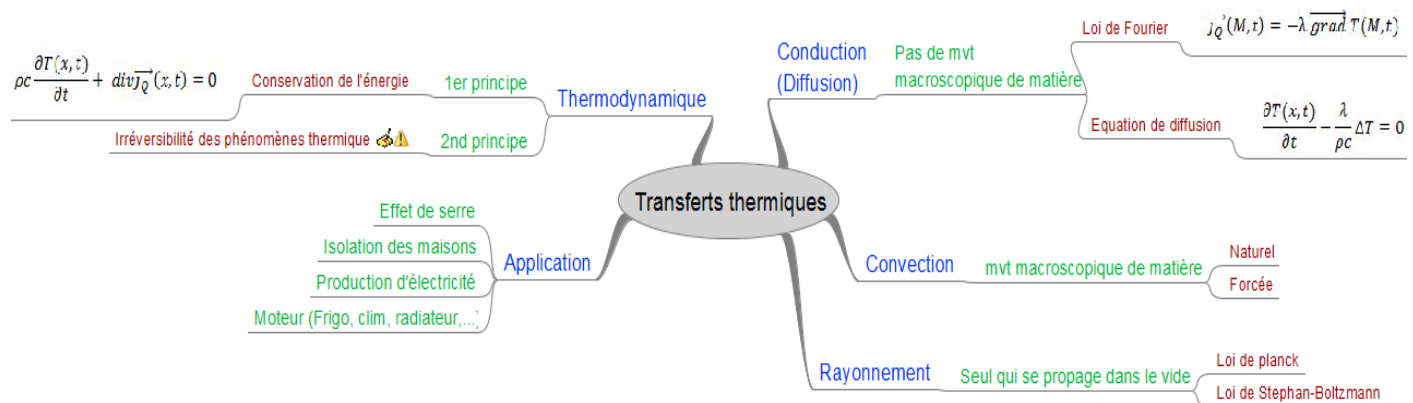


11-L- Transferts thermiques

Intro : Carte Mentale



Exemple du transport d'énergie thermique au voisinage d'un feu de bois. (Regroupe les 3 différents types de transfert thermique)

Transfert thermique connu depuis longtemps mais c'est Joseph Fourier qui fut le 1^{er} à établir une étude analytique de la conduction de la chaleur.

Conduction ou diffusion

Transfert d'énergie à travers un milieu matériel (solide ou fluide) sans transport macroscopique de matière.

Dans notre exemple ça se voit bien si on a une longue barre en fer dans le feu et une autre en aluminium. Si on prend l'autre extrémité de la barre elle sera chaude à cause de la conduction thermique. Celle en Fer sera plus chaude que celle en Aluminium. (Attention on va avoir comme question, pourquoi l'aluminium n'est pas chaud, je crois que c'est parce que c'est long à avoir un équilibre thermique (A vérifier).

Autre Exemple de la cuillère composée de différents matériaux dans une tasse de café (en acier elle va vite conduire la chaleur ce qui n'est pas le cas de la cuillère en plastique)

Un milieu dont la température n'est pas homogène est au moins le siège de phénomènes de transfert thermique par conduction.

Convection.

C'est un transfert thermique dû à un déplacement de matière : un fluide en mouvement transporte avec lui son énergie. Il peut exister en plus de la conduction dans les fluides.

Dans le cas du feu, l'air chaud va monter entraînant les fumées (on voit même à l'œil nu des sortes de vagues dues à la réfraction de la lumière à travers un milieu de densité différente et donc de n différents.)

Exemple : Un exemple banal de phénomènes de convection, à petite échelle, est fourni par les courants qui apparaissent quand on chauffe de l'eau dans une casserole : l'eau surchauffée du fond (car cette paroi est en contact avec la flamme), devenue moins dense, s'élève vers la surface du liquide ; parallèlement, l'eau de surface, plus froide et donc plus dense, s'abaisse. Il se forme ainsi des courants ascendants et des courants descendants qui sont reliés entre eux par des courants horizontaux. L'ensemble constitue des cellules de convection.

Le rayonnement.

Transfert thermique par rayonnement électromagnétique qui se fait sans transport de matière et même dans le vide (à la différence des 2 autres modes). Transfert mettant en jeu des phénomènes d'absorption et d'émission de photon.

Dans l'exemple du feu : Les radiations vont venir chauffer la peau même si on est un peu éloigné du feu.

Exemple : Le Soleil qui chauffe le Terre grâce au rayonnement.

Post Bac :

Bibliographie : J'intègre et H-prépa thermodynamique PC

1.3. Grandeurs conservées

Définir $\#_j$ et établir l'équation de conservation dans le cas de l'énergie thermique (1er ppe).
Généraliser : diffusion de particules, transport de charge électrique.

2. Un mode de transport : la diffusion

2.1. Loi de Fourier

Énoncé de la loi de Fourier, à présenter comme un modèle à l'ordre 1.

Modèle microscopique dans les métaux. ODG de λ . Signe de λ en lien avec le 2nd principe.

Lien avec le transport de charges et loi de Wiedemann-Franz.

La **loi de Wiedemann-Franz** est une relation entre la conductivité électrique et la conductivité thermique d'un métal
, **Manip** : conductoscope à cristaux liquides.

2.2. Équation de diffusion

Établir alors l'équation de diffusion thermique à partir de l'équation de conservation.

Généralité de l'équation de diffusion. Transparent avec les analogies : électromécanique

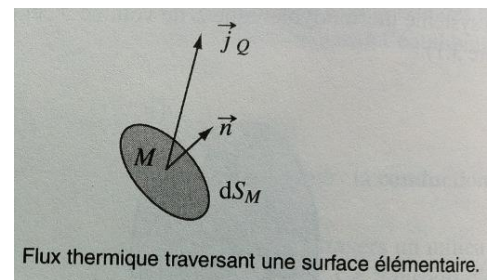
1. Application du 1^{er} principe : Bilan local d'énergie

On définit $\vec{j}_Q$ le vecteur densité de courant surfacique (W.m^{-2})

Soit une surface élémentaire dS_M orientée par choix par le vecteur normal $\vec{n}$

Le transfert thermique élémentaire à travers la surface entre les instant t et $t+dt$ s'écrit :

$$\delta Q = \vec{j}_Q(M, t) \cdot \vec{dS}_M \cdot dt$$



L'énergie se déplace dans la direction pointée par $\vec{j}_Q$. Et donc δQ (énergie transférée à travers la surface) > 0 lorsque l'énergie traverse la surface dans le sens de $\vec{n}$ et négatif dans le sens contraire.

Bilan local à 1 dimension : On suppose que la température ne dépend que d'une seule coordonnée d'espace x et du temps t . donc $T(x, t)$

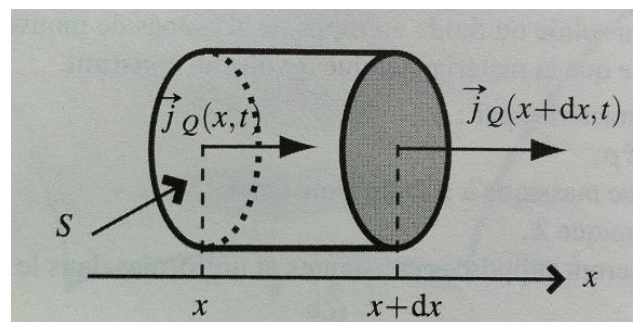
On effectue le bilan énergétique du cylindre de section S

Soit dU la variation d'énergie interne (avec c la capacité calorifique de l'élément) entre les instant t et $t+dt$

$$dU = \rho c S dx (T(x, t + dt) - T(t))$$

Au premier ordre

$$dU = \rho c S \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} dt dx$$



Le transfert thermique **reçu** par le système entre t et $t+dt$ se fait au niveau de la face en x et celle en $x+dx$

$$\begin{aligned} \delta Q_{ext \rightarrow \text{système}} &= \delta Q_x + \delta Q_{x+dx} \\ \delta Q_{ext \rightarrow \text{système}} &= \vec{j}_Q(x, t) \cdot \vec{dS}_x \cdot dt + \vec{j}_Q(x + dx, t) \cdot \vec{dS}_{x+dx} \cdot dt \end{aligned}$$

Attention la surface est orientée vers l'intérieur soit $\vec{dS}_x = S \vec{u}_x$ et $\vec{dS}_{x+dx} = -S \vec{u}_x$

$$\delta Q_{ext \rightarrow \text{système}} = (j_Q(x, t) - j_Q(x + dx, t)) \cdot S \cdot dt$$

Au premier ordre

$$\delta Q_{ext \rightarrow système} = (j_Q(x, t) - j_Q(x + dx, t)) \cdot S \cdot dt$$

$$\delta Q_{ext \rightarrow système} = - \frac{\partial j_Q(x, t)}{\partial x} dx \cdot S \cdot dt$$

D'après le 1^{er} principe de la thermodynamique

$$dU = \delta Q + \delta W$$

Mais en l'absence de travail mécanique (pression) $dU = \delta Q$

$$\begin{aligned} \rho c S \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} dt dx &= - \frac{\partial j_Q(x, t)}{\partial x} dx \cdot S \cdot dt \\ \rho c \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} &= - \frac{\partial j_Q(x, t)}{\partial x} \\ \rho c \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial j_Q(x, t)}{\partial x} &= 0 \end{aligned}$$

Dans le cas unidimensionnel $\frac{\partial j_Q(x, t)}{\partial x} = \text{div} \vec{j_Q}(x, t)$

Soit l'équation locale de conservation de l'énergie

$$\rho c \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} + \text{div} \vec{j_Q}(x, t) = 0$$

Cette équation se généralise au transport de particule ou de charge électrique (savoir faire la démo dans les 2 cas)

Remarque : Si jamais il y'a une source interne d'énergie on la note : $P_{prod} = P_V(x, t) S dx$ avec $P_V(x, t)$ la puissance volumique ($W \cdot m^{-3}$)

$$\rho c \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} + \text{div} \vec{j_Q}(x, t) = P_V(x, t)$$

2. Un mode de transport : La diffusion

La loi de Fourier :

Loi phénoménologique qui exprime une relation linéaire entre le vecteur densité de courant thermique et le gradient du champ de température $T(M, t)$

$$\vec{j_Q}(M, t) = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T(M, t)$$

avec λ : la conductivité thermique ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)

Remarque : En première approximation la conductivité thermique d'un métal est proportionnel à sa conductivité électrique (deux phénomènes dus aux électrons libres)

Le signe – de l'équation traduit le fait que l'énergie est transportée, conformément au second principe, des sources chaudes aux sources froides.

Elle décrit un phénomène irréversible puisque si on inverse la flèche du temps la densité de courant change de signe mais pas le gradient.

Validité de cette loi :

- Si le gradient de T est trop fort on perd la linéarité de la loi.
- Si le gradient thermique varie trop rapidement dans le temps, la relation cesse d'être instantanée, il y'a un retard dans l'établissement du flux thermique.
- Il existe des milieux anisotropes dont la conductivité thermique dépend de la direction de l'espace : par exemple le graphite a une conductivité 400 fois plus forte dans une direction parallèle aux couches atomiques que perpendiculairement à celle-ci.

matériau	λ à 300 K en $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
cuivre	$4,0 \times 10^2$
acier	$\simeq 50$
béton	$\simeq 1$
eau	$6,0 \times 10^{-1}$
air (sous $P = 10^5$ Pa)	$2,6 \times 10^{-2}$

Tableau 3.1 – Quelques valeurs de conductivité thermique

On a les mêmes limitations pour la loi de Fick et la loi d'Ohm

équation de diffusion thermique

En remplaçant $\vec{j}_Q(M, t) = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T(M, t)$ dans l'équation de conservation $\rho c \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} + \text{div} \vec{j}_Q(x, t) = 0$

On obtient l'équation de diffusion thermique

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} - \frac{\lambda}{\rho c} \Delta T = 0$$

Il n'existe des solutions analytiques à cette équation que dans des cas particuliers. En général, la résolution se fait numériquement. La solution de cette équation aux dérivées partielles dépend de constantes d'intégration qui sont déterminées par les conditions aux limites spatiales et temporelles. Si ces conditions traduisent toutes les données significatives du problème physique, la solution est unique.

Interprétation physique de la réaction

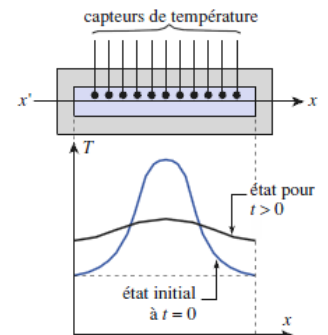
Exemple d'une tige isolée

Imaginons une tige métallique dont la longueur est très grande devant ses dimensions latérales. On peut admettre que la conduction est unidimensionnelle. Des capteurs, disposés régulièrement, permettent de suivre l'évolution de la température $T(x, t)$ (doc. 14).

Cette tige est chauffée en son milieu et, à l'instant $t = 0$, la répartition spatiale de la température a l'allure représentée sur le document 14. La tige est alors entièrement entourée d'un matériau isolant (milieu adiabatique, pas d'échange d'énergie avec l'extérieur). Quelle évolution peut-on prévoir ?

- La dérivée seconde $\frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2}$ est négative dans les zones les plus chaudes (équilibre instable sur le graphique). La dérivée $\frac{\partial T(x, t)}{\partial t}$ est donc négative, et la température y diminue. Inversement, elle augmente dans les zones froides.
- Le système étant isolé, son énergie est constante, la température moyenne est donc constante.

En conclusion, nous pouvons prévoir une uniformisation progressive de la température, à valeur moyenne constante.



Doc. 14. Diffusion dans une tige isolée. L'énergie totale se conserve, et la température s'uniformise.

Analogie thermo-électrique :

	conduction thermique	conduction électrique
grandeur transportée	énergie interne U	charge électrique q
densité de courant	$\vec{j}_Q$	$\vec{j}_{el}$
équation locale de conservation	$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div} \vec{j}_Q = \mathcal{P}_v$	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \vec{j}_{el} = 0$
loi phénoménologique locale	$\vec{j}_Q = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T$	$\vec{j}_{el} = -\gamma \overrightarrow{\text{grad}} V$
forme intégrale	$\Phi_{1 \rightarrow 2} = \frac{T_1 - T_2}{R_{th}}$	$I = \frac{V_1 - V_2}{R}$

Tableau 3.3 – Analogie entre les phénomènes de conduction thermique et de conduction électrique

Partie Péda.

1^{ère} STI2D et STL (Pour info)

Terminale S partie : Energie, matière et rayonnement

Transferts thermiques : conduction, convection, rayonnement. Flux thermique, résistance thermique. Caractéristiques thermiques des matériaux.	- Prévoir le sens d'un transfert thermique entre deux systèmes dans des cas concrets ainsi que leur état final. - Décrire qualitativement les trois modes de transferts thermiques en citant des exemples. - Réaliser expérimentalement le bilan thermique d'une enceinte en régime stationnaire. - Expliciter la dépendance entre la puissance rayonnée par un corps et sa température. - Citer le lien entre la température d'un corps et la longueur d'onde pour laquelle l'émission de lumière est maximale. - Mesurer l'énergie échangée par transfert thermique.
Transferts d'énergie entre systèmes macroscopiques Notions de système et d'énergie interne. Interprétation microscopique. Capacité thermique. Transferts thermiques : conduction, convection, rayonnement. Flux thermique. Résistance thermique. Notion d'irréversibilité. Bilans d'énergie.	Savoir que l'énergie interne d'un système macroscopique résulte de contributions microscopiques. Connaître et exploiter la relation entre la variation d'énergie interne et la variation de température pour un corps dans un état condensé. Interpréter les transferts thermiques dans la matière à l'échelle microscopique. Exploiter la relation entre le flux thermique à travers une paroi plane et l'écart de température entre ses deux faces. Établir un bilan énergétique faisant intervenir transfert thermique et travail.

Déroulement : Sur une séance de 1h30

1^{ème} partie : Plein de petites expériences (20 min)

2^{ème} partie : Expérience avec les mains (tiré de l'activité 1 page 368) (10min)

3^{ème} partie : Démarche expérimentale (30 min)

4^{ème} partie : Tache complexe ou exercice sur le double vitrage (20 min)

1^{ère} partie : Plein de petites expériences

Objectif : - Etudier et interpréter les transferts thermiques dans la matière à l'échelle microscopique.

Pré-requis : Etude de la lumière (aspect ondulatoire et corpusculaire de la lumière énergie d'un photon $E=h\nu$)

Matériels :

- Radiateur électrique (convection)
- du Soleil et un coin d'ombre (rayonnement)
- Bassine d'eau très chaude (50°C) et un tube en cuivre (conduction)

TP tournant : A chaque palliasse se trouve une feuille + consigne + matériel

Le Soleil et l'ombre	Le radiateur électrique	Le cuivre dans l'eau
Consigne : Placez-vous derrière le panneau à l'abri du Soleil durant 1 min puis faite de même un niveau d'une partie éclairée par le Soleil Question : A quel endroit fait-il le plus chaud ? pourquoi ? Si pas de Soleil : remplacer par une photo avec givre à l'ombre et pas au Soleil	Consigne : Placez votre main droite à 50 cm au dessus du radiateur et votre main gauche au niveau du radiateur mais décalé de 50 cm à gauche Question : Quelle est la main qui ressent le plus de chaleur ? et pourquoi ?	Consigne : Placer l'une des extrémités du tube en cuivre dans l'eau chaude. Attendre quelques minutes et touchez l'extrémité immergée du tube Question : Que constaté vous ? pourquoi ?

Nom de la manipulation (ex : Le Soleil et l'ombre, Le radiateur électrique ou encore Le cuivre dans l'eau)

Consigne : Essayer d'émettre une hypothèse et expliquer ce qu'il se passe au niveau microscopique à l'aide d'un schéma

Nom du phénomène :

Donner aux élèves la définition des différents transferts d'énergie et leur demander d'attribuer le nom du phénomène à chaque expérience, (après avoir vérifié ses hypothèses)

Doc 1 page 372 Bordas

Le transfert thermique par **convection** nécessite un milieu matériel. L'énergie est transportée par des mouvements de matière, au sein d'un gaz ou d'un liquide.

Le transfert thermique par **conduction** nécessite un milieu matériel. L'énergie est transportée de proche en proche, généralement dans un solide, sans déplacement de matière.

Le transfert thermique par **rayonnement** ne nécessite pas de milieu matériel. L'énergie est transportée par des ondes électromagnétiques.

2^{ème} partie : Expérience avec les mains (tiré de l'activité 1 page 368)

Objectif :

- Appréhender la notion d'irréversibilité
- Sens du transfert thermique (de la source chaude à la source froide)

Matériels :

- Bassine d'eau chaude et une d'eau froide (avec des glaçons) + une bassine d'eau à température ambiante au milieu/ paille

Consigne : Mettre une main dans la bassine de gauche et une dans celle de droite pendant quelques secondes. Retirer et plonger simultanément les deux mains dans la bassine du milieu.

Que constatez-vous ?

Dans quel sens se transmet l'énergie thermique ?

Conclusion : Le transfert thermique ne se transmet spontanément que dans un sens, de la source chaude vers la source froide. Et cela correspond à un transfert d'énergie qui est irréversible.

3^{ème} partie : Démarche Expérimentale

1. Une activité expérimentale pour laquelle les élèves doivent proposer un protocole et le mettre en œuvre en fonction du matériel disponible. Ils devront réaliser les mesures et répondre à la question posée.



On entend dire souvent quand on marche pieds nus que: « *Le carrelage c'est froid par rapport à du parquet* ».

Pourtant si ces deux éléments se trouvent côte à côte dans une même pièce, ils auront la même température, non ?

- **Comment expliquer cette sensation de froid du carrelage par rapport au parquet ?**

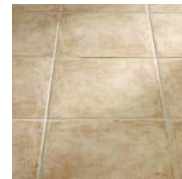
Peut-on vérifier cela expérimentalement ?

- Décrire un protocole expérimental, et le mettre en œuvre à l'aide du matériel fourni.

🔧 Présentation du matériel nécessaire

Matériel disponible :

Un carreau et une lame de parquet de même épaisseur et de même surface.

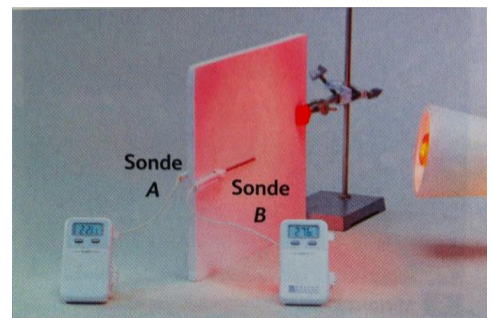


Deux thermomètres numériques.



Deux récipients identiques.

De l'eau et un dispositif de chauffage d'eau.



Ou alors on peut aussi proposer l'expérience du Nathan page 366
Avec une lampe infrarouge

On veut ici mettre en évidence par un montage très simple les différences de conductivité thermique des matériaux. Un carreau a une conductivité thermique plus élevée que la lame d'un parquet en bois. Le but n'est pas de calculer les conductivités thermiques mais juste de montrer qu'un récipient d'eau chaude refroidira plus vite si il est posé sur du carrelage plutôt que sur du parquet. On peut ensuite faire chercher sur internet les valeurs de conductivités thermiques de ces matériaux.

On peut également montrer avec un thermomètre infrarouge qu'avant le début de l'expérience le carreau et le parquet sont à la même température.



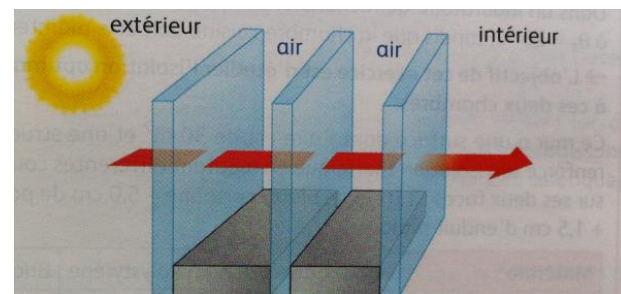
$$\lambda_{\text{bois}} = 0,15 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$\lambda_{\text{carrelage}} = 1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

4ème partie : Tache complexe ou exercice sur le double vitrage

D'après nathan page 379

Enoncé : Vous êtes ingénieur en génie thermique et vous travaillez dans le bâtiment. Le chef de projet vous demande quel type de vitre il doit utiliser pour isoler une des pièces du bâtiment. La température de la pièce à isoler est de $\theta_{\text{pièce}} = 20^\circ \text{C}$ tandis que la température de l'extérieur est de $\theta_{\text{extérieur}} = 5^\circ \text{C}$.



Ce dernier hésite entre 3 configurations :

- Configuration A : le simple vitrage de 4 mm d'épaisseur (25 euros/m²)
- Configuration B : le double vitrage : 4 mm de verre + 12 mm d'air + 4 mm de verre (45 euros/m²)
- Configuration C : le triple vitrage : 4 mm de verre + 12 mm d'air + 4 mm de verre + 12 mm d'air + 4 mm de verre (101 euros/m²).

Données : conductivités thermiques (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) du verre $\lambda_{\text{verre}} = 1,2$; de l'air $\lambda_{\text{air}} = 0,0262$; aire de la surface des fenêtres $S = 4 \text{ m}^2$.

A Expression du flux thermique

À travers une paroi plane Σ d'aire S et d'épaisseur e , constituée d'un matériau de conductivité thermique λ , le flux thermique est proportionnel à l'écart de température entre les deux faces A et B de la paroi, le coefficient de proportionnalité étant $\lambda \frac{S}{e}$ (figure 16) :

$$\Phi = \lambda \frac{S}{e} (T_A - T_B)$$

$$\Phi = \lambda \frac{S}{e} \Delta T$$

λ en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 S en m^2
 e en m
 $T_A, T_B, \Delta T$ en kelvin (K)
 Φ en watt (W)



en $\text{kWh/m}^2/\text{an}$ dans la réalité, mais pour simplifier les calculs on va considérer que ces valeurs sont valable en kW, soit pour le flux thermique ϕ

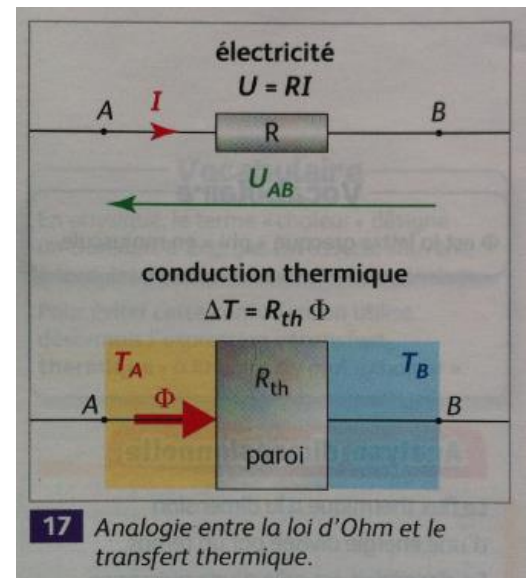
B Résistance thermique

• Entre les bornes A et B d'un conducteur électrique de résistance R soumis à une tension électrique U_{AB} , un courant électrique d'intensité I circule. La loi d'Ohm s'écrit :

$$U_{AB} = RI.$$

• La relation $T_A - T_B = \frac{e}{\lambda S} \Phi$ est analogue à la loi d'Ohm : $T_A - T_B$ joue le rôle de U_{AB} , Φ joue le rôle de I . Par analogie, on définit le terme $\frac{e}{\lambda S}$ comme une résistance thermique, notée R_{th} (figure 17).

Dans cet exercice on néglige les transferts thermiques par rayonnement.



Question : Quelle type de vitre utiliser pour avoir le meilleur qualité prix possible ?

Résolution :

- Calcul de la résistance thermique :

$$R_{th\ verre} = \frac{e}{\lambda S} = \frac{0.004}{1.2 * 4} = 0.000833 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad R_{th\ air} = \frac{e}{\lambda S} = \frac{0.012}{0.0262 * 4} = 0.1145 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

- Calcul d flux thermique pour chaque vitre :

$$\phi_{simple} = \frac{T_A - T_B}{R_{th\ verre}} = \frac{15 + 273.15}{0.000833} = 346 \text{ kW}$$

$$\phi_{double} = \frac{T_A - T_B}{2 \times R_{th\ verre} + R_{th\ air}} = 2.4 \text{ kW}$$

$$\phi_{triple} = \frac{T_A - T_B}{3 \times R_{th\ verre} + 2 \times R_{th\ air}} = 1.2 \text{ kW}$$

Le meilleur rapport qualité prix est le double vitrage

Conclusion :