BTS 2M

Cours de physique 14 :

Transfert Thermique

SAINTE CROIX
SAINT EUVERTE

ORLÉANS

TABLE DES MATIERES

PARTIE COURS

A TRANSFERTS THERMIQUES PAR CONDUCTION

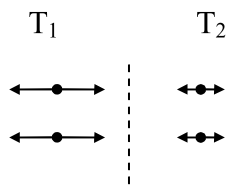
Le mode de transfert thermique par conduction est caractéristique des solides. Dans les fluides, il est souvent négligeable par rapport à la convection.

On se place en régime permanent.

I. LE PHENOMENE DE CONDUCTION

- Le transfert thermique par conduction se produit lorsque la température T n'est pas uniforme. La quantité transférée est l'énergie ou la chaleur. Il n'y a pas de transfert de matière.

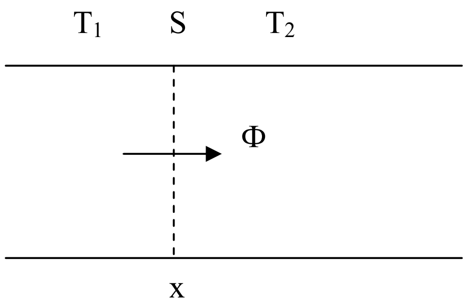
Le transfert thermique est du à l'agitation microscopique du matériau.



La vibration des particules à la température T_1 est plus importante que celle des particules à la température T_2 et $T_1 > T_2$. Les particules à fortes vibrations vont avoir tendance à céder une partie de leur énergie aux particules voisines. Cette transmission des vibrations de proche en proche est à l'origine du phénomène de transfert thermique par conduction.

- **Flux thermique**

fig 1



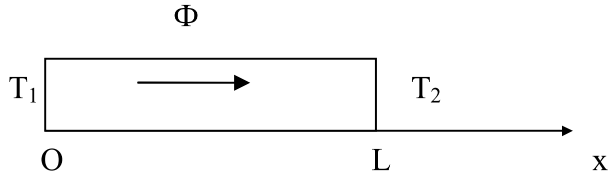
Soit Φ le flux thermique à travers la surface S.
Φ correspond à la quantité d'énergie thermique traversant par unité de temps la surface S ou au débit d'énergie thermique à travers S ou encore à la puissance thermique traversant S.
Φ s'exprime en W

II.TRANSFERT THERMIQUE

1. Expression du flux thermique

Considérons un matériau de section S, de longueur L et de conductivité thermique λ auquel on impose les températures T_1 et T_2 à ses 2 extrémités.
La surface latérale est parfaitement isolée.

fig 2



$T_1 > T_2$

Le flux thermique Φ à travers le barreau vérifie :

$$\Phi = \frac{\lambda S}{L}\left(T_1 - T_2\right)$$

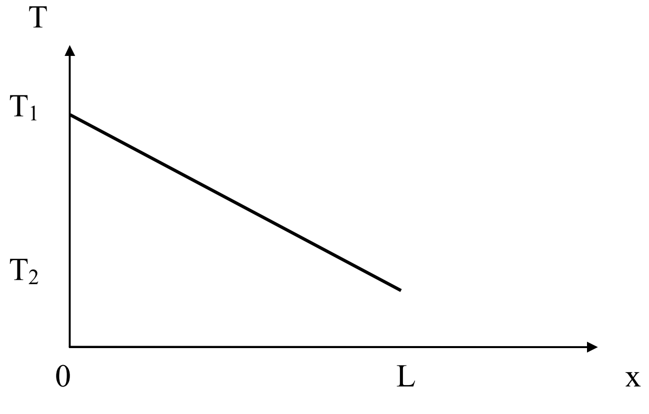
avec

- Φ : flux thermique (W)
- λ : conductivité thermique (W m^{-1} K^{-1})
- L : longueur (m)
- S : section (m^2)
- T_1 et T_2 : températures des sections d'entrée et de sortie (K)

Ce flux est indépendant de x.

Dans le matériau, le profil de température est linéaire : $T(x) = \frac{T_2 - T_1}{L}\, x + T_1$

fig 3



2. Conductivité thermique de quelques matériaux

- Conductivité thermique

matériau	λ (en W m^{-1} K^{-1})
eau	0,6
cuivre	390
acier	16
verre	$\approx$ 1
bois	$\approx$ 0,25
air	0,026

dans les conditions ordinaires de température et de pression

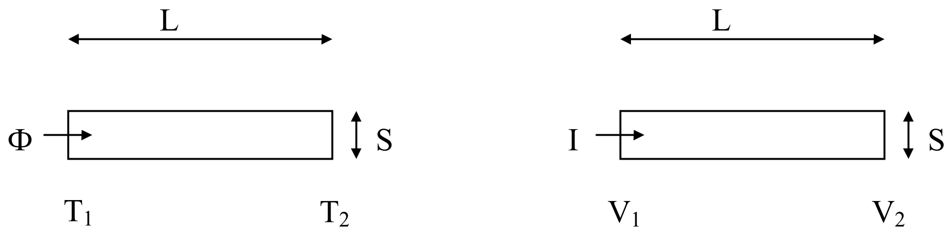
On remarque que les métaux sont d'excellents conducteurs thermiques.
L'air est un isolant thermique (en l'absence de convection)

Remarque : la conductivité thermique λ est aussi notée K.

3. Résistance thermique

Soit un barreau et une résistance électrique (voir figure 4) :

fig 4



$$\Phi = \frac{\lambda S}{L}\left(T_1 - T_2\right) \qquad\qquad I = \frac{1}{R}\left(V_1 - V_2\right)$$

L'analogie conduit à la notion de résistance thermique :

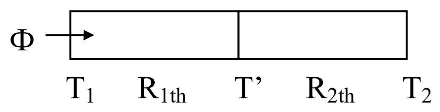
$$\Phi = \frac{\lambda S}{L}\left(T_1 - T_2\right) = \frac{1}{R_{th}}\left(T_1 - T_2\right) \qquad R_{th} = \frac{L}{\lambda S} \quad \text{avec} \quad \left|\begin{array}{l} R_{th} \text{ en } W^{-1}\,K \\ \lambda \text{ en } W\,m^{-1}\,K^{-1} \\ L \text{ en } m \\ S \text{ en } m^2 \end{array}\right.$$

Au flux thermique correspond l'intensité et à la température le potentiel.
Comme en électricité, on peut associer des résistances thermiques en série ou en parallèle pour calculer des flux thermiques.

- Association en série

fig 5

R_{th} sur l'ensemble $\qquad T_1 > T_2$



$$\Phi = \frac{T_1 - T'}{R_{1th}} = \frac{T' - T_2}{R_{2th}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{1th} + R_{2th}}$$

$$\Phi = \frac{T_1 - T_2}{R_{th}}$$

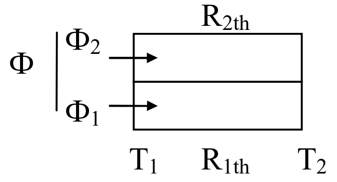
Cette association vérifie bien : $R_{th} = R_{1th} + R_{2th}$

- Association en parallèle

fig 6

R_{th} sur l'ensemble

$T_1 > T_2$



$$\Phi_1 = \frac{T_1 - T_2}{R_{1th}} \qquad \Phi_2 = \frac{T_1 - T_2}{R_{2th}} \qquad \Phi = \Phi_1 + \Phi_2 = \frac{T_1 - T_2}{R_{1th}} + \frac{T_1 - T_2}{R_{2th}} = (T_1 - T_2)\left(\frac{1}{R_{1th}} + \frac{1}{R_{2th}}\right)$$

$$\Phi = \frac{T_1 - T_2}{R_{th}}$$

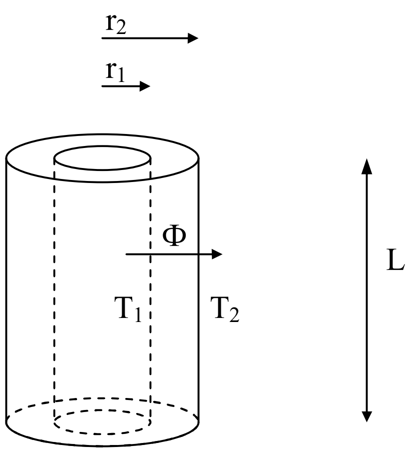
Cette association vérifie bien : $\frac{1}{R_{th}} = \frac{1}{R_{1th}} + \frac{1}{R_{2th}}$

III.TRANSFERT THERMIQUE DANS UN TUBE

Soit un tube de longueur L, de rayon intérieur r_1 et de rayon extérieur r_2.

Le flux thermique traversant le tube est égale à : $\Phi = \frac{1}{R}\left(T_1 - T_2\right)$ avec $R = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{\lambda \, 2 \, \pi \, L}$

fig 7



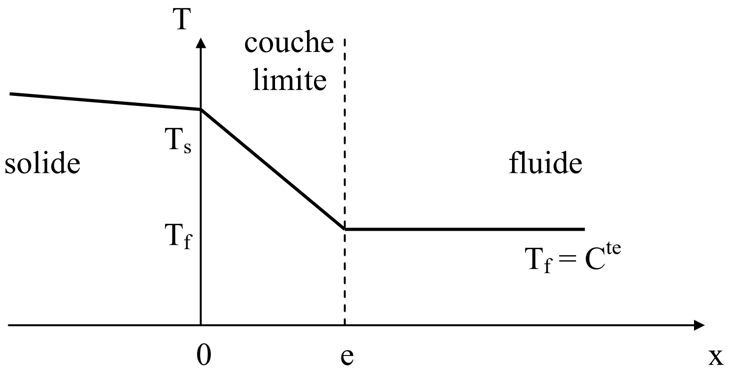
B TRANSFERTS THERMIQUES PAR CONVECTION

Le mode de transfert thermique par conduction est caractéristique des solides. Dans les fluides, il est souvent négligeable par rapport à la convection

I. LE PHENOMENE DE CONVECTION

Le transfert thermique par convection se traduit par un déplacement macroscopique de matière.
Le cas de figure le plus fréquent est celui d'un solide (immobile) en contact avec un fluide en mouvement.
Au niveau de la paroi, le solide a pour température T_s.
Schématisons les phénomènes à l'interface solide fluide. Le fluide étant visqueux, une couche limite d'épaisseur e délimite une zone d'écoulement laminaire. Au-delà de la couche limite, l'écoulement est turbulent et l'homogénéité des propriétés physiques pour ce régime conduit à une température T_f du fluide constante.
La figure 1 présente une modélisation linéaire du profil de température.

fig 1



représentation dans le cas où $T_s > T_f$

II.FLUX THERMIQUE

1. Expression du flux thermique

Considérons une paroi de surface S à la température T_s en contact avec un fluide à la température T_f.

Le flux thermique Φ à travers la paroi vérifie $\Phi = h\,S\,(T_s - T_f)$

$$\Phi = h\,S\,(T_s - T_f) \qquad \text{avec} \qquad \left|\begin{array}{l} \Phi : \text{flux thermique (W)} \\ h : \text{coefficient d'échange (W m}^{-2}\ \text{K}^{-1}) \\ S : \text{surface (m}^2) \\ T_s : \text{température du solide en surface (K)} \\ T_f : \text{température du fluide (K)} \end{array}\right.$$

Le coefficient d'échange h est aussi appelé coefficient de transfert convectif ou encore coefficient de transfert thermique (en W m^{-2} K^{-1})

2. Valeurs de h

h dépend du fluide, de la nature de l'écoulement.
Les valeurs de h sont très variables (de 1 à 100000 W m^{-2} K^{-1})

3. Résistance thermique associée à la convection

Il est possible de se ramener à un problème de conduction en utilisant la résistance thermique R_{th}.

$$\Phi = h\,S\,(T_1 - T_2) = \frac{1}{R_{th}}\,(T_1 - T_2) \qquad R_{th} = \frac{1}{h\,S} \qquad \text{avec} \qquad \left|\begin{array}{l} R_{th} \text{ en W}^{-1}\ \text{K} \\ h \text{ en W m}^{-2}\ \text{K}^{-1} \\ S \text{ en m}^2 \end{array}\right.$$

Remarque : le flux thermique par convection est assimilable à un flux thermique par conduction à travers la couche limite d'épaisseur e et de conductivité thermique λ_f (λ_f : conductivité thermique du fluide)

$$\Phi = \frac{\lambda_f\,S}{e}\,(T_1 - T_2) = h\,S(T_1 - T_2) \quad \text{et} \quad \frac{\lambda_f}{e} = h$$

C TRANSFERTS THERMIQUES PAR RAYONNEMENT

Lorsqu'elles sont possibles, la conduction et la convection sont plus efficaces que le rayonnement et souvent on néglige celui-ci. Cependant, si nous sommes à haute température et /ou dans le vide alors le rayonnement devient le principal mode de transfert thermique. Il est possible de prévoir et modéliser ce rayonnement thermique

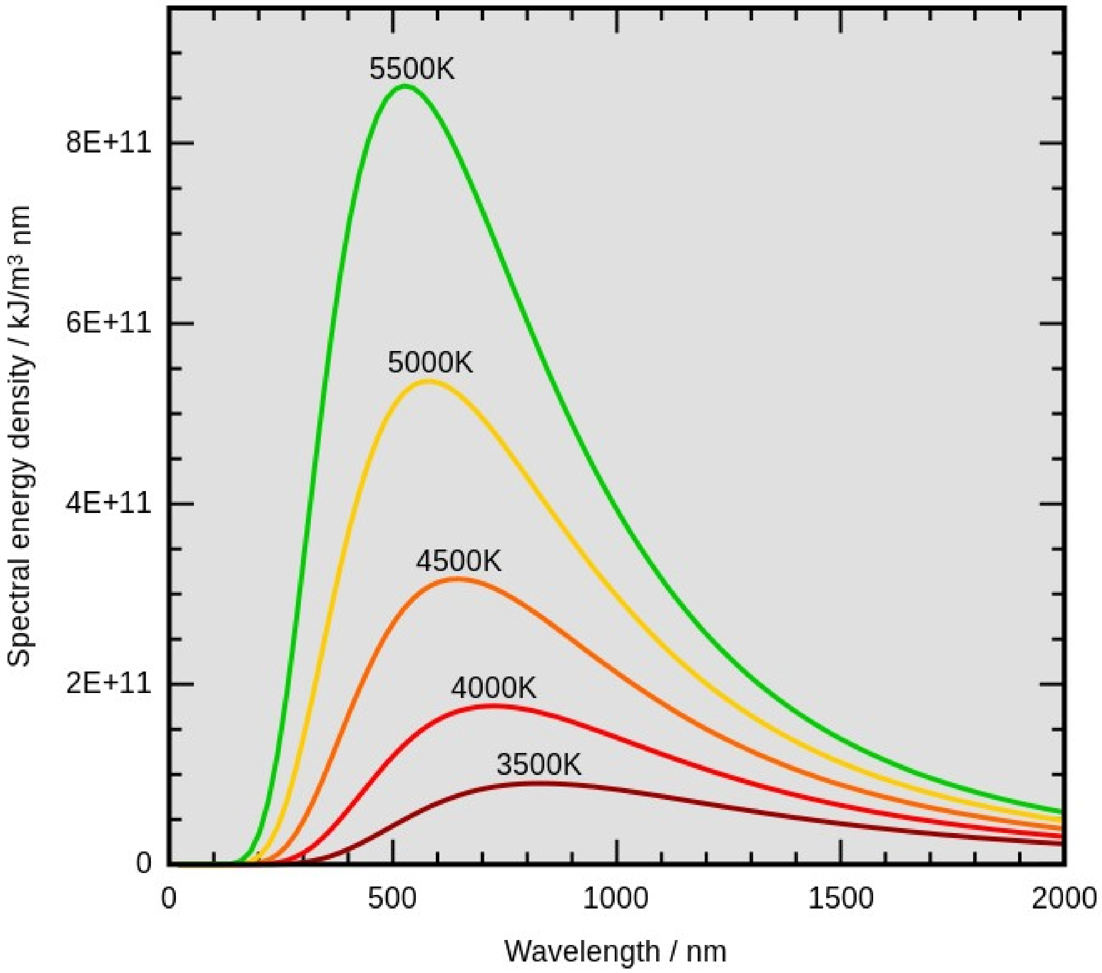
1. Loi de Wien

Considérons un corps noir possédant une température non nul, celui-ci va rayonner autour d'une longueur d'onde donnée par la loi de Wien :

$$\lambda_{max} \,.\, T = k$$

avec :
- λmax la longueur d'onde pour laquelle la densité d'énergie est la plus forte
- T la température en Kelvin
- k, la constante de Wien, k = 2,9.10-3mK

L'allure spectrale dépend également de la température :



La puissance émise est alors :

$$P_\lambda = U_\lambda \,.\, \Delta\lambda$$

Avec $U\lambda$ la densité spectrale d'énergie et $\Delta\lambda$ la plage de longueur d'onde étudiée.

2. Loi de Stefan-Boltzmann

La puissance totale émise par la source suit la loi de Stefan soit :

$$P = e\,\sigma\,A\,T^4$$

Avec :

- P la puissance émise par la source (W)
- e l'émissivité
- σ la constante de Stefan, $\sigma = 5{,}67\ 10^{-8}\ W.m^2K^{-4}$
- A, l'aire de la source (m^2)

La valeur de e, l'émissivité dépend de la nature du matériau et de sont état de surface.
e est compris entre 0 et 1.
Pour le corps noir, e = 1.

Considérons une paroi de surface S à la température T_s en contact avec un fluide à la température T_f.

Le flux thermique Φ à travers la paroi vérifie $\Phi = h\,S\,(T_s - T_f)$

$\Phi = h\,S\,(T_s - T_f)$ avec

- Φ : flux thermique (W)
- h : coefficient d'échange ($W\ m^{-2}\ K^{-1}$)
- S : surface (m^2)
- T_s : température du solide en surface (K)
- T_f : température du fluide (K)

3. Modèle du corps gris

Les corps réels ne sont pas de parfaits corps noirs. Le **modèle du corps gris** introduit l'**émissivité (ϵ)** pour ajuster la loi de Stefan-Boltzmann.

- L'**émissivité (ϵ)** est un coefficient sans dimension compris entre 0 et 1.

  $\epsilon = 1$: Corps noir parfait.

  $\epsilon = 0$: Réflecteur parfait.

  $0 < \epsilon < 1$: Corps gris.

- La puissance de rayonnement réelle émise (P) est :

$$\mathbf{P = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4}$$

Voici quelques valeurs typiques d'émissivité :

Matériau/Surface	Émissivité ϵ
Surface polie (Aluminium, Cuivre)	Très faible (environ 0,02 à 0,05)
Peinture blanche, papier	Élevée (environ 0,8 à 0,9)
Oxydes, surfaces rouillées	Élevée (environ 0,6 à 0,8)

➔ Pour **réduire les pertes par rayonnement**, on utilise des surfaces avec une **faible émissivité** (surfaces polies, films métalliques…)

Application : La température à la surface de la Terre

On considère que le soleil se comporte comme un corps noir à la température T_s et que la terre se comporte comme un corps noir à la température T_0.

I – Sans tenir compte de l'atmosphère

1°) Quelle est l'expression de la puissance totale rayonnée par le soleil P_s en fonction de σ, T_s et R_s ?

2°) Quelle est l'expression de la puissance totale reçue par la terre P_T en fonction de σ, T_s, R_s, R_t et d ?

3°) Déterminer la température à la surface du soleil T_s sachant que le maximum du spectre qu'il émet se situe à $\lambda_m = 500nm$. Puis T_{e1} celle de la terre sans tenir compte de l'atmosphère.

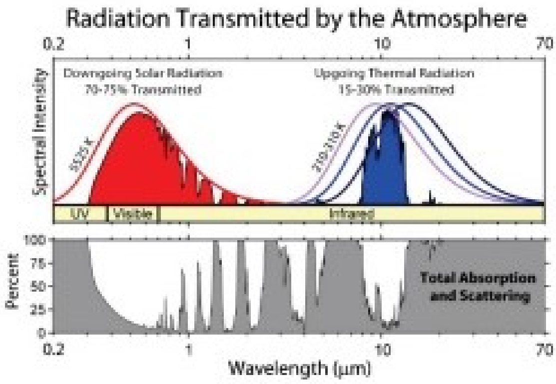
II – En tenant compte de l'atmosphère et de l'Albédo

5°) En réalité le rayonnement émis par la terre est piégé par l'atmosphère et constitue ce qu'on appelle l'effet de serre. L'atmosphère laisse passer le rayonnement solaire qui est transparente dans le visible mais absorbe l'infrarouge. On peut considérer l'atmosphère comme un corps noir qui émet dans l'infrarouge.
Déterminer la température de surface de la terre T_{e1} en tenant compte de l'atmosphère. Conclure.

6°) La terre réfléchit une partie de l'énergie qu'elle reçoit de la part du soleil et absorbe le reste. La fraction réfléchie s'appelle l'albédo qu'on note A et dont on donne la valeur numérique A=0,31.
Déterminer la température de surface de la terre T_{e2} en tenant compte de l'atmosphère. Conclure.

III – Amélioration du modèle

7°) En s'aidant du document suivant, comment pourrait-on améliorer le modèle ?



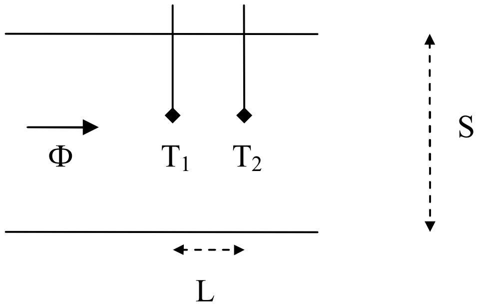
8°) Pourquoi le rejet par les activités humaines de méthane et de CFC dont la bande d'absorption est dans l'intervalle 8-12 μm doit-il être limité au maximum ?

Données :

- Rayon du soleil : $R_s = 700\,000\ km$
- Rayon de la terre : $R_T = 6400\ km$
- Distance terre-soleil : $d = 1ua = 150\ 10^6\ km$
- Constante de Stefan : $\sigma = 5{,}67\ 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$
- La loi de Wien : $\lambda_{max} T = 2898\ \mu m.K$

PARTIE EXERCICE

EXERCICE 1 : CONDUCTIBILITE THERMIQUE
Un matériau de surface de base S est traversé par un flux thermique Φ.



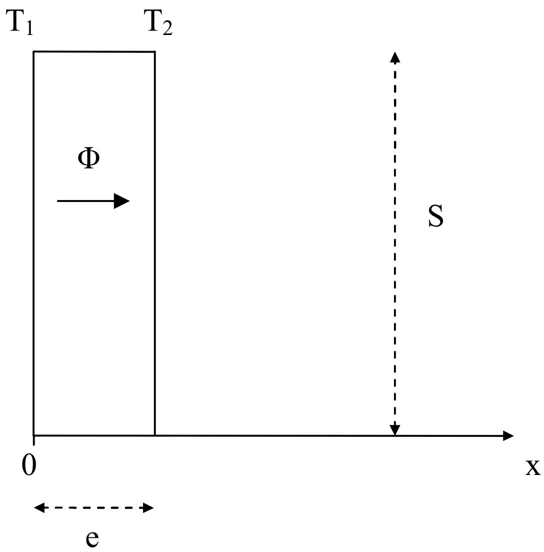
2 sondes mesurent les températures T_1 et T_2 en deux points distants de L.
On désigne par λ la conductibilité thermique du matériau.

1) Exprimer λ en fonction de Φ, S, L, T_1 et T_2
2) Calculer λ
3) Le matériau est-il plutôt un isolant ou un bon conducteur thermique ?

Données : L = 8 mm S = 100 cm^2 T_1 = 40,2 °C T_2 = 28,2 °C
Φ = 0,6 W

EXERCICE 2 : MUR
Soit un mur de surface S et d'épaisseur e.
Il est constitué de brique de conductivité thermique λ.
T_1 et T_2 sont les températures des 2 faces.
Le mur est traversé par un flux thermique Φ.

1) Exprimer la résistance thermique du mur R_{th} en fonction de λ, e et S.
Exprimer le flux thermique Φ en fonction de R_{th}, T_1 et T_2.
2) Calculer R_{th} et Φ.
3) Indiquer comment évolue Φ si l'on double la surface du mur.
4) Représenter schématiquement le profil de température dans le mur.



Données : T_1 = 20 °C T_2 = 14 °C S = 10 m^2
λ = 0,5 W $m^{-1}K^{-1}$ e = 15 cm

EXERCICE 3 : MUR ISOLANT

Le mur est maintenant constitué de 2 rangées de brique de conductivité thermique λ et d'épaisseur e séparées par un matériau isolant de conductivité thermique λ' et d'épaisseur e'. Il a pour surface S.

T_1 et T_2 sont les températures des 2 faces.

Le mur est traversé par un flux thermique Φ.

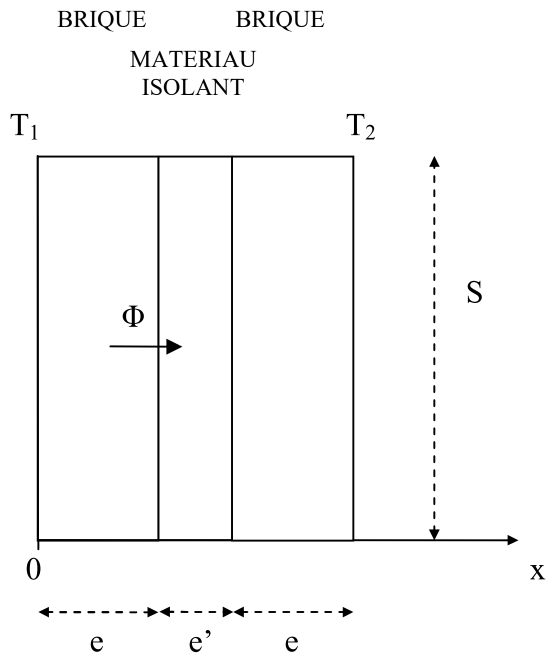
1) Exprimer la résistance thermique du mur R_{th} en fonction de λ, λ', e, e' et S.

Exprimer le flux thermique Φ en fonction de R_{th}, T_1 et T_2.

2) Calculer R_{th} et Φ.

3) Indiquer comment évolue Φ si l'on double la surface du mur.

4) Représenter schématiquement le profil de température dans le mur.



Données :	$T_1 = 20$ °C	$T_2 = 14$ °C	$S = 10\ m^2$
	$\lambda = 0{,}5\ W\ m^{-1}K^{-1}$	$e = 15$ cm	
	$\lambda' = 0{,}05\ W\ m^{-1}\ K^{-1}$	$e' = 10$ cm	

EXERCICE 4 : PERTES THERMIQUES A TRAVERS UN MUR

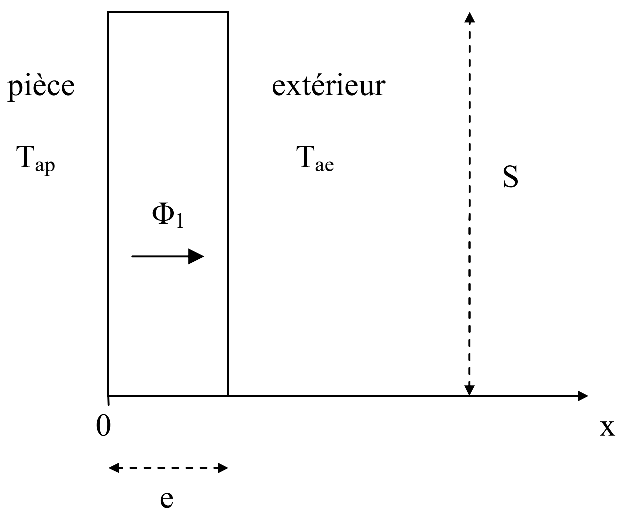
Soit un mur en brique d'épaisseur e, de surface S et de conductivité thermique λ.

Le mur se trouve entre une pièce à la température T_{ap} et l'extérieur à la température T_{ae}.

On désigne par h_{ap} le coefficient d'échange entre le mur et l'air de la pièce et par h_{ae} le coefficient d'échange entre le mur et l'air extérieur.

Le mur est traversé par un flux thermique Φ_1.

R_1 représente la résistance thermique du mur en tenant compte des phénomènes de conduction et de convection



1) Exprimer R_1 en fonction de λ, e, h_{ap}, h_{ae} et S.

Exprimer le flux thermique Φ_1 en fonction de R_1, T_{ap} et T_{ae}.

2) Calculer R_1 et Φ.

Données :	$T_{ap} = 20$ °C	$T_{ae} = 3$ °C	$S = 10$ m^2
	$\lambda = 0{,}5$ W m^{-1}K^{-1}	e = 15 cm	
	$h_{ap} = 10$ W m^{-2} K^{-1}	$h_{ae} = 18$ W m^{-2} K^{-1}	

EXERCICE 5 : PERTES THERMIQUES A TRAVERS UN MUR ISOLANT

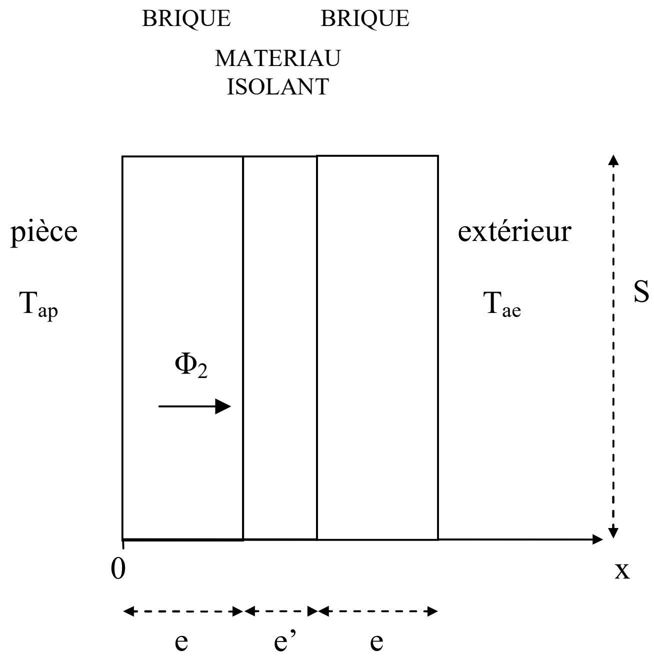
Soit un mur constitué de 2 rangées de brique de conductivité thermique λ et d'épaisseur e séparées par un matériau isolant de conductivité thermique λ' et d'épaisseur e'. Il a pour surface S.

Le mur se trouve entre une pièce à la température T_{ap} et l'extérieur à la température T_{ae}.

On désigne par h_{ap} le coefficient d'échange entre le mur et l'air de la pièce et par h_{ae} le coefficient d'échange entre le mur et l'air extérieur.

Le mur est traversé par un flux thermique Φ_2.

R_2 représente la résistance thermique du mur en tenant compte des phénomènes de conduction et de convection



1) Exprimer R_2 en fonction de λ, e, λ', e', h_{ap}, h_{ae} et S.

Exprimer le flux thermique Φ_2 en fonction de R_2, T_{ap} et T_{ae}.

2) Calculer R_2 et Φ_2.

Données :	$T_{ap} = 20$ °C	$T_{ae} = 3$ °C	$S = 10$ m^2
	$\lambda = 0{,}5$ W m^{-1}K^{-1}	e = 15 cm	
	$\lambda' = 0{,}05$ W m^{-1} K^{-1}	e' = 10 cm	
	$h_{ap} = 10$ W m^{-2} K^{-1}	$h_{ae} = 18$ W m^{-2} K^{-1}	

EXERCICE 6: PERTES THERMIQUES A TRAVERS UNE VITRE

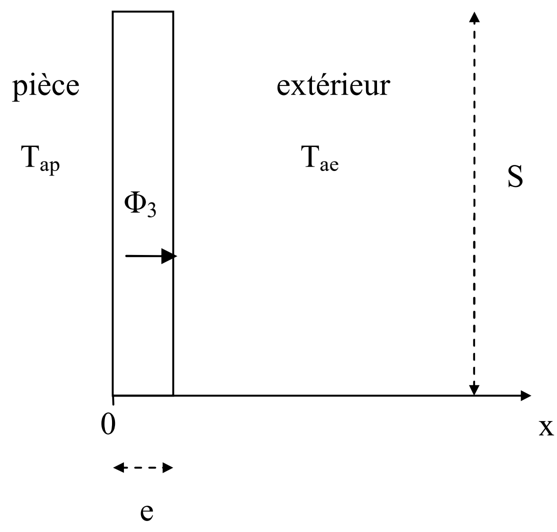
Soit une vitre d'épaisseur e, de surface S et de conductivité thermique λ.

La vitre se trouve entre une pièce à la température T_{ap} et l'extérieur à la température T_{ae}.

On désigne par h_{ap} le coefficient d'échange entre le mur et l'air de la pièce et par h_{ae} le coefficient d'échange entre le mur et l'air extérieur.

La vitre est traversé par un flux thermique Φ_3.

R_3 représente la résistance thermique de la vitre en tenant compte des phénomènes de conduction et de convection



1) Exprimer R_3 en fonction de λ, e, h_{ap}, h_{ae} et S.

Exprimer le flux thermique Φ_3 en fonction de R_3, T_{ap} et T_{ae}.

2) Calculer R_3 et Φ_3.

Données :	$T_{ap} = 20$ °C	$T_{ae} = 3$ °C	$S = 1\ m^2$
	$\lambda\ = 1{,}2\ W\ m^{-1}K^{-1}$	$e\ = 3$ mm	
	$h_{ap}\ = 10\ W\ m^{-2}\ K^{-1}$	$h_{ae}\ = 18\ W\ m^{-2}\ K^{-1}$	

EXERCICE 7 : PERTES THERMIQUES A TRAVERS UN DOUBLE VITRAGE

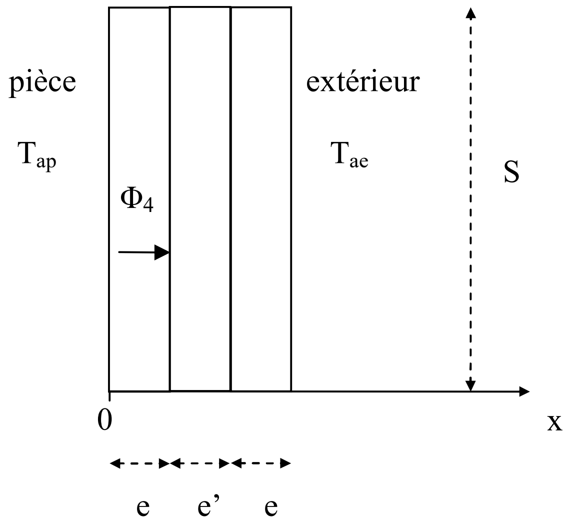
Un double vitrage est formé de 2 vitres identiques d'épaisseur e, de surface S et de conductivité thermique λ séparées par une épaisseur e' d'air de conductivité thermique λ'.

On néglige les phénomènes de convection pour l'air emprisonné entre les 2 vitres.

Le double vitrage se trouve entre une pièce à la température T_{ap} et l'extérieur à la température T_{ae}.

On désigne par h_{ap} le coefficient d'échange entre le mur et l'air de la pièce et par h_{ae} le coefficient d'échange entre le mur et l'air extérieur.

Le double vitrage est traversé par un flux thermique Φ_4.



R_4 représente la résistance thermique de la vitre en tenant compte des phénomènes de conduction et de convection

1) Exprimer R_4 en fonction de λ, e, λ', e', h_{ap}, h_{ae} et S.

Exprimer le flux thermique Φ_4 en fonction de R_4, T_{ap} et T_{ae}.

2) Calculer R_4 et Φ_4.

Données :	$T_{ap} = 20$ °C	$T_{ae} = 3$ °C	$S = 1\ m^2$
	$\lambda = 1{,}2\ W\ m^{-1}K^{-1}$	e = 3 mm	
	$\lambda' = 0{,}025\ W\ m^{-1}\ K^{-1}$	e' = 3 mm	
	$h_{ap} = 10\ W\ m^{-2}\ K^{-1}$	$h_{ae} = 18\ W\ m^{-2}\ K^{-1}$	

EXERCICE 8 : AMELIORATION DU DOUBLE VITRAGE

Pour améliorer le double vitrage de l'exercice 4, on remplace l'air entre les vitres par de l'argon de conductivité thermique $\lambda_{argon} = 0{,}016\ W\ m^{-1}\ K^{-1}$.

Calculer le flux thermique Φ_5 traversant le double vitrage ainsi que la résistance thermique R_5 de l'ensemble.