1- Généralité :

Au 19° siècle, les gens commencent à construire des machines à vapeur qui fonctionne avec des sources de chaleur, en fait toute l'idée c'est d'arriver à utiliser l'énergie thermique pour réaliser l'énergie mécanique ou un travail mécanique.

1-1 Définition

- Le travail est l'action de transférer de l'énergie.
- Le mouvement d'un objet est causé par du travail
- Travail = (Force) x (Distance)
- L'énergie est l'aptitude à faire du travail.
- L'énergie permet de produire un travail comme l'argent permet de dépenser.
- La puissance est le taux auquel le travail est fait.
- Puissance = (Travail)/(Temps)

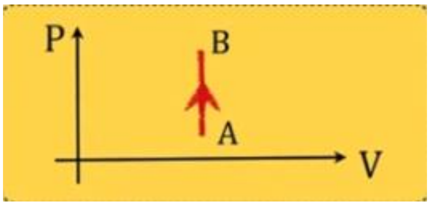
Travail et énergie : (1 Joule) = (1 Newton) x (1 mètre)

Puissance : (1 Watt) = (1 Joule)/ (1 seconde)

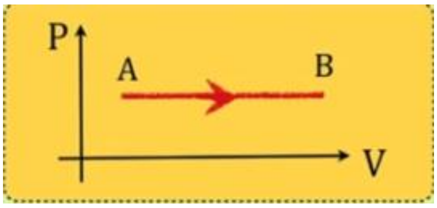
1-2 Le principe de la thermodynamique

Les différents types de transformation sur les gaz : diagramme P V

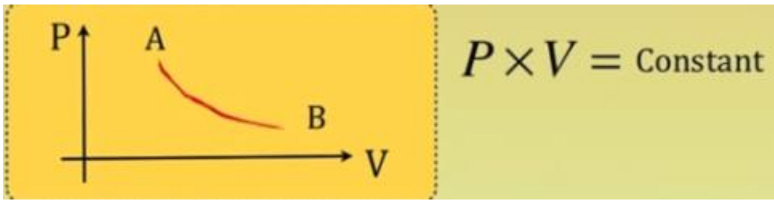
Transformation isochore – Volume constant



Transformation isobarique – Pression constante



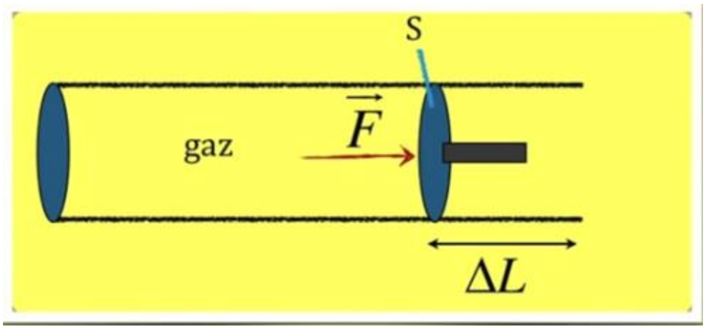
Transformation isotherme – Température constante



Transformation adiabatique

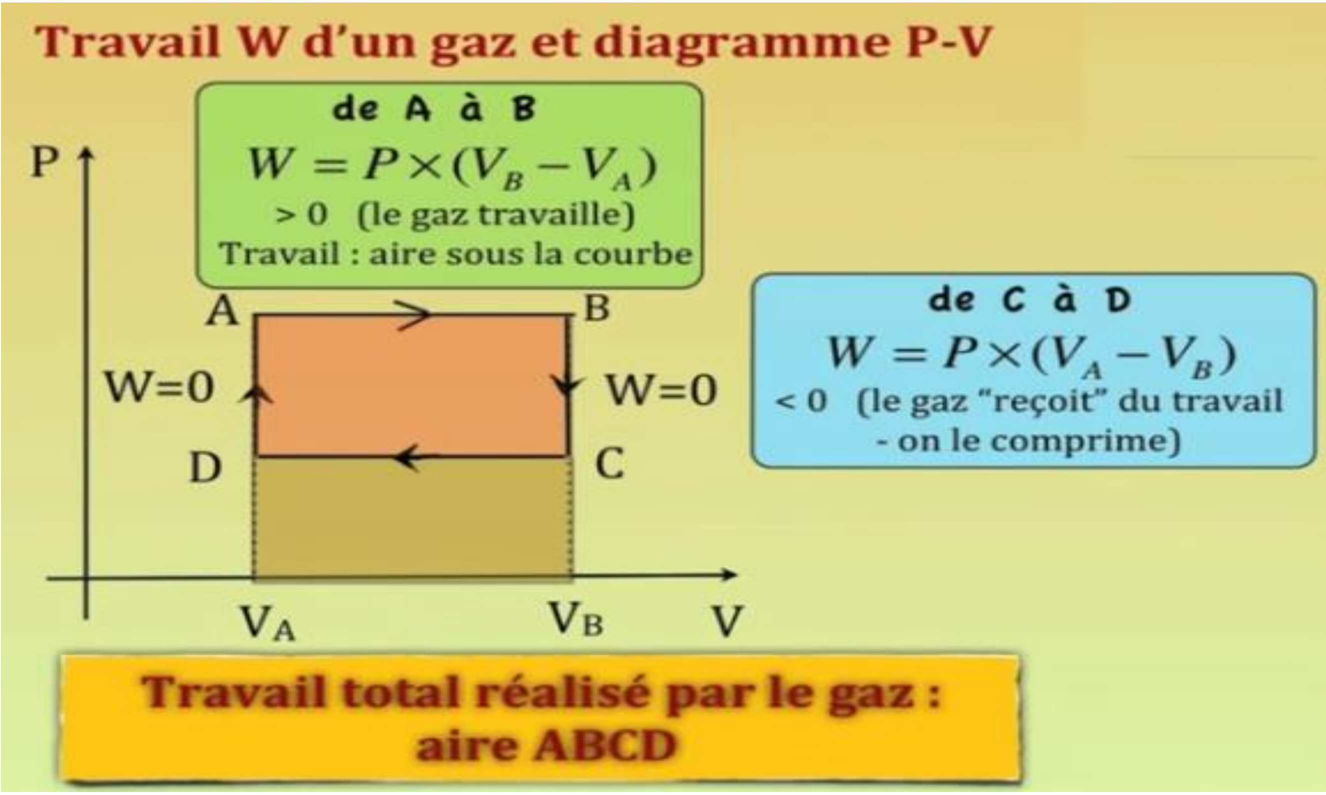
Transformations rapides
Le système est isolé
Pas d'échange thermique avec le milieu extérieur $Q = 0$

Donc l'idée que ces transformations des gaz vont nous donner un travail W



$$W = \vec{F} \cdot \vec{l} = F \times \Delta L = P \times S \times \Delta L = P \times \Delta V$$

$$P = \frac{F}{S} \qquad \boxed{W = P\Delta V}$$



Le premier principe de la thermodynamique c'est :

« Lors de toute transformation il y a conservation d'énergie »

Au cours de la transformation d'un système fermé, la variation de son énergie interne U est égale à la quantité d'énergie échangée avec le milieu extérieur sous forme d'énergie thermique Q et de travail W

$$\underset{\text{Joule}}{\Delta U} = \underset{\text{Joule}}{Q} - \underset{\text{Joule}}{W}$$

avec

$$W = P\Delta V$$

si P constante

En conclusion que

- L'énergie n'est ni produite ni détruite.
- La quantité totale d'énergie dans l'univers demeure constante.
- L'énergie peut toutefois être transformée d'une forme à une autre.
- C'est le principe de conservation d'énergie : 1ère loi de la thermodynamique.
- la 2ième loi de la thermodynamique. Qu'à chaque fois que l'énergie est transformée d'une forme à une autre, sa qualité se dégrade.

.

1.3 Les Transferts De Chaleur

La thermodynamique permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre.
La thermique (ou thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristiques du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final.

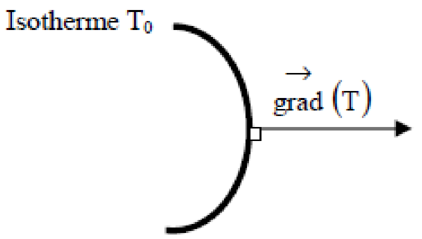
1.4 Définitions

1.4.1 Champ de température :

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température : $T = f(x,y,z,t)$. La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température. Nous distinguerons deux cas :
- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire.
- Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou transitoire.

1.4.2 Gradient de température :

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite surface isotherme. La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température :



$$\boxed{\overrightarrow{grad}(T) = \vec{n}\,\frac{\partial T}{\partial n}}$$

Avec : n vecteur unitaire de la normale
$\frac{\partial T}{\partial n}$ Dérivée de la température le long de la normale.

1.4.3 Flux de chaleur :

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur :

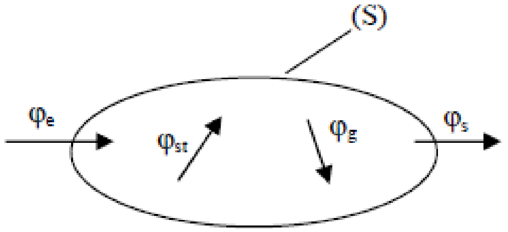
$$\emptyset = \frac{1}{S}\frac{dQ}{dt}$$

Où S est l'aire de la surface (m^2).
On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps :

$$\varphi = \frac{dQ}{dt}$$

1.5 Bilan d'énergie

Il faut tout d'abord définir un système (S) par ses limites dans l'espace et il faut ensuite établir l'inventaire des différents flux de chaleur qui influent sur l'état du système et qui peuvent être :



φ_{st}	flux de chaleur stocké	dans le système (S)
φ_g	flux de chaleur généré	
φ_e	flux de chaleur entrant	
φ_s	flux de chaleur sortant	

On applique alors le 1er principe de la thermodynamique pour établir le bilan d'énergie du système (S) :

$$\varphi_e + \varphi_g = \varphi_s + \varphi_{st}$$

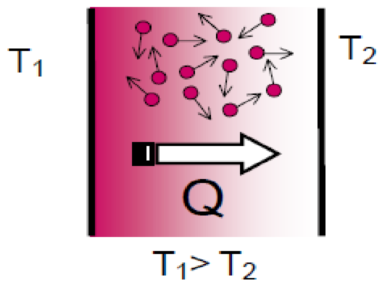
On obtient l'équation différentielle dont la résolution permet de connaître l'évolution de la température en chaque point du système.

1.5.1 Conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : le flux est proportionnel au gradient de température :

$$\boxed{\vec{\emptyset} = -\lambda\ S\ \overrightarrow{\mathrm{grad}}\ (T)}$$

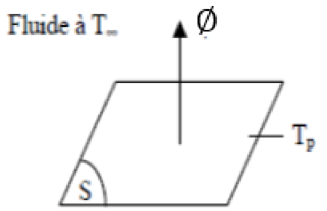


Ou sous forme algébrique : $\emptyset = -\lambda\, S\, \frac{\partial T}{\partial x}$

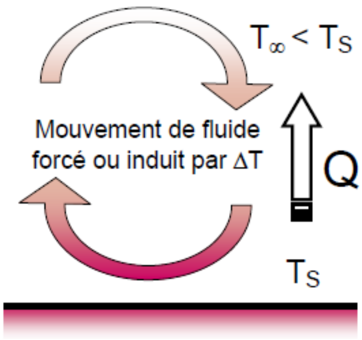
Avec :	$\emptyset$	Flux de chaleur transmis par conduction	(W)
	λ	Conductivité thermique du milieu	($W\,m^{-1}\,°C^{-1}$)
	x	Variable d'espace dans la direction du flux	(m)
	S	Aire de la section de passage du flux de chaleur	(m^2)

1.5.2 Convection

C’est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l’énergie étant transmise par déplacement du fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :



$$\boxed{\varnothing = h\,S\,(T_p - T_\infty)}$$



Avec :

$\varnothing$	Flux de chaleur transmis par convection	(W)
h	Coefficient de transfert de chaleur par convection	($W\,m^{-2}\,°C^{-1}$)
T_p	Température de surface du solide	(°C)
T_∞	Température du fluide loin de la surface du solide	(°C)
S	Aire de la surface de contact solide/fluide	(m^2)

Remarque : La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection h est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide.

1.5.3 Flux de chaleur lié à un débit massique

Lorsqu’un débit massique m& de matière entre dans le système à la température T_1 et en ressort à la température T_2, on doit considérer dans le bilan (1.5) un flux de chaleur entrant correspondant :

$$\boxed{\varnothing_e = \dot{m}\,c_p\,(T_1 - T_2)}$$

Avec :			
	$\varnothing_e$	Flux de chaleur entrant dans le système	(W)
	$\dot{m}$	Débit massique	($kg.s^{-1}$)
	c	Chaleur spécifique	($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
	T_1, T_2	Températures d’entrée et de sortie	(K)

1.54 Stockage d’énergie

Le stockage d’énergie dans un corps correspond à une augmentation de son énergie interne au cours du temps d’où (à pression constante et en l’absence de changement d’état) :

$$\phi_{st} = \rho\, v\, c\, \frac{\partial T}{\partial t}$$

Avec : ϕ_{st} Flux de chaleur (W)
ρ Masse volumique ($Kg\ m^{-3}$)
V Volume (m^3)
C Chaleur spécifique ($J\ kg^{-1}\ °C^{-1}$)
T Température (°C)
t Temps (s)

Le produit ρ v c est appelé la capacité thermique du corps.

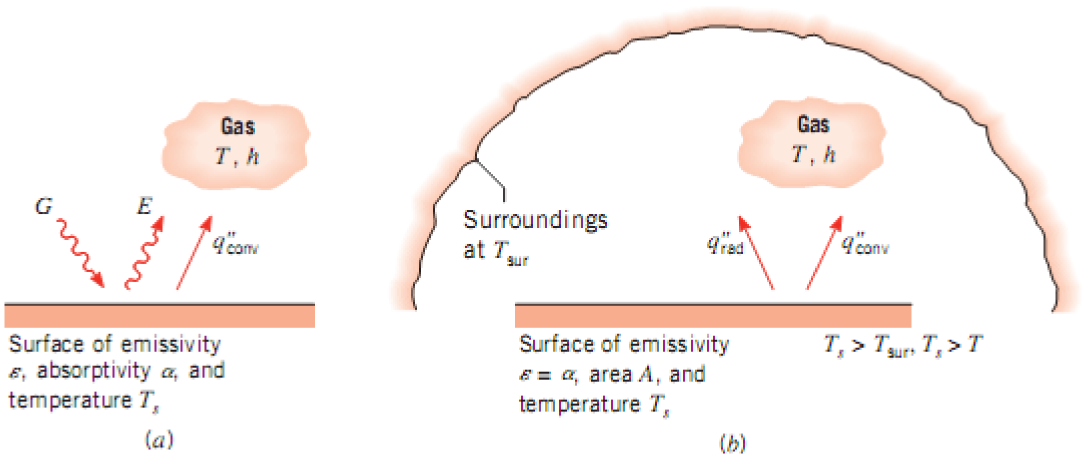
1.5.5 Génération d'énergie

Elle intervient lorsqu'une autre forme d'énergie (chimique, électrique, mécanique, nucléaire) est convertie en énergie thermique. On peut l'écrire sous la forme :

$$\phi_g = \dot{q}V$$

2.3.3 Rayonnement

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). En fait le transfert de rayonnement se produit le plus efficacement dans le vide. L »énergie du champ de rayonnement est transportée par des ondes électromagnétiques (ou alternativement des ondes).



Le rayonnement émis par la surface provient de l'énergie thermique de la matière délimitée par la surface, et la vitesse à laquelle l'énergie est libérée par unité de surface (W / m^2) est appelée puissance émissive de surface, E. Il y a une limite supérieure le pouvoir émissif, qui est prescrit par la loi Stefan-Boltzmann.

$$E_b = \sigma T_s^4$$

Où T_s est la température absolue (K) de la surface et σ est la constante de Stefan-Boltzmann (σ=5,67 10^{-8} W/m^2 K^4). Une telle surface est appelée un radiateur idéal ou un corps noir. Le flux thermique émis par une surface réelle est inférieur à celui d'un corps noir à la même température et est donné par :

$$E_b = \varepsilon \, \sigma \, T_s^4$$

Où ξ est une propriété radiative de la surface appelée émissivité. Avec des valeurs dans la plage, cette propriété fournit une mesure de l'efficacité d'une surface à émettre de l'énergie par rapport à un corps noir.
Le rayonnement peut provenir d'une source spéciale, comme le soleil, ou d'autres surfaces auxquelles la surface d'intérêt est exposée. Nous désignons la vitesse à laquelle tout ce rayonnement est incident sur une surface unitaire de la surface comme l'irradiation G.
Une partie ou la totalité de l'irradiation peut être absorbée par la surface, augmentant ainsi l'énergie thermique du matériau. La vitesse à laquelle l'énergie rayonnante est absorbée par unité de surface peut être évaluée à partir de la connaissance d'une propriété radiative de surface appelée absorptivité α C'est,

$$G_{abs} = \alpha \, G$$

Un cas particulier qui se produit fréquemment implique un échange de rayonnement entre une petite surface à T_s et une surface isotherme beaucoup plus grande qui entoure complètement la plus petite T_{sur}.
L'environnement pourrait être, par exemple, les murs d'une pièce ou d'un four dont la température T_{sur} diffère de celle d'une surface fermée ($T_{sur}=T_s$). L'irradiation peut être approximée par l'émission d'un corps noir à T_{sur}, auquel cas.

$$G = \sigma \, T_{sur}^4$$

Si la surface est supposée être une surface grise, pour laquelle α=ξ le taux net de transfert de chaleur par rayonnement à partir de la surface, exprimé par unité de surface (densité de flux), est :

$$\varphi = \frac{\phi}{S} = \varepsilon \, E_b - \alpha \, G = \varepsilon \, \sigma \, (T_s^4 - T_{sur}^4)$$

Cette expression fournit la différence entre l'énergie thermique qui est libérée en raison de l'émission de rayonnement et celle acquise en raison de l'absorption du rayonnement. Pour de nombreuses applications, il est commode d'exprimer l'échange thermique de rayonnement net sous la forme :

$$\phi = h_r \, S \, (T_s - T_{sur})$$

Où, à partir de l'équation précédente de la densité de flux, le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement h_r est :

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_s - T_{sur})(T_s^2 - T_{sur}^2)$$

Ici, nous avons modélisé le mode de rayonnement d'une manière similaire à la convection. En ce sens, nous avons linéarisé l'équation de la vitesse de rayonnement, ce qui rend le taux de chaleur proportionnel à une température différence plutôt que de la différence entre deux températures à la quatrième puissance.

On notera cependant que h dépend fortement de la température, alors que la dépendance en température du coefficient de transfert de chaleur par convection h est généralement faible.

Les surfaces de la figure 1.6 peuvent également transférer simultanément de la chaleur par convection à un gaz adjacent. Pour les conditions de la figure, le taux total de transfert de chaleur de la surface est alors :

$$\phi = \phi_{conv} + \phi_{rad} = h\,S\,(T_s - T_\infty) + \varepsilon \sigma S (T_s^4 - T_{sur}^4)$$

Exemple d'application :

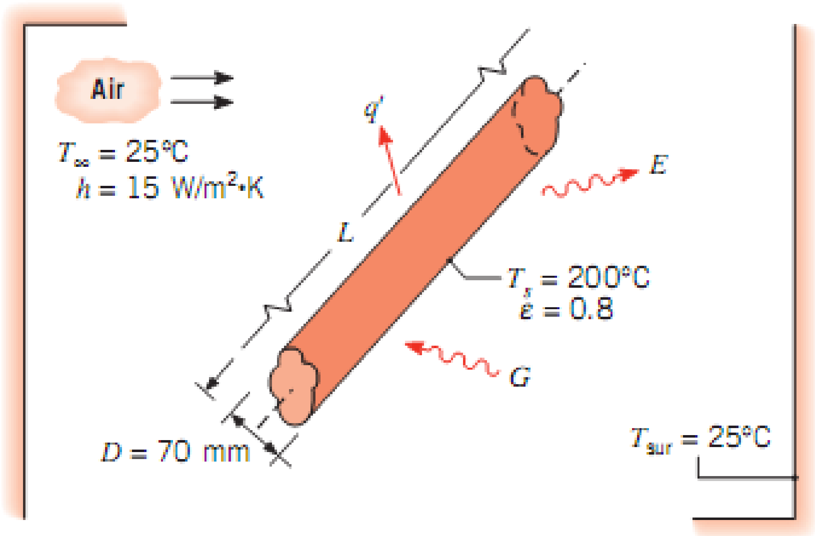
Un tuyau de vapeur non isolé traverse une pièce dans laquelle l'air et les parois sont à 25 ° C. Le diamètre extérieur du tuyau est de 70 mm et sa température de surface et son émissivité sont respectivement de 200 ° C et de 0,8 ° C.

Quels sont le pouvoir émissif de surface et l'irradiation?

Si le coefficient associé au transfert de chaleur par convection libre de la surface à l'air est de 15 W / m^2 K, quel est le taux de perte de chaleur de la surface par unité de longueur de tuyau?

Solution :

Sachant que le tuyau non isolé d'un diamètre, d'une émissivité et d'une température de surface prescrits dans une pièce avec des températures fixes de paroi et d'air.



Hypothèses:

1. Conditions à l'état stable.
2. L'échange de rayonnement entre le tuyau et la pièce est entre une petite surface et un autre plus grande.
3. L'émissivité de surface et l'absorptivité sont égaux.

Analyse:

1. Le pouvoir émissif de surface peut être évalué à partir de l'équation 1.5, tandis que l'irradiation Correspond à $G = \sigma T_{sur}^4$. Par conséquent

$$E = \varepsilon\sigma T_s^4 = 0.8(5.67 \times 10^{-8}\ \mathrm{W/m^2 \cdot K^4})(473\ \mathrm{K})^4 = 2270\ \mathrm{W/m^2}$$
$$G = \sigma T_{sur}^4 = 5.67 \times 10^{-8}\ \mathrm{W/m^2 \cdot K^4}\ (298\ \mathrm{K})^4 = 447\ \mathrm{W/m^2}$$

La perte de chaleur du tuyau se fait par convection à l'air ambiant et par échange de rayonnement avec les parois. D'où, et de l'équation

$$\phi = \phi_{conv} + \phi_{rad}\ \ avec\ \pi\, d\, l$$

$$\phi = \phi_{conv} + \phi_{rad} = h\,S\ (T_s - T_\infty) + \varepsilon\,\sigma\,S\,(T_s^4 - T_{sur}^4)$$

La perte de chaleur par unité de longueur de tuyau est alors :

$$q' = \frac{q}{L} = 15\ \mathrm{W/m^2 \cdot K}(\pi \times 0.07\ \mathrm{m})(200 - 25)^\circ\mathrm{C}$$
$$+\ 0.8(\pi \times 0.07\ \mathrm{m})\ 5.67 \times 10^{-8}\ \mathrm{W/m^2 \cdot K^4}\ (473^4 - 298^4)\ \mathrm{K^4}$$
$$q' = 577\ \mathrm{W/m} + 421\ \mathrm{W/m} = 998\ \mathrm{W/m}$$

Remarque :

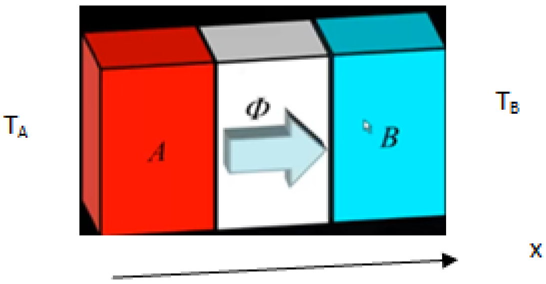
Notez que la température peut être exprimée en unités C ou K lors de l'évaluation de la différence de température pour un taux de transfert de chaleur par convection (ou conduction). Cependant, la température doit être exprimée en kelvins (K) lors de l'évaluation d'un taux de transfert de rayonnement.

2. TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONDUCTION EN REGIME PERMANENT

2.1 La loi de Fourier

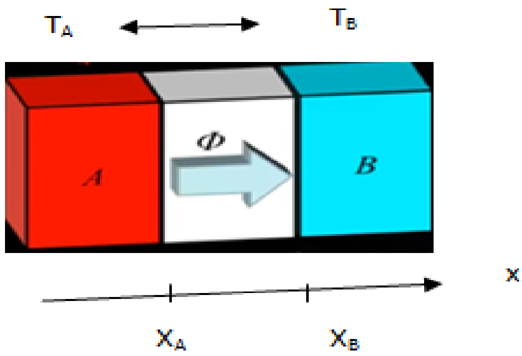
Rappelons que la conduction est le seul mode de transfert de chaleur possible dans un solide (sauf pour quelques solides transparents comme le verre qui laissent passer un rayonnement électromagnétique). C'est un mode de transfert sans transport de matière.

- La chaleur Q passe du corps le plus chaud au corps le plus froid ;
- On a la présence d'un flux de chaleur
  $$\phi = \frac{\partial Q}{\partial t}$$
- La température évolue dans l'espace entre le corps A et B
  Il existe un gradient de température dT/dx
- La loi de Fourier relie le flux de chaleur au gradient de température



$$\phi = -\lambda\, S\, \frac{\partial T}{\partial x}$$

S la surface de contact
λ la conductivité thermique w/m.K
Plus λ est grande, plus le matériau conduit facilement la chaleur
Pour λ faible le matériau est isolant thermiquement



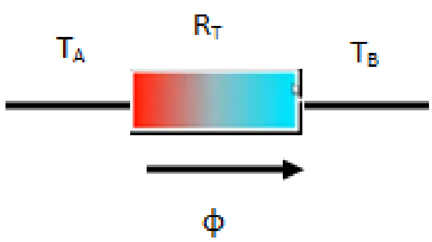
Si on suppose que l'épaisseur e est faible le gradient de la température devient

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_B - T_A}{x_B - x_A} = \frac{T_B - T_A}{e}$$

Donc on aura $\phi = -\lambda\, S\, \frac{T_B - T_A}{e}$ --------- $T_A - T_B = \frac{e}{\lambda\, S}\phi$

Avec $R_T = \frac{e}{\lambda\, S}$ on obtient $T_A - T_B = R_T \phi$

R_T résistance thermique

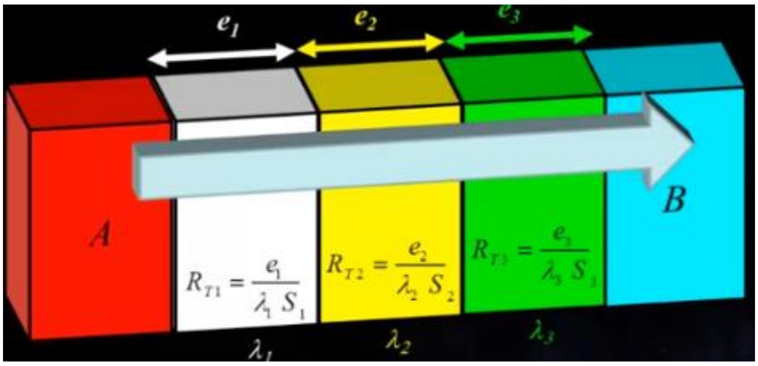


Par analogie électrique, hydraulique et thermique on peut décrire :

Electrique	Loi d'Hom	$V_A-V_B=R\ I$	I Intensité	V Potentiel	R Resistance
Hydrodynamique	Loi de Poiseuille	$P_A-P_B=R_p\ Q$	Q Débit volumique	P Pression	R Resistance de poiseuille et Darcy
	Loi de Darcy	$P_A-P_B=R_p\ Q$			
thermique	Loi de Fourier	$T_A-T_B=R_T\ \phi$	ϕ Flux de chaleur	T Température	R_T Resistance thermique

Si on a plusieurs matériaux

En série :

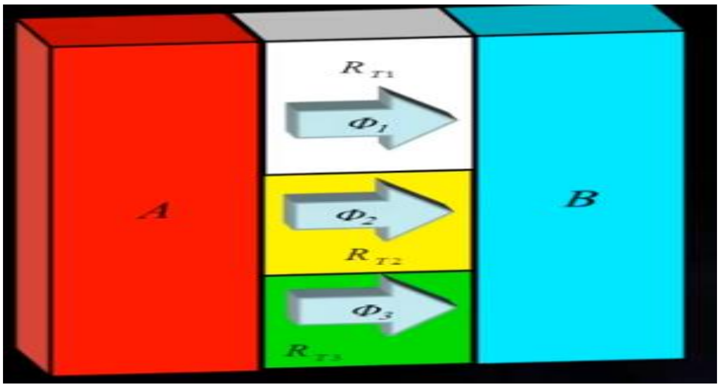


$$R_T = \frac{e}{\lambda\, S}$$

$$R_T = \sum R_{Ti} = \sum \frac{e_i}{\lambda_i\, S_i}$$

$$T_A - T_B = \sum \frac{e_i}{\lambda_i\, S_i}\phi$$

En parallèle :



$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{T1}} + \frac{1}{R_{T2}} + \frac{1}{R_{T3}}$$

Avec $\phi_{Tot}=\phi_1+\phi_2+\phi_3$

Exemple 1 :

1 - Calculer le flux traversant une vitre de 1 m² de surface et de 3,5 mm d'épaisseur. La température de la face interne de la vitre est égale à 10°C, celle de la face externe est égale à 5°C.
- En déduire la résistance thermique de la vitre.
Conductivité thermique du verre : $\lambda v = 0,7\ W.m^{-1}.K^{-1}$
- Pour les mêmes températures de paroi, calculer le flux traversant un m² de mur de briques de 26 cm d'épaisseur. En déduire la résistance thermique.
Conductivité thermique des briques : $\lambda b = 0,52\ W.m^{-1}.K^{-1}$.

Réponse :

Flux traversant 1m² de vitre :

$$\phi_{verre} = \frac{\lambda\ .S.\ (\theta_1 - \theta_2)}{e} = \frac{0,7.1.(5-0)}{3,5.10^{-3}} = 1000\ W$$

Résistance thermique d'1m² de vitre :

$$R_{verre} = \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{\phi} = \frac{10-5}{1000} = 5.10^{-3}\ °C.W^{-1} \quad ou \quad R = \frac{e}{\lambda\ .\ S} = \frac{3,5.10^{-3}}{0,7.1} = 5.10^{-3}\ °C.W^{-1}$$

Flux traversant 1m² de mur de briques :

$$\phi_{briques} = \frac{\lambda\ .S.\ (\theta_1 - \theta_2)}{e} = \frac{0,52.1.(10-5)}{0,26} = 10\ W$$

Résistance thermique d'1m² de mur de briques :

$$R_{briques} = \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{\phi} = \frac{10-5}{10} = 0,5\ °C.W^{-1} \quad ou \quad R = \frac{e}{\lambda\ .\ S} = \frac{0,26}{0,52.1} = 0,5\ °C.W^{-1}$$

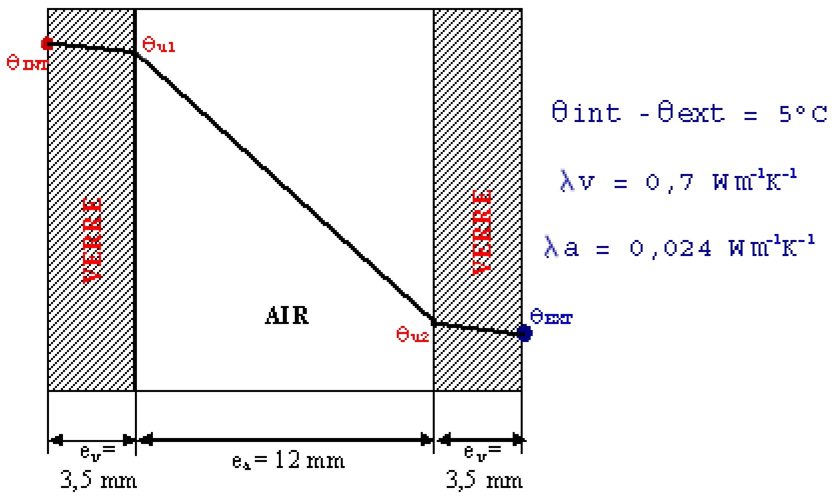
Analyse des résultats : Pour une même surface et un même écart de température, le flux perdu par la vitre est 100 fois plus élevé que celui perdu par le mur de briques dont la conductivité est plus faible et dont l'épaisseur est beaucoup plus élevée que celle de la vitre.

Exemple 2 :

Un double vitrage est constitué de deux plaques de verre séparées par une couche d'air sec immobile. L'épaisseur de chaque vitre est de 3,5 mm et celle de la couche d'air est de 12 mm. La conductivité thermique du verre est égale à $0,7 W.m^{-1}.°C^{-1}$ est celle de l'air est de 0,024 W.m-1.°C-1 sur le domaine de température étudié. Pour une chute de température de 5°C entre les deux faces externes du double vitrage, calculez les pertes thermiques pour une vitre de 1m2. (Note : ce calcul néglige l'effet du coefficient de convection de part et d'autre de chaque vitre). Comparez ces pertes thermiques à celles qui seraient obtenues avec une seule vitre d'épaisseur égale à 3,5 mm.

Réponse :

Le double vitrage est constitué de **trois résistances thermiques en série**.



Le flux traversant ce double vitrage est donné par :

$$\phi = \frac{\theta_{int} - \theta_{ext}}{R_{tot}} = \frac{\theta_{int} - \theta_{ext}}{R_v + R_a + R_v} = \frac{\theta_{int} - \theta_{ext}}{\frac{e_v}{\lambda_v S} + \frac{e_a}{\lambda_a S} + \frac{e_v}{\lambda_v S}} = \frac{(\theta_{int} - \theta_{ext}) \times S}{2\,\frac{e_v}{\lambda_v} + \frac{e_a}{\lambda_a}}$$

A.N. :

$$\phi = \frac{5 \times 1}{2\ \frac{\times 3{,}5.10^{-3}}{0{,}7} + \frac{12.10^{-3}}{0{,}024}} = \frac{5}{2\ x\ 0{,}005 + 0{,}5}$$

Φ double vitrage = 9,8 W

Remarque sur le profil de température(voir figure)

La résistance thermique de la lame d'air est 100 fois plus élevée que celle de chaque vitre,

la chute de température dans l'air sera 100 fois plus élevée que dans chaque vitre,

c'est à dire :

Θ int - Θ v1 = R v x Φ = 0,005 x 9,8 = 0,049 °C

Θ v1 - Θ v2 = R a x Φ = 0,5 x 9,8 = 4,9 °C

Θ v2 - Θ ext = R v x Φ = 0,005 x 9,8 = 0,049 °C

Comparons le flux traversant le double vitrage à celui traversant une seule vitre en

verre pour

une même surface et une même différence de température.

$$\phi_{1\ seule\ vitre} = \frac{\theta_{int} - \theta_{ext}}{R_v} = \frac{\lambda_v \times S}{e_v}(\theta_{int} - \theta_{ext})$$

$$\phi_{1\ seule\ vitre} = \frac{0{,}7 \times 1}{3{,}5.10^{-3}} \quad x \quad 5$$

Φ simple vitre = 1000 W

Conclusion : Si on considère uniquement les échanges par conduction (on verra au chapitre suivant que le résultat est modifié du fait des échanges par convection), le double vitrage permet de réduire 100 fois les pertes thermiques à travers la vitre. Ceci est surtout dû à la résistance thermique très élevée de la couche d'air car l'air a une faible conductivité thermique.

Exemple 3 :

Calculer le flux traversant la façade de 50 m² d'une maison. Le mur est constitué de briques de 26 cm d'épaisseur. La façade est percée de 4 vitres de 2 m² de surface et 3,5 mm d'épaisseur et d'une porte en bois de 2m² et de 42 mm d'épaisseur. On suppose que la température de paroi interne est égale à 10°C pour tous les matériaux constituant la façade, de même, la température de paroi externe est de 5°C.

Conductivité thermique du verre : $\lambda_v = 0{,}7\ W.m^{-1}.K^{-1}$

Conductivité thermique des briques : $\lambda_b = 0{,}52\ W.m^{-1}.K^{-1}$

Conductivité thermique du bois : $\lambda_{bois} = 0{,}21\ W.m^{-1}.K^{-1}$

Réponse :

La façade peut être assimilée à 3 résistances en parallèle, celle des vitres, celle de la porte et celle du mur de briques. On calcule donc chacune de ces résistances pour en déduire la résistance équivalente et pour calculer finalement le flux traversant la façade.

- Résistance thermique des vitres :

$$R_{vitres} = \frac{e_{vitre}}{\lambda_v \;.\; S_{vitres}} = \frac{3,5.10^{-3}}{0,7.4.2} = \mathbf{0,625.10^{-3}\ °C.W^{-1}}$$

Résistance thermique de la porte :

$$R_{porte} = \frac{e_{porte}}{\lambda_{bois} \;.\; S_{porte}} = \frac{0,042}{0,21.2} = \mathbf{0,1\ °C.W^{-1}}$$

Résistance thermique du mur :

$$R_{mur} = \frac{e_{mur}}{\lambda_b \;.\; S_{mur}} = \frac{0,26}{0,52.(50-4.2-2)} = \mathbf{0,0125\ °C.W^{-1}}$$

Résistance équivalente de la façade :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{vitres}} + \frac{1}{R_{porte}} + \frac{1}{R_{mur}} = \frac{1}{0,625.10^{-3}} + \frac{1}{0,1} + \frac{1}{0,0125} = 1600 + 10 + 80 = 1690 \quad W.°C^{-1}$$

$$R = \frac{1}{1690} = \mathbf{0,592.10\ {-3}\ °C.W^{-1}}$$

Donc le flux traversant la façade est :

$$\phi_{façade} = \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{R} = 5.1690 \quad \mathbf{\Phi_{façade} = 8450\ W}$$

On peut aussi calculer le flux traversant les vitres, la porte et le mur et additionner ces flux soit :
Flux traversant les vitres :

$$\phi_{vitres} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_{vitres}} = \frac{10-5}{0,625.10^{-3}} = \mathbf{8000\ W}$$

Flux traversant la porte :

$$\phi_{porte} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_{porte}} = \frac{10-5}{0,1} = \mathbf{50\ W}$$

Flux traversant le mur :

$$\phi_{mur} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_{mur}} = \frac{10-5}{0,0125} = \mathbf{400\ W}$$

Donc le flux total traversant la façade est :

$$\phi_{façade} = \phi_{vitres} + \phi_{porte} + \phi_{mur} = 8000 + 50 + 400 \quad \mathbf{\Phi_{façade} = 8450\ W}$$

Analyse des résultats : Bien que la surface totale des vitres (8m²) soit seulement de 1/5 de la surface de mur (40m²), le flux perdu par conduction par les vitres (fermées) est 400 fois plus important que celui perdu par le mur. Il est donc particulièrement important de réduire le flux perdu par les vitres grâce à un double vitrage (voir exercice chapitre suivant).

2.2 La conductivité thermique

a. Influence de la nature du matériau sur la conductivité thermique

En général, la conductivité thermique va de pair avec la conductivité électrique. Par exemple, les métaux, bons conducteurs d'électricité sont aussi de bons conducteurs thermiques. Il y a toutefois des exceptions, le diamant par exemple a une conductivité thermique élevée, entre 1000 et 2600 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, alors que sa conductivité électrique est basse.

Le Tableau ci-dessous contient la Conductivité thermique de différents matériaux en $W.\ m^{-1}.\ °C^{-1}$

METAUX ET ALLIAGES (à la température ambiante)			
Aluminium à 99,9 %	**228**	Zinc	**111**
Aluminium à 99 %	**203**	Acier doux (1 % de C)	**46**
Cuivre à 99,9 %	**386**	Acier inox (Cr 18 % - Ni 8 %)	**16**
Etain	**61**	Alliage (Al 92 % - Mg 8 %)	**104**
Fer pur	**85**	Laiton (Cu 70 % - Zn 30 %)	**99**
Nickel pur	**61**	Titane	**21**
Plomb pur	**35**		
SOLIDES NON METALLIQUES (à la température ambiante)			
Amiante (feuilles)	**0,162**	Liège	**0,046**
Béton plein	**1,7**	Matières plastiques phénoplastes	**0,046**
Briques de terre cuite pleines	**1,16**	Matières plastiques polyester	**0,209**
Plaque de fibrociment	**0,74**	Matières plastiques polyvinyles	**0,162**
Verre courant	**0,70**	Porcelaine	**0,928**
Verre pyrex	**1,16**	Laine de verre	**0,046**
Electrographite	**116**		
LIQUIDES		**GAZ (à 0°C et sous la pression normale)**	
Eau à 20°C	**0,59**	Air	**0,024**
Eau à 100°C	**0,67**	Azote	**0,024**
Dowtherm A à 20°C	**0,139**	Acétylène	**0,019**
Benzène à 30°C	**0,162**	Hydrogène	**0,174**
Mercure à 20°C	**8,47**	Anhydride carbonique	**0,014**
Sodium à 200°C	**81,20**	Oxygène	**0,024**

L'acier inoxydable est moins conducteur que la plupart des autres métaux et alliages.

Parmi les liquides :

- le mercure se détache nettement
- les métaux fondus sont de bons conducteurs ce qui explique par exemple l'utilisation de sels de sodium comme fluide caloporteur pour le refroidissement des réacteurs nucléaires.

On constate en général : λ des gaz < λ des liquides < λ des solides

b. Influence de la température sur la conductivité thermique

- **Pour les solides**, on peut admettre, en première approximation, que les variations sont linéaires, soit : $\boldsymbol{\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + a.T)}$

- où $\boldsymbol{\lambda_0}$ est la conductivité thermique à 0°C et $\boldsymbol{\lambda}$ la conductivité thermique à **T°C**.
  a est une constante appelée coefficient de température du solide considéré.
- **a** > **0** pour de nombreux matériaux isolants.
- **a** < **0** pour la plupart des métaux et alliages (à l'exception de l'aluminium et du laiton).

- **Pour les liquides**, la conductivité thermique diminue quand la température augmente (à l'exception de l'eau et du glycérol).

- **Pour les gaz**, la conductivité thermique croît avec la température.

Remarque :

- La conductivité thermique d'un mélange ne varie pas linéairement avec la composition du mélange. Il est donc impossible de prévoir la conductivité thermique d'un alliage en connaissant sa composition et la conductivité des différents éléments constituant cet alliage. Il faut donc mesurer expérimentalement cette conductivité.

- La conductivité thermique des matériaux poreux augmente avec leur densité et avec la température.

- Un matériau humide est plus conducteur de la chaleur qu'un matériau sec. En particulier, lorsque les maçonneries d'un four sont terminées et avant de le mettre en exploitation, il convient de procéder à son séchage par une montée progressive en température qui permettra l'évaporation de l'eau.