence de température entre deux points en raison de la variation de masse volumique. Par exemple, l'air chaud monte et la chaleur se dissipe en « frottant sur les parois ».

Plus l'air est immobile, moins il y a de convection.

- Transmission de la chaleur par **rayonnement** (infrarouge).



Toute matière absorbe et émet un rayonnement en fonction de sa température et de son émissivité, l'échange de chaleur se faisant en fonction du vecteur de propagation (air ou vide). Le transfert de chaleur par rayonnement ne nécessite pas de vecteur de propagation.

Plus le rayonnement est réfléchi ou absorbé, moins il y a de transfert ou d'échange thermique.

Lorsque deux corps de températures différentes sont en présence, le corps le plus chaud rayonne plus d'énergie qu'il n'en absorbe et le corps le plus froid absorbe plus d'énergie qu'il n'en rayonne. Cela dépend de leur **émissivité**.

En résumé

Hors équilibre thermique, les trois modes de propagation de la chaleur interviennent en général dans des proportions diverses.

Energie échangée lors d'un changement d'état

Un changement d'état s'effectue sous l'effet d'un échange d'énergie qui peut être calculé à partir de l'enthalpie massique de changement d'état. Cette énergie est proportionnelle à la masse qui subit le changement d'état :

$$\Delta Q = m L$$

ΔQ énergie échangée lors du changement d'état (en J)

L: enthalpie massique de changement d'état en $(J.kg^{-1})$

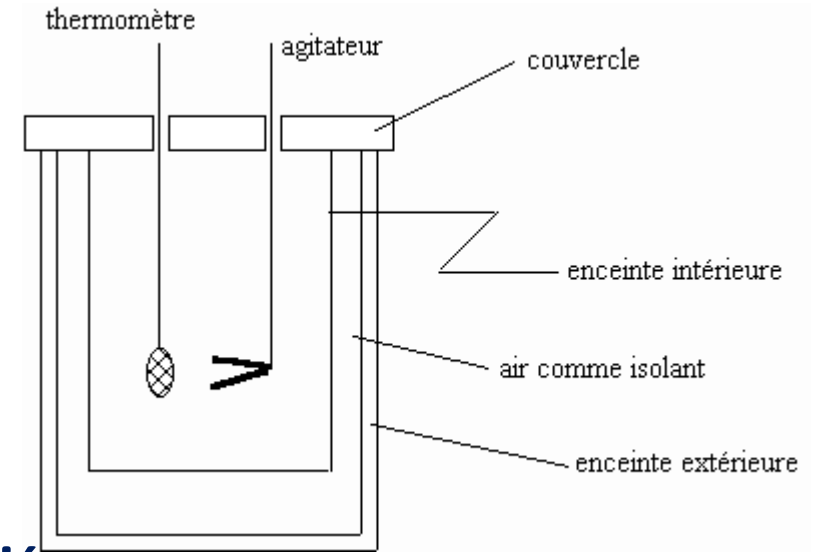
m: masse en kg

L condensation = -L vaporisation ; L solidification = - L fusion

Pour mesurer correctement la propagation de la chaleur selon un seul mode, il faut s'arranger pour supprimer, ou au moins atténuer les deux autres

Mesurer les échanges thermiques entre fluides et matériaux étudiés

Calorimètre



Energie échangée par transfert thermique sans changement d'état

$$Q = mc\Delta T = mc (T_{finale} - T_{initiale})$$

Q: énergie échangée par transfert thermique (en J)

C: capacité thermique massique (en $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)

ΔT écart température en °C ou en K

Bilan d'énergie

Lors d'un transfert thermique entre plusieurs corps les échanges d'énergie peuvent se faire avec ou sans apport d'énergie avec l'extérieur. La loi de conservation de l'énergie s'exprime sous la forme suivante ;

$$\sum \Delta E_i = Q_{ext}$$

$\sum \Delta E_i$: somme des variations d'énergies des corps introduits (avec ou sans changement d'état) en Joule

Q_{ext} : énergie échangée avec le milieu extérieur (en Joule)

- $Q_{ext} > 0$, l'ensemble des corps en contact reçoit de l'énergie extérieur
- $Q_{ext} < 0$, l'ensemble des corps cède de l'énergie à l'extérieur
- $Q_{ext}=0$ pas d'échange d'énergie par transfert thermique avec l'extérieur, la transformation est dite adiabatique

Un local est chauffé avec des radiateurs pendant 24 heures. La masse de l'eau qui circule dans les radiateurs est de 6 300 kg. Sachant que l'eau arrive à la température 80 °C et retourne à la température 30 °C :

- Comment calculer la quantité de chaleur fournie en une heure pour les radiateurs en (kJ) et en (kcal) ?
- De quel type de chaleur s'agit-il ?

Le débit d'eau dans un radiateur est noté q'_v . L'eau chaude pénètre dans le radiateur à la température θ_1 . Elle ressort à la température θ_2 . L'installation comporte dix radiateurs. La chaudière récupère l'eau provenant des radiateurs, à la température θ_2 et la réchauffe à la température θ_1 .

On donne : $q'_v = 0,035 \text{ L.s}^{-1}$; $\theta_1 = 75 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta_2 = 65 \text{ }^\circ\text{C}$; $C = 4185 \text{ J.kg}^{-1}.\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

1 - Exprimer la quantité de chaleur Q , dégagée par un radiateur en une minute.

Calculer Q .

2 - Calculer la puissance du radiateur.

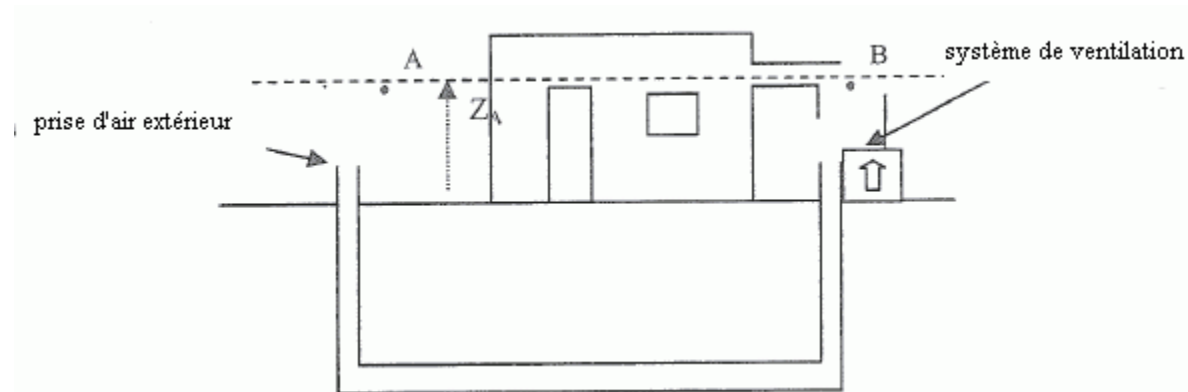
3 - La chaudière utilise comme combustible du gaz. Le rendement de la combustion est de 80%. La chaleur de combustion de ce gaz est 890 kJ.mol^{-1} . Le volume molaire de ce gaz, mesuré dans les conditions de combustion est 24 L.mol^{-1} .

Calculer le débit du gaz brûlé.

Un puits canadien est un dispositif qui permet de tempérer, à moindre coût, l'air de ventilation d'une maison. Il s'agit d'une simple canalisation enterrée dans le sous-sol. On utilise le fait qu'à une profondeur d'environ 2 m sous terre, la température est presque constante toute l'année (environ $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ sous nos latitudes).

Un système de ventilation permet à l'air extérieur de pénétrer et de circuler dans la canalisation : l'été, l'air ventilé dans la maison est rafraîchi, l'hiver, l'air est préchauffé.

Une fois installé, le seul coût provient de l'alimentation électrique du système de ventilation. Ce coût est négligeable par rapport au gain thermique. $C_{\text{air}} = 1000\text{ J.kg}^{-1}.\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$



On met en marche le système de ventilation. l'air entre dans le puits canadien à la température $\theta_1 = 3,00^{\circ}\text{C}$. En circulant dans la canalisation enterrée, il se réchauffe et arrive dans la pièce à la température $\theta_2 = 11,0^{\circ}\text{C}$. (dimension de la pièce $5*3*2,3\text{m}$) Pour obtenir une bonne aération, on veut renouveler l'air de la pièce toutes les heures.

Montrer que la masse d'air qui doit circuler dans la canalisation en une journée est environ 1080 kg. (masse volumique de l'air $\rho_{\text{air}} = 1,30\text{ kg m}^{-3}$)

Calculer l'énergie thermique (ou chaleur) transférée à cette masse d'air dans la canalisation du puits canadien

Un morceau de fer de masse $m_1=500\text{g}$ est sorti d'un congélateur à la température $\theta_1=-30^\circ\text{C}$. Il est plongé dans un calorimètre, de capacité thermique négligeable, contenant une masse $m_2=200\text{g}$ d'eau à la température initiale $\theta_2=4^\circ\text{C}$

Déterminer l'état final d'équilibre du système (température finale, masse des différents corps présents dans le calorimètre).

Données:

Chaleur massique de l'eau : $c_e=4185 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Chaleur massique de la glace: $c_g=2090 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Chaleur massique du fer: $c_{\text{Fe}}=460 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Chaleur latente de fusion de la glace: $L_f=3,34.10^5 \text{ J.kg}^{-1}$

LA CONDUCTION DE LA CHALEUR DANS LES MATÉRIAUX

La conduction, ou coefficient de conductivité thermique, est exprimée en $W/(m.K)$ et représente la quantité d'énergie traversant $1m^2$ de paroi pour un mètre d'épaisseur de matériau et pour une différence de température de 1 K entre les deux faces, pendant l'unité de temps.












Elle est dénommée λ (lambda), valeur normalisée. Elle est conventionnellement mesurée pour une température moyenne du matériau de $10\text{ }^\circ\text{C}$.

La conductivité thermique est une caractéristique constante, intrinsèque et propre à chaque matériau. Elle permet d'évaluer l'aptitude du matériau en question à plus ou moins laisser passer un flux de chaleur.

Quelques exemples de valeurs de conductivité

Conducteurs

λ W/(m.K)

Cuivre	380,000	
Acier	52,000	
Granit	3,500	
Béton courant	1,750	
Plâtre enduit	0,460	
Pierre, marbre	0,290	
Bois dur	0,230	
Bois tendre	0,220	
Béton cellulaire	0,120	
Liège comprimé	0,100	
Verre	1,000	

Isolants

λ W/(m.K)

Laines minérales	0,030 à 0,040	
Air sec immobile	0,025	

LA RÉSISTANCE THERMIQUE R

La résistance thermique est la faculté d'un corps à s'opposer à la propagation de la chaleur lors de sa traversée. Plus un corps est résistant, et plus la quantité de chaleur qui le traverse est faible

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

R = résistance thermique exprimée en m².K/W.

e = épaisseur du matériau exprimée en m

λ = lambda en W/(m.k)

Exemple : pour atteindre une même résistance thermique **R = 5**, il faut :

$$16 \text{ cm de laine minérale à } \lambda = 0,032 ; 5 = \frac{0,16}{0,032} ;$$

$$\text{ou } 17,5 \text{ m de granit, } \lambda = 3,5 ; 5 = \frac{17,5}{3,5}$$

LA CONVECTION

Le transfert convectif intervient dans les échanges thermiques entre une paroi et un fluide (gaz ou liquide) en mouvement, en contact avec cette paroi

Dans le bâtiment c'est essentiellement **l'air en mouvement qui joue se rôle. On distingue:**

- **La convection naturelle:** le mouvement de l'air résulte de la différence de densité des parties chaudes et froides du fluide. Exp Le mouvement de l'air au voisinage d'un radiateur
- **La convection forcée:** Le mouvement du fluide est produit par un système mécanique extérieur. Ex: pompe, ventilateur, vent,

Dans la convection, le flux de chaleur est associé à la variation de température par la loi de Newton. Cette loi simplifiée est analogue à la loi de Fourier pour la conduction. Elle s'écrit,

$$\Phi = hc \cdot S \cdot \Delta T \quad \text{où:}$$

hc = coefficient d'échange convectif sur la surface $W / m^2 \cdot ^\circ C$

S = surface de contact entre la paroi et le fluide (m^2)

ΔT = différence de température entre la paroi et le fluide

Résistance thermique

On établit l'expression de la résistance par une démarche analogue à celle faite pour la conduction. On trouve alors, pour une surface d'échange donnée S , la relation suivante

$$R = \frac{1}{h_c S}$$




LE TRANSFERT DE CHALEUR DANS UNE PAROI

Il n'est pas possible d'empêcher les transferts de chaleur, mais il est possible de les freiner fortement. Isoler, c'est associer aux parois, des matériaux qui diminuent ces transferts de chaleur en augmentant leur résistance thermique

La résistance thermique de la paroi, se calcule en additionnant les résistances des différents éléments qui la composent ainsi que les résistances superficielles internes R_{si} et externes R_{se} de la paroi

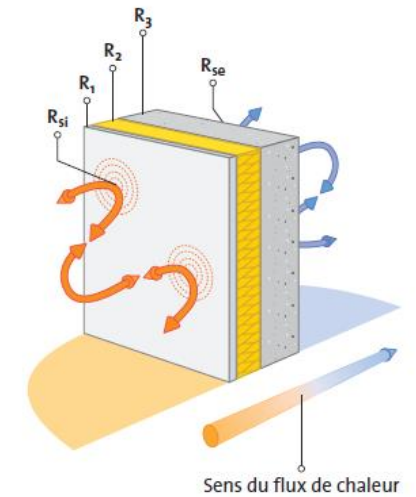
$$R_{paroi} = \sum R + R_{si} + R_{se}$$

La résistance superficielle d'une paroi caractérise la part des échanges thermiques qui se réalisent à la surface des parois par convection et rayonnement. Elle dépend du sens du flux de chaleur et de l'orientation de la paroi ; Elle s'exprime en $m^2.K/W$.

Paroi donnant sur : - l'extérieur - un passage ouvert - un local ouvert ⁽¹⁾	R_{se} $m^2.K/W$	R_{si} ⁽²⁾ $m^2.K/W$	$R_{se} + R_{si}$ $m^2.K/W$
Paroi verticale (Inclinaison $\geq 60^\circ$)  Flux horizontal	0,13	0,04	0,17
Flux ascendant 	0,10	0,04	0,14
Paroi Horizontale (Inclinaison $< 60^\circ$) Flux descendant 	0,17	0,04	0,21

(1) Si la paroi donne sur un autre local non chauffé, un comble ou un vide sanitaire, R_{se} s'applique des deux côtés

(2) Un local est dit ouvert si le rapport de la surface totale de ses ouvertures permanentes sur l'extérieur, à son volume, est égal ou supérieur à $0,005 m^2/m^3$. Ce peut être le cas, par exemple, d'une circulation à l'air libre, pour des raisons de sécurité contre l'incendie.

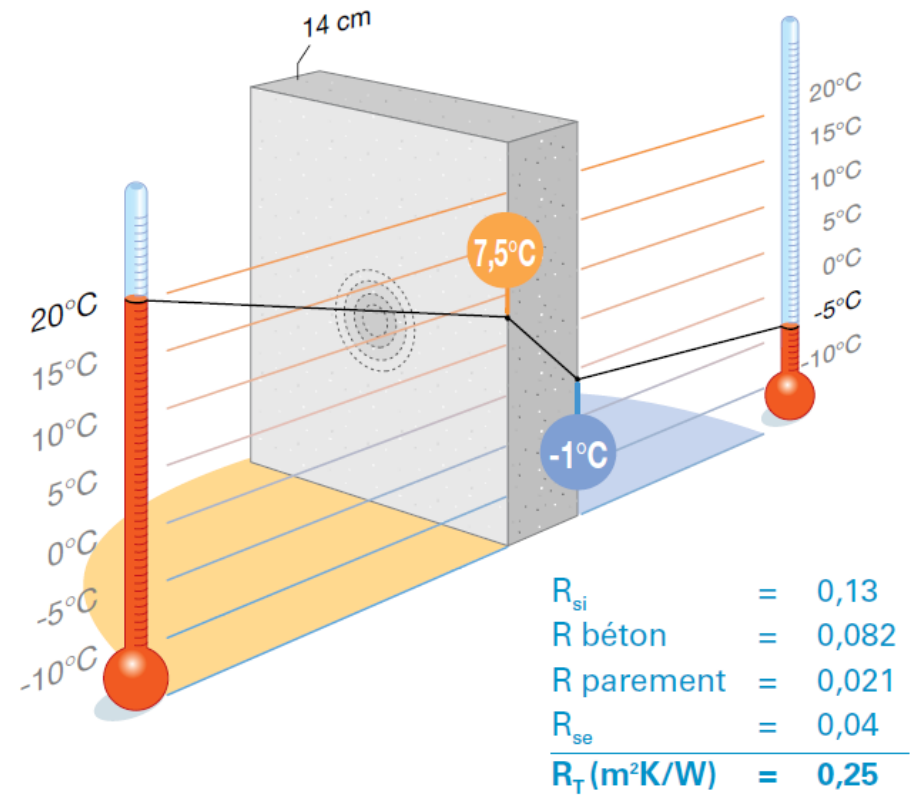


L'évolution de la température dans les parois

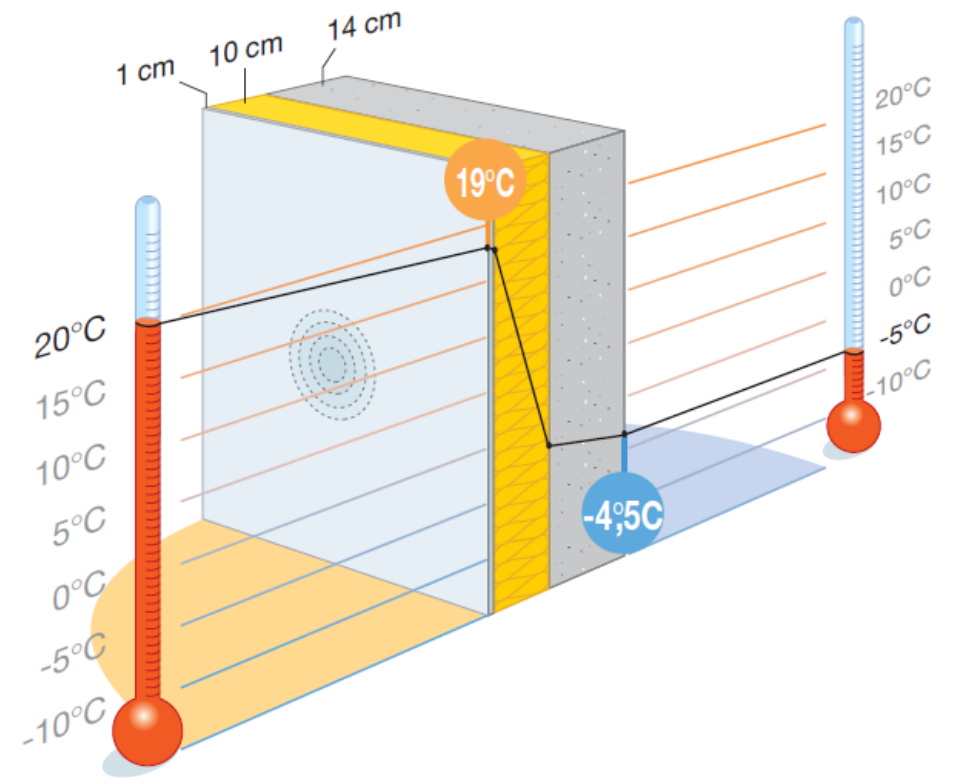
Profil des températures d'un mur

Paroi constitué de 14 cm béton et d'un parement

$T_{int} = 20\text{ °C}$ $T_{ext} = -5\text{ °C}$



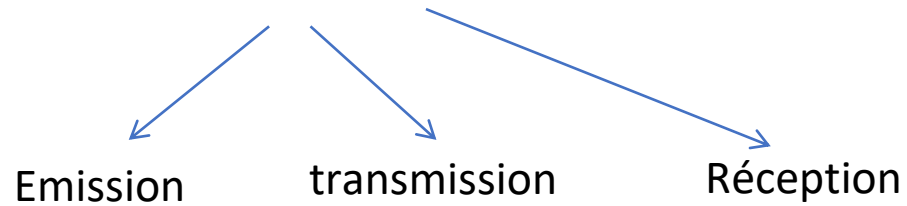
Chute de température dans une paroi isolée



TRANSFERT DE CHALEUR PAR RAYONNEMENT



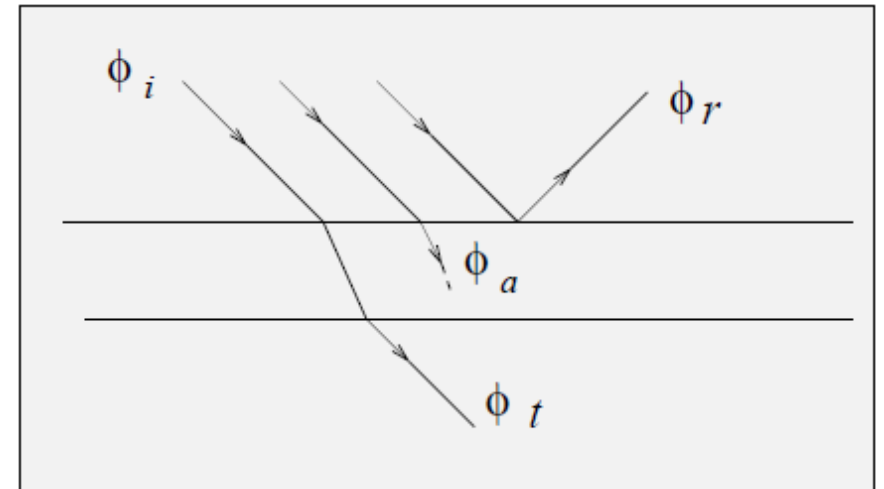
Mode d'échange d'énergie par émission et absorption de radiations électromagnétiques.



Soit Φ_i le flux incident, Φ_r le flux réfléchi, Φ_t le flux transmis et Φ_a le flux absorbé, la conservation de l'énergie s'écrit

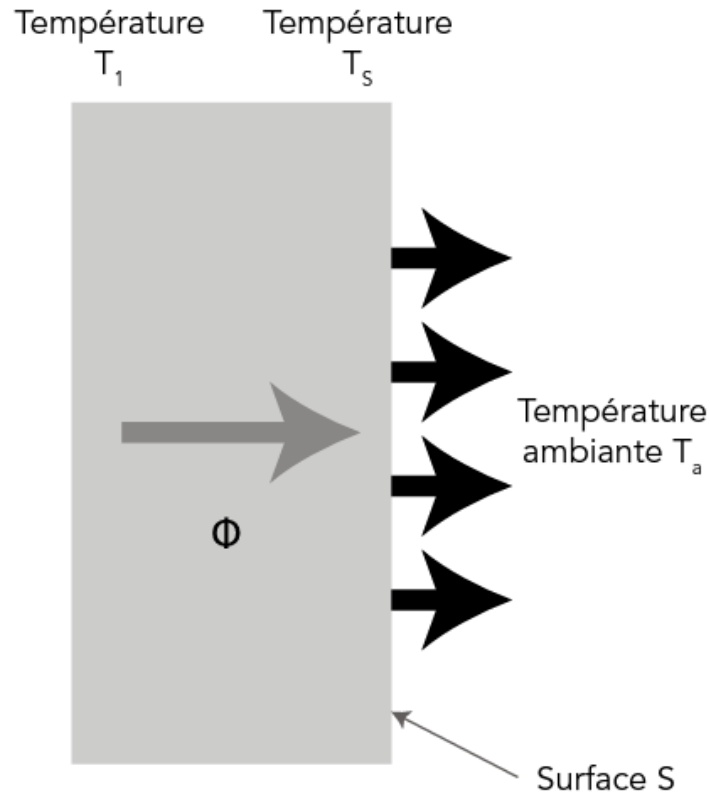
$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t$$

$$\rho = \frac{\phi_r}{\phi_i} \quad \text{facteur de réflexion}$$
$$\alpha = \frac{\phi_a}{\phi_i} \quad \text{facteur d'absorption}$$
$$\tau = \frac{\phi_t}{\phi_i} \quad \text{facteur de transmission}$$



loi de Stefan

le flux de chaleur échangé par rayonnement entre les deux surfaces peut s'écrire



$$\Phi_{\text{ray}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S (T_s^4 - T_a^4)$$

Φ_{ray} : flux thermique par rayonnement exprimé en W ;

S : surface d'échange en m^2 ;

σ : constante de Stefan-Boltzmann égale à :
 $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$;

T_s : température de la surface du mur en Kelvin K ;

T_a : température ambiante en Kelvin K ;

ε : facteur d'émission ou émissivité du matériau.

Matériaux	Facteur d'émission ε
Acier inox	0,25
Ciment	0,96
Brique	0,75
Béton	0,93
Liège	0,93
Cuivre poli	0,05
Pierre	0,93

On considère une plaque chauffante de forme circulaire en cuivre poli chauffée à la température 100 °C. Comment calculer le flux thermique émis par rayonnement par la surface de la plaque de diamètre $D = 50$ cm ?

Pour chauffer une pièce, on utilise un radiateur cylindrique de diamètre $D = 2$ cm et de longueur $L = 0,5$ m. Ce radiateur rayonne comme un corps noir et émet une puissance de 1 kW. On néglige les échanges par convection et conduction. Comment calcule-t-on la température θ du radiateur ?

Un corps noir est défini comme étant une surface idéale qui absorbe tout le rayonnement qu'elle reçoit.

$$\varepsilon=1$$

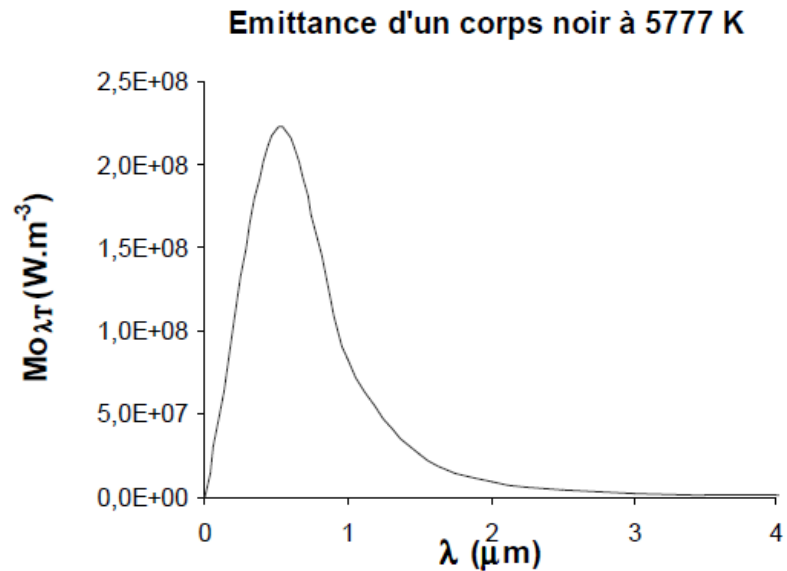
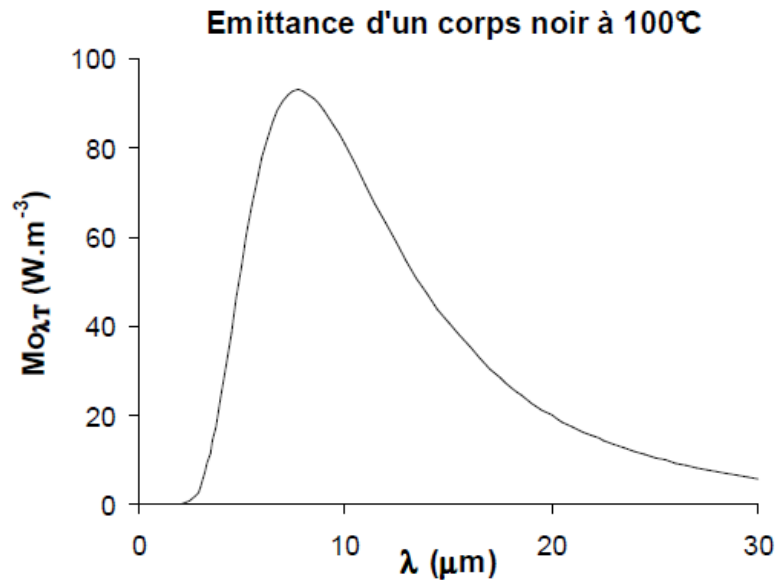
Rayonnement du corps noir

L'exitance ou **émittance** est une grandeur utilisée en photométrie et en radiométrie. Elle désigne le flux (lumineux en photométrie et énergétique en radiométrie) émis par unité de surface d'une source étendue qui rayonne (par opposition à une source lumineuse ponctuelle).

L'Emittance monochromatique est donnée par **la loi de Planck** :

$$M_{o\lambda T} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1}$$

$$C_1 = 3,742 \cdot 10^{-16} \text{ W.m}^{-2}$$
$$C_2 = 1,4385 \cdot 10^{-2} \text{ m.K}$$



La longueur d'onde λ_M pour laquelle l'émission est maximale varie avec la température de la source (**lois de Wien**):

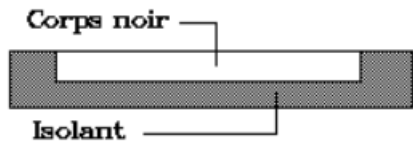
$$\lambda_M = \frac{2,897 \cdot 10^{-3}}{T}$$

$$M_{o\lambda_M T} = 0,410 \left(\frac{T}{10}\right)^5$$

On néglige les échanges thermiques par convection et conduction ainsi que l'influence de l'air ambiant.

Le soleil est assimilé à une source ponctuelle rayonnant uniformément dans tout l'espace. L'intensité énergétique de cette source est $I = 30 \cdot 10^{-24} \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$.

1) On appelle constante solaire, la puissance reçue par mètre carré de paroi placée perpendiculairement à la direction du rayonnement à la limite supérieure de l'atmosphère. Calculer cette constante solaire.



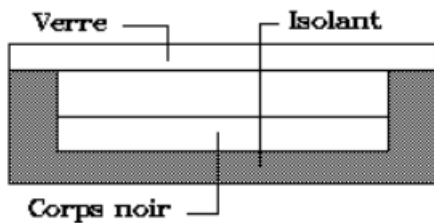
2) Après traversée de l'atmosphère, cette puissance n'est plus que de 1 kW. un capteur plan, assimilé à un corps noir reçoit ce rayonnement sous une incidence normale. La face arrière du capteur est revêtue d'un isolant parfait.

Quelle est la température d'équilibre du capteur ?

3) A quelle longueur d'onde le capteur émet-il le maximum d'énergie ?

Quel est le nom donné au rayonnement ayant cette longueur d'onde ?

4) Ce capteur est maintenant recouvert d'une paroi en verre. On admettra que le verre utilisé est parfaitement transparent au rayonnement solaire et parfaitement opaque au rayonnement infra-rouge.



Distance terre-soleil : $1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$.

Constante de Stefan : $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ S.I}$

Loi de Wien : $\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ S.I}$.