

Cours de Physique : Thermique

A. Arciniegas
N. Wilkie-Chancellier
G. Sauderais

IUT Cergy-Pontoise, Dep GEII, site de Neuville



- 1 Contexte historique et généralités
- 2 Les trois modes de transfert thermique
- 3 Conduction de la chaleur : Analogie électrique/thermique
- 4 Exercices d'application

Contexte historique et généralités

Contexte historique

Historiquement, la chaleur a été un temps considérée comme une substance appelée le *calorique*.

Contexte historique

Historiquement, la chaleur a été un temps considérée comme une substance appelée le *calorique*.

1824 : Principe du moteur thermique

- Sadi Carnot (physicien et ingénieur français) publia *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*.

Contexte historique

Historiquement, la chaleur a été un temps considérée comme une substance appelée le *calorique*.

1824 : Principe du moteur thermique

- Sadi Carnot (physicien et ingénieur français) publia *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*.
- Il y exposa le modèle général du moteur thermique qui explique que la chaleur « s'écoule » d'une source « chaude » vers une source « froide » pour générer un mouvement.

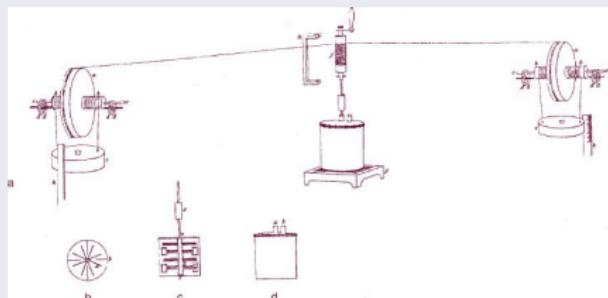
Contexte historique

Historiquement, la chaleur a été un temps considérée comme une substance appelée le *calorique*.

1824 : Principe du moteur thermique

- Sadi Carnot (physicien et ingénieur français) publia *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*.
- Il y exposa le modèle général du moteur thermique qui explique que la chaleur « s'écoule » d'une source « chaude » vers une source « froide » pour générer un mouvement.

1843 : Équivalence énergie mécanique - énergie thermique



- James Joule (physicien anglais) montra l'équivalence entre chaleur et énergie mécanique grâce à un dispositif (schéma ci-contre, A. BARBEROUSSE) fournissant un travail connu et en mesurant l'élévation de température qui en résulte.

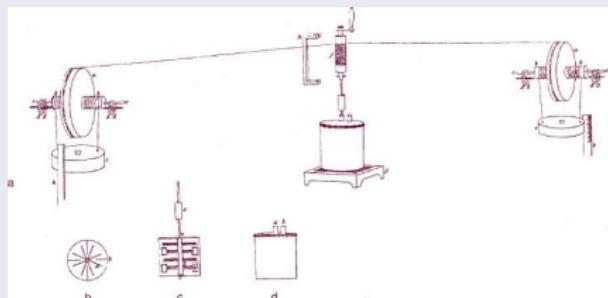
Contexte historique

Historiquement, la chaleur a été un temps considérée comme une substance appelée le *calorique*.

1824 : Principe du moteur thermique

- Sadi Carnot (physicien et ingénieur français) publia *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*.
- Il y exposa le modèle général du moteur thermique qui explique que la chaleur « s'écoule » d'une source « chaude » vers une source « froide » pour générer un mouvement.

1843 : Équivalence énergie mécanique - énergie thermique



- James Joule (physicien anglais) montra l'équivalence entre chaleur et énergie mécanique grâce à un dispositif (schéma ci-contre, A. BARBEROUSSE) fournissant un travail connu et en mesurant l'élévation de température qui en résulte.
- La communauté scientifique a rendu hommage à Joule en donnant son nom à l'unité de mesure de travail mécanique, de quantité de chaleur et d'énergie du Système international d'unités (SI) :

$$1 \text{ cal} = 4,184 \text{ J}$$

Une calorie (cal) représente la quantité de chaleur nécessaire pour éléver de 14,5 °C à 15,5 °C (1 °C) la température de 1 gramme d'eau sous une pression atmosphérique normale.

Chaleur (énergie thermique)

- Elle représente ce qu'il faut fournir globalement à un système pour l'amener d'un état (température initiale) à un autre (température finale).
- Un système à « haute » température échange avec son environnement de l'énergie. La chaleur notée Q et exprimée en joule (J) est donc l'énergie échangée entre deux corps.

Chaleur (énergie thermique)

- Elle représente ce qu'il faut fournir globalement à un système pour l'amener d'un état (température initiale) à un autre (température finale).
- Un système à « haute » température échange avec son environnement de l'énergie. La chaleur notée Q et exprimée en joule (J) est donc l'énergie échangée entre deux corps.

Température

- Est une mesure indirecte du degré d'*agitation microscopique* des particules dans un corps.
- Elle est notée T et mesurée en degrés Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$), degrés Celsius ($^{\circ}\text{C}$) et kelvin (K).

Généralités (1/2) : Définitions

Chaleur (énergie thermique)

- Elle représente ce qu'il faut fournir globalement à un système pour l'amener d'un état (température initiale) à un autre (température finale).
- Un système à « haute » température échange avec son environnement de l'énergie. La chaleur notée Q et exprimée en joule (J) est donc l'énergie échangée entre deux corps.

Température

- Est une mesure indirecte du degré d'*agitation microscopique* des particules dans un corps.
- Elle est notée T et mesurée en degrés Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$), degrés Celsius ($^{\circ}\text{C}$) et kelvin (K).

Capacité calorifique d'un corps

- L'énergie thermique qu'il faut apporter à un corps pour éléver sa température de ΔT est :

$$Q = C_{th} \Delta T$$

avec C_{th} la capacité calorifique du corps (en J.K^{-1}).

- Elle dépend de la nature du corps par l'intermédiaire de sa chaleur massique (ou chaleur spécifique) et de sa masse.

Dilatation thermique

Lorsque la température d'un fluide augmente, les particules qui le constituent vibrent de plus en plus. Elles occupent un volume plus grand, comme des petites billes qui en vibrant au voisinage de leur position d'équilibre repousseraient celles qui leur sont proches.

Dilatation thermique

Lorsque la température d'un fluide augmente, les particules qui le constituent vibrent de plus en plus. Elles occupent un volume plus grand, comme des petites billes qui en vibrant au voisinage de leur position d'équilibre repousseraient celles qui leur sont proches.

Application : Thermométrie

- Échelle Fahrenheit : en 1714, Gabriel Fahrenheit (physicien allemand) invente le thermomètre à Hg et l'utilise pour définir l'échelle Fahrenheit ($^{\circ}F$), dans laquelle $32\ ^{\circ}F$ correspond à la température la plus basse (congélation H_2O) et $212\ ^{\circ}F$ est la plus élevée (ébullition H_2O).

Dilatation thermique

Lorsque la température d'un fluide augmente, les particules qui le constituent vibrent de plus en plus. Elles occupent un volume plus grand, comme des petites billes qui en vibrant au voisinage de leur position d'équilibre repousseraient celles qui leur sont proches.

Application : Thermométrie

- Échelle Fahrenheit : en 1714, Gabriel Fahrenheit (physicien allemand) invente le thermomètre à Hg et l'utilise pour définir l'échelle Fahrenheit ($^{\circ}F$), dans laquelle $32\ ^{\circ}F$ correspond à la température la plus basse (congélation H_2O) et $212\ ^{\circ}F$ est la plus élevée (ébullition H_2O).
- Échelle Celsius : en 1741, Anders Celsius (physicien suédois), invente la gamme Celsius qui comprend cent intervalles appelés « degrés Celsius » ($^{\circ}C$). Dans cette échelle, $0\ ^{\circ}C$ est la température la plus basse (congélation H_2O) et $100\ ^{\circ}C$ est la plus élevée (ébullition H_2O).

Dilatation thermique

Lorsque la température d'un fluide augmente, les particules qui le constituent vibrent de plus en plus. Elles occupent un volume plus grand, comme des petites billes qui en vibrant au voisinage de leur position d'équilibre repousseraient celles qui leur sont proches.

Application : Thermométrie

- Échelle Fahrenheit : en 1714, Gabriel Fahrenheit (physicien allemand) invente le thermomètre à Hg et l'utilise pour définir l'échelle Fahrenheit ($^{\circ}F$), dans laquelle $32\ ^{\circ}F$ correspond à la température la plus basse (congélation H_2O) et $212\ ^{\circ}F$ est la plus élevée (ébullition H_2O).
- Échelle Celsius : en 1741, Anders Celsius (physicien suédois), invente la gamme Celsius qui comprend cent intervalles appelés « degrés Celsius » ($^{\circ}C$). Dans cette échelle, $0\ ^{\circ}C$ est la température la plus basse (congélation H_2O) et $100\ ^{\circ}C$ est la plus élevée (ébullition H_2O).
- Échelle de Kelvin : introduite au SI en 1954, a été définie par Lord Kelvin (physicien britannique) à partir du point triple H_2O . Le zéro absolu (0 K), correspondrait à la limite à une absence totale d'agitation microscopique.

Généralités (2/2) : Phénomènes liés à la chaleur

Dilatation thermique

Lorsque la température d'un fluide augmente, les particules qui le constituent vibrent de plus en plus. Elles occupent un volume plus grand, comme des petites billes qui en vibrant au voisinage de leur position d'équilibre repousseraient celles qui leur sont proches.

Application : Thermométrie

- Échelle Fahrenheit : en 1714, Gabriel Fahrenheit (physicien allemand) invente le thermomètre à Hg et l'utilise pour définir l'échelle Fahrenheit ($^{\circ}F$), dans laquelle $32\ ^{\circ}F$ correspond à la température la plus basse (congélation H_2O) et $212\ ^{\circ}F$ est la plus élevée (ébullition H_2O).
- Échelle Celsius : en 1741, Anders Celsius (physicien suédois), invente la gamme Celsius qui comprend cent intervalles appelés « degrés Celsius » ($^{\circ}C$). Dans cette échelle, $0\ ^{\circ}C$ est la température la plus basse (congélation H_2O) et $100\ ^{\circ}C$ est la plus élevée (ébullition H_2O).
- Échelle de Kelvin : introduite au SI en 1954, a été définie par Lord Kelvin (physicien britannique) à partir du point triple H_2O . Le zéro absolu ($0\ K$), correspondrait à la limite à une absence totale d'agitation microscopique.

Dilatation thermique dans les solides « isotropes »

$$\text{Expansion linéaire : } \Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$$\text{Expansion volumique : } \Delta V = \beta V_0 \Delta T \approx 3\alpha V_0 \Delta T$$

Les trois modes de transfert thermique :

- Conduction
- Convection
- Rayonnement

Conduction thermique : Loi de Fourier

Généralités

- La **conduction** est un processus de transfert macroscopique de la chaleur dans un matériau solide (ou un fluide *au repos*).

Conduction thermique : Loi de Fourier

Généralités

- La **conduction** est un processus de transfert macroscopique de la chaleur dans un matériau solide (ou un fluide au repos).
- Physiquement, elle traduit la transmission de l'agitation des atomes (cf. température) de proche en proche, à l'échelle microscopique.

Conduction thermique : Loi de Fourier

Généralités

- La **conduction** est un processus de transfert macroscopique de la chaleur dans un matériau solide (ou un fluide au repos).
- Physiquement, elle traduit la transmission de l'agitation des atomes (cf. température) de proche en proche, à l'échelle microscopique.
- Elle peut être vue comme un transfert d'énergie des particules les plus énergétiques vers les particules les moins énergétiques dû aux collisions entre particules (dépend de la structure et de l'organisation du matériau).

Conduction thermique : Loi de Fourier

Généralités

- La **conduction** est un processus de transfert macroscopique de la chaleur dans un matériau solide (ou un fluide au repos).
- Physiquement, elle traduit la transmission de l'agitation des atomes (cf. température) de proche en proche, à l'échelle microscopique.
- Elle peut être vue comme un transfert d'énergie des particules les plus énergétiques vers les particules les moins énergétiques dû aux collisions entre particules (dépend de la structure et de l'organisation du matériau).

Analogie avec la conduction électrique

- On parlera de conducteur ou d'isolant thermique.

Conduction thermique : Loi de Fourier

Généralités

- La **conduction** est un processus de transfert macroscopique de la chaleur dans un matériau solide (ou un fluide au repos).
- Physiquement, elle traduit la transmission de l'agitation des atomes (cf. température) de proche en proche, à l'échelle microscopique.
- Elle peut être vue comme un transfert d'énergie des particules les plus énergétiques vers les particules les moins énergétiques dû aux collisions entre particules (dépend de la structure et de l'organisation du matériau).

Analogie avec la conduction électrique

- On parlera de conducteur ou d'isolant thermique.
- Dans les solides, le transfert d'énergie peut également se produire sous l'effet du déplacement d'électrons libres.

Conduction thermique : Loi de Fourier

Généralités

- La **conduction** est un processus de transfert macroscopique de la chaleur dans un matériau solide (ou un fluide au repos).
- Physiquement, elle traduit la transmission de l'agitation des atomes (cf. température) de proche en proche, à l'échelle microscopique.
- Elle peut être vue comme un transfert d'énergie des particules les plus énergétiques vers les particules les moins énergétiques dû aux collisions entre particules (dépend de la structure et de l'organisation du matériau).

Analogie avec la conduction électrique

- On parlera de conducteur ou d'isolant thermique.
- Dans les solides, le transfert d'énergie peut également se produire sous l'effet du déplacement d'électrons libres.
- Ainsi en général, bon conducteur électrique = bon conducteur thermique.

Conduction thermique : Loi de Fourier

Généralités

- La **conduction** est un processus de transfert macroscopique de la chaleur dans un matériau solide (ou un fluide au repos).
- Physiquement, elle traduit la transmission de l'agitation des atomes (cf. température) de proche en proche, à l'échelle microscopique.
- Elle peut être vue comme un transfert d'énergie des particules les plus énergétiques vers les particules les moins énergétiques dû aux collisions entre particules (dépend de la structure et de l'organisation du matériau).

Analogie avec la conduction électrique

- On parlera de conducteur ou d'isolant thermique.
- Dans les solides, le transfert d'énergie peut également se produire sous l'effet du déplacement d'électrons libres.
- Ainsi en général, bon conducteur électrique = bon conducteur thermique.

Loi de Fourier

Le flux de chaleur Φ_{th} désigne la puissance thermique (W) qui traverse une surface d'un matériau.

$$\Phi_{th} = \frac{dQ}{dt}$$

Conduction thermique : Loi de Fourier

Généralités

- La **conduction** est un processus de transfert macroscopique de la chaleur dans un matériau solide (ou un fluide au repos).
- Physiquement, elle traduit la transmission de l'agitation des atomes (cf. température) de proche en proche, à l'échelle microscopique.
- Elle peut être vue comme un transfert d'énergie des particules les plus énergétiques vers les particules les moins énergétiques dû aux collisions entre particules (dépend de la structure et de l'organisation du matériau).

Analogie avec la conduction électrique

- On parlera de conducteur ou d'isolant thermique.
- Dans les solides, le transfert d'énergie peut également se produire sous l'effet du déplacement d'électrons libres.
- Ainsi en général, bon conducteur électrique = bon conducteur thermique.

Loi de Fourier

Le flux de chaleur Φ_{th} désigne la puissance thermique (W) qui traverse une surface d'un matériau.

$$\Phi_{th} = \frac{dQ}{dt}$$

La **loi de Fourier** lie Φ_{th} à un gradient, ou taux de variation en fonction de la distance, de la température dans le matériau. Le long de l'axe x , cette loi s'écrit :

$$\vec{j}_{th} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \vec{u}_x$$

Conduction thermique : Loi de Fourier

Généralités

- La **conduction** est un processus de transfert macroscopique de la chaleur dans un matériau solide (ou un fluide au repos).
- Physiquement, elle traduit la transmission de l'agitation des atomes (cf. température) de proche en proche, à l'échelle microscopique.
- Elle peut être vue comme un transfert d'énergie des particules les plus énergétiques vers les particules les moins énergétiques dû aux collisions entre particules (dépend de la structure et de l'organisation du matériau).

Analogie avec la conduction électrique

- On parlera de conducteur ou d'isolant thermique.
- Dans les solides, le transfert d'énergie peut également se produire sous l'effet du déplacement d'électrons libres.
- Ainsi en général, bon conducteur électrique = bon conducteur thermique.

Loi de Fourier

Le flux de chaleur Φ_{th} désigne la puissance thermique (W) qui traverse une surface d'un matériau.

$$\Phi_{th} = \frac{dQ}{dt}$$

La **loi de Fourier** lie Φ_{th} à un *gradient*, ou taux de variation en fonction de la distance, de la température dans le matériau. Le long de l'axe x , cette loi s'écrit :

$$\vec{j}_{th} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \vec{u}_x$$

avec :

- \vec{j}_{th} , la densité du flux thermique, ou Φ_{th} par unité de surface (W.m^{-2})
- λ , la conductivité thermique du matériau ($\text{W.m}^{-1}.k^{-1}$)

Généralités

- La **convection** est un processus de transfert qui accompagne les déplacements macroscopiques de la matière lorsque un solide se trouve placé dans un fluide *en mouvement*.

Généralités

- La **convection** est un processus de transfert qui accompagne les déplacements macroscopiques de la matière lorsque un solide se trouve placé dans un fluide *en mouvement*.
- Physiquement, elle traduit le phénomène d'échange dans lequel le fluide se réchauffe en prenant de l'énergie au solide (ou inversement, le fluide peut réchauffer le solide).

Généralités

- La **convection** est un processus de transfert qui accompagne les déplacements macroscopiques de la matière lorsque un solide se trouve placé dans un fluide *en mouvement*.
- Physiquement, elle traduit le phénomène d'échange dans lequel le fluide se réchauffe en prenant de l'énergie au solide (ou inversement, le fluide peut réchauffer le solide).
- Elle peut être naturelle ou forcée si on fait intervenir des moyens mécaniques (p.e. pompe, ventilateur...).

Convection thermique : Loi de Newton

Généralités

- La **convection** est un processus de transfert qui accompagne les déplacements macroscopiques de la matière lorsque un solide se trouve placé dans un fluide en mouvement.
- Physiquement, elle traduit le phénomène d'échange dans lequel le fluide se réchauffe en prenant de l'énergie au solide (ou inversement, le fluide peut réchauffer le solide).
- Elle peut être naturelle ou forcée si on fait intervenir des moyens mécaniques (p.e. pompe, ventilateur...).

Loi de Newton

De façon macroscopique la convection est décrite par la **loi de Newton** qui lie le flux thermique Φ_{th} à un écart de température. Au voisinage d'un solide de température de surface T_s , un fluide en mouvement à la température T_f reçoit une densité de flux thermique \vec{j}_{th} . Ainsi,

$$\Phi_{th} = hS(T_s - T_f)$$

Convection thermique : Loi de Newton

Généralités

- La **convection** est un processus de transfert qui accompagne les déplacements macroscopiques de la matière lorsque un solide se trouve placé dans un fluide en mouvement.
- Physiquement, elle traduit le phénomène d'échange dans lequel le fluide se réchauffe en prenant de l'énergie au solide (ou inversement, le fluide peut réchauffer le solide).
- Elle peut être naturelle ou forcée si on fait intervenir des moyens mécaniques (p.e. pompe, ventilateur...).

Loi de Newton

De façon macroscopique la convection est décrite par la **loi de Newton** qui lie le flux thermique Φ_{th} à un écart de température. Au voisinage d'un solide de température de surface T_s , un fluide en mouvement à la température T_f reçoit une densité de flux thermique \vec{j}_{th} . Ainsi,

$$\Phi_{th} = hS(T_s - T_f)$$

où S est la surface (m^2) traversée par Φ_{th} et h désigne le coefficient de transfert thermique ($W.m^{-2}.K^{-1}$).

Convection thermique : Loi de Newton

Généralités

- La **convection** est un processus de transfert qui accompagne les déplacements macroscopiques de la matière lorsque un solide se trouve placé dans un fluide en mouvement.
- Physiquement, elle traduit le phénomène d'échange dans lequel le fluide se réchauffe en prenant de l'énergie au solide (ou inversement, le fluide peut réchauffer le solide).
- Elle peut être naturelle ou forcée si on fait intervenir des moyens mécaniques (p.e. pompe, ventilateur...).

Loi de Newton

De façon macroscopique la convection est décrite par la **loi de Newton** qui lie le flux thermique Φ_{th} à un écart de température. Au voisinage d'un solide de température de surface T_s , un fluide en mouvement à la température T_f reçoit une densité de flux thermique j_{th} . Ainsi,

$$\Phi_{th} = hS(T_s - T_f)$$

où S est la surface (m^2) traversée par Φ_{th} et h désigne le coefficient de transfert thermique ($W.m^{-2}.K^{-1}$).

Ce dernier coefficient dépend surtout des propriétés de l'écoulement dans la « couche limite », c'est-à-dire la zone (distance) où il y a lieu la transition de la température entre le solide et le fluide.

Généralités

- Le **rayonnement** est un processus de transfert qui décrit le transport d'énergie thermique via la propagation d'ondes électromagnétiques.

Généralités

- Le **rayonnement** est un processus de transfert qui décrit le transport d'énergie thermique via la propagation d'ondes électromagnétiques.
- Physiquement, l'expérience montre que lorsque un corps est chauffé, il émet un rayonnement électromagnétique.
 - Le phénomène d'*émission* traduit la conversion d'énergie due à l'agitation d'électrons en énergie transportée par de photons.
 - Le phénomène d'*absorption* est la conversion inverse.

Généralités

- Le **rayonnement** est un processus de transfert qui décrit le transport d'énergie thermique via la propagation d'ondes électromagnétiques.
- Physiquement, l'expérience montre que lorsque un corps est chauffé, il émet un rayonnement électromagnétique.
 - Le phénomène d'*émission* traduit la conversion d'énergie due à l'agitation d'électrons en énergie transportée par de photons.
 - Le phénomène d'*absorption* est la conversion inverse.
- Les corps qui rayonnent le plus sont ceux qui absorbent le plus. Un corps parfaitement absorbant est dit **corps noir**.

Rayonnement thermique : Loi de Stefan-Boltzmann

Généralités

- Le **rayonnement** est un processus de transfert qui décrit le transport d'énergie thermique via la propagation d'ondes électromagnétiques.
- Physiquement, l'expérience montre que lorsque un corps est chauffé, il émet un rayonnement électromagnétique.
 - Le phénomène d'*émission* traduit la conversion d'énergie due à l'agitation d'électrons en énergie transportée par de photons.
 - Le phénomène d'*absorption* est la conversion inverse.
- Les corps qui rayonnent le plus sont ceux qui absorbent le plus. Un corps parfaitement absorbant est dit **corps noir**.

Loi de Stefan-Boltzmann

Le transfert par rayonnement est décrit par la **loi de Stefan-Boltzmann** et s'exprime par rapport à l'émission/absorption du corps noir. Elle montre que le flux thermique surfacique $\frac{d\Phi_{th}}{dS}$ est lié de façon non-linéaire la température T par la relation :

$$\frac{d\Phi_{th}}{dS} = \epsilon\sigma T^4$$

Rayonnement thermique : Loi de Stefan-Boltzmann

Généralités

- Le **rayonnement** est un processus de transfert qui décrit le transport d'énergie thermique via la propagation d'ondes électromagnétiques.
- Physiquement, l'expérience montre que lorsque un corps est chauffé, il émet un rayonnement électromagnétique.
 - Le phénomène d'*émission* traduit la conversion d'énergie due à l'agitation d'électrons en énergie transportée par de photons.
 - Le phénomène d'*absorption* est la conversion inverse.
- Les corps qui rayonnent le plus sont ceux qui absorbent le plus. Un corps parfaitement absorbant est dit **corps noir**.

Loi de Stefan-Boltzmann

Le transfert par rayonnement est décrit par la **loi de Stefan-Boltzmann** et s'exprime par rapport à l'émission/absorption du corps noir. Elle montre que le flux thermique surfacique $\frac{d\Phi_{th}}{dS}$ est lié de façon non-linéaire la température T par la relation :

$$\frac{d\Phi_{th}}{dS} = \epsilon \sigma T^4$$

avec :

- ϵ est un coefficient empirique appelé **émissivité**, $0 < \epsilon < 1$, $\epsilon = 1$ pour un corps noir.
- σ est la constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ (W.m}^{-2}.\text{K}^{-4})$

Rayonnement thermique : Loi de Stefan-Boltzmann

Généralités

- Le **rayonnement** est un processus de transfert qui décrit le transport d'énergie thermique via la propagation d'ondes électromagnétiques.
- Physiquement, l'expérience montre que lorsque un corps est chauffé, il émet un rayonnement électromagnétique.
 - Le phénomène d'*émission* traduit la conversion d'énergie due à l'agitation d'électrons en énergie transportée par de photons.
 - Le phénomène d'*absorption* est la conversion inverse.
- Les corps qui rayonnent le plus sont ceux qui absorbent le plus. Un corps parfaitement absorbant est dit **corps noir**.

Loi de Stefan-Boltzmann

Le transfert par rayonnement est décrit par la **loi de Stefan-Boltzmann** et s'exprime par rapport à l'émission/absorption du corps noir. Elle montre que le flux thermique surfacique $\frac{d\Phi_{th}}{dS}$ est lié de façon non-linéaire la température T par la relation :

$$\frac{d\Phi_{th}}{dS} = \epsilon \sigma T^4$$

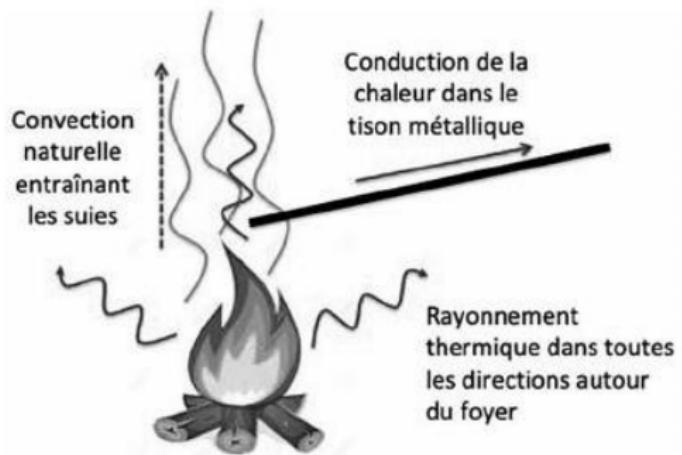
avec :

- ϵ est un coefficient empirique appelé **émissivité**, $0 < \epsilon < 1$, $\epsilon = 1$ pour un corps noir.
- σ est la constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ (W.m}^{-2}\text{.K}^{-4}\text{)}$

Cette loi décrit aussi la puissance que peut absorber un corps placé dans un milieu de température T_0 . Le bilan d'émission énergétique du solide à la température T plongé dans un milieu à la température T_0 est donc :

$$\frac{d\Phi_{th}}{dS} = \epsilon \sigma (T^4 - T_0^4)$$

Les trois modes de transfert thermique :

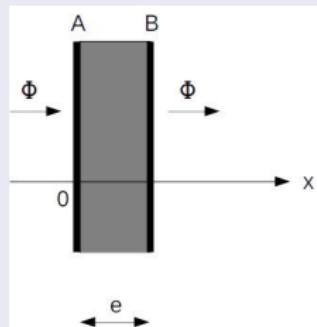


Crédit : DUNOD

Conduction de la chaleur : Analogie électrique/thermique

Résistance thermique

Premier exemple



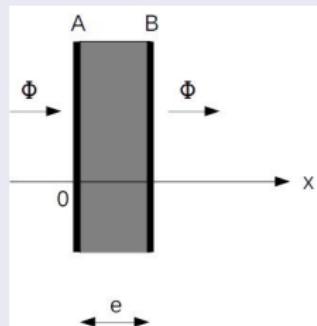
Considérons une plaque homogène, indéformable, de conductivité thermique constante λ , et d'épaisseur e . On suppose que la hauteur et la profondeur de la plaque sont très grandes devant son épaisseur de façon à pouvoir faire l'hypothèse du problème unidirectionnel.

Le flux de chaleur se propagera dans une seule direction (suivant Ox , perpendiculaire aux deux faces A et B) et la température à l'intérieur de la plaque ne dépendra que d'une seule variable d'espace : $T = T(x)$. Les faces parallèles A et B sont maintenues aux températures respectives T_A et T_B .

- Quelle est la répartition de température dans la plaque?
- Quel est le flux thermique à travers une surface de 1 m^2 ?

Résistance thermique

Premier exemple



Considérons une plaque homogène, indéformable, de conductivité thermique constante λ , et d'épaisseur e . On suppose que la hauteur et la profondeur de la plaque sont très grandes devant son épaisseur de façon à pouvoir faire l'hypothèse du problème unidirectionnel.

Le flux de chaleur se propagera dans une seule direction (suivant Ox , perpendiculaire aux deux faces A et B) et la température à l'intérieur de la plaque ne dépendra que d'une seule variable d'espace : $T = T(x)$. Les faces parallèles A et B sont maintenues aux températures respectives T_A et T_B .

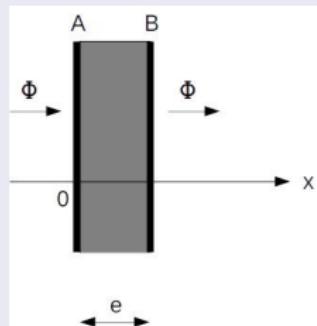
- Quelle est la répartition de température dans la plaque?
- Quel est le flux thermique à travers une surface de 1 m^2 ?

La loi de Fourier montre que la densité de flux d'énergie est orientée selon Ox et vaut :

$$j = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\Phi_{th}}{S}$$

Résistance thermique

Premier exemple



Considérons une plaque homogène, indéformable, de conductivité thermique constante λ , et d'épaisseur e . On suppose que la hauteur et la profondeur de la plaque sont très grandes devant son épaisseur de façon à pouvoir faire l'hypothèse du problème unidirectionnel.

Le flux de chaleur se propagera dans une seule direction (suivant Ox , perpendiculaire aux deux faces A et B) et la température à l'intérieur de la plaque ne dépendra que d'une seule variable d'espace : $T = T(x)$. Les faces parallèles A et B sont maintenues aux températures respectives T_A et T_B .

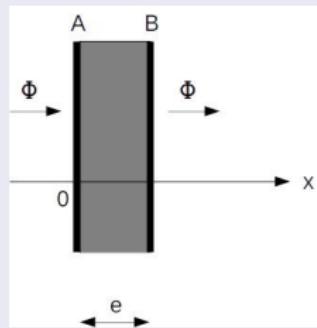
- Quelle est la répartition de température dans la plaque?
- Quel est le flux thermique à travers une surface de 1 m^2 ?

S'il n'y a pas de pertes, ce flux est indépendant de l'abscisse x , et par conséquent :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\Phi_{th}}{S}$$

Résistance thermique

Premier exemple



Considérons une plaque homogène, indéformable, de conductivité thermique constante λ , et d'épaisseur e . On suppose que la hauteur et la profondeur de la plaque sont très grandes devant son épaisseur de façon à pouvoir faire l'hypothèse du problème unidirectionnel.

Le flux de chaleur se propagera dans une seule direction (suivant Ox , perpendiculaire aux deux faces A et B) et la température à l'intérieur de la plaque ne dépendra que d'une seule variable d'espace : $T = T(x)$. Les faces parallèles A et B sont maintenues aux températures respectives T_A et T_B .

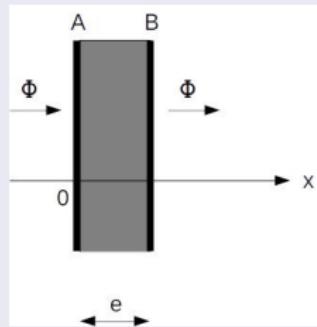
- Quelle est la répartition de température dans la plaque?
- Quel est le flux thermique à travers une surface de 1 m^2 ?

S'il n'y a pas de pertes, ce flux est indépendant de l'abscisse x , et par conséquent :

$$-\lambda \frac{dT}{dx} = \frac{\Phi_{th}}{S}$$

Résistance thermique

Premier exemple



Considérons une plaque homogène, indéformable, de conductivité thermique constante λ , et d'épaisseur e . On suppose que la hauteur et la profondeur de la plaque sont très grandes devant son épaisseur de façon à pouvoir faire l'hypothèse du problème unidirectionnel.

Le flux de chaleur se propagera dans une seule direction (suivant Ox , perpendiculaire aux deux faces A et B) et la température à l'intérieur de la plaque ne dépendra que d'une seule variable d'espace : $T = T(x)$. Les faces parallèles A et B sont maintenues aux températures respectives T_A et T_B .

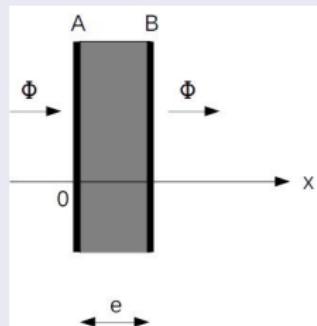
- Quelle est la répartition de température dans la plaque?
- Quel est le flux thermique à travers une surface de 1 m^2 ?

S'il n'y a pas de pertes, ce flux est indépendant de l'abscisse x , et par conséquent :

$$dT = -\frac{\Phi_{th}}{\lambda S} dx$$

Résistance thermique

Premier exemple



Considérons une plaque homogène, indéformable, de conductivité thermique constante λ , et d'épaisseur e . On suppose que la hauteur et la profondeur de la plaque sont très grandes devant son épaisseur de façon à pouvoir faire l'hypothèse du problème unidirectionnel.

Le flux de chaleur se propagera dans une seule direction (suivant Ox , perpendiculaire aux deux faces A et B) et la température à l'intérieur de la plaque ne dépendra que d'une seule variable d'espace : $T = T(x)$. Les faces parallèles A et B sont maintenues aux températures respectives T_A et T_B .

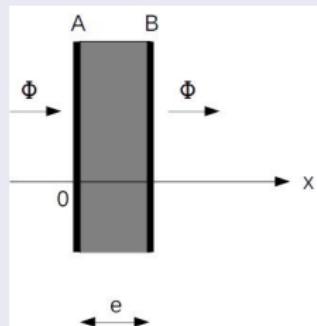
- Quelle est la répartition de température dans la plaque?
- Quel est le flux thermique à travers une surface de 1 m^2 ?

On trouve, en intégrant, que T est une fonction linéaire de x :

$$T = -\frac{\Phi_{th}}{\lambda S} x + cte$$

Résistance thermique

Premier exemple



Considérons une plaque homogène, indéformable, de conductivité thermique constante λ , et d'épaisseur e . On suppose que la hauteur et la profondeur de la plaque sont très grandes devant son épaisseur de façon à pouvoir faire l'hypothèse du problème unidirectionnel.

Le flux de chaleur se propagera dans une seule direction (suivant Ox , perpendiculaire aux deux faces A et B) et la température à l'intérieur de la plaque ne dépendra que d'une seule variable d'espace : $T = T(x)$. Les faces parallèles A et B sont maintenues aux températures respectives T_A et T_B .

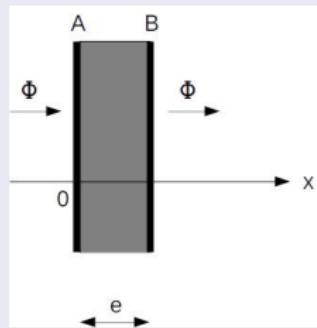
- Quelle est la répartition de température dans la plaque?
- Quel est le flux thermique à travers une surface de 1 m^2 ?

En vérifiant les conditions initiales, on trouve :

$$T(0) = \text{cte} = T_A$$

Résistance thermique

Premier exemple



Considérons une plaque homogène, indéformable, de conductivité thermique constante λ , et d'épaisseur e . On suppose que la hauteur et la profondeur de la plaque sont très grandes devant son épaisseur de façon à pouvoir faire l'hypothèse du problème unidirectionnel.

Le flux de chaleur se propagera dans une seule direction (suivant Ox , perpendiculaire aux deux faces A et B) et la température à l'intérieur de la plaque ne dépendra que d'une seule variable d'espace : $T = T(x)$. Les faces parallèles A et B sont maintenues aux températures respectives T_A et T_B .

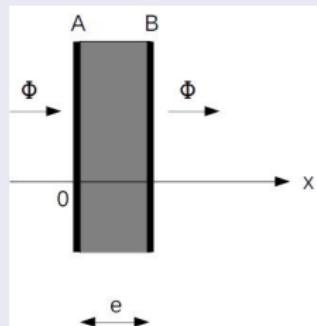
- Quelle est la répartition de température dans la plaque?
- Quel est le flux thermique à travers une surface de 1 m^2 ?

Ainsi :

$$T = -\frac{\Phi_{th}}{\lambda S}x + T_A$$

Résistance thermique

Premier exemple



Considérons une plaque homogène, indéformable, de conductivité thermique constante λ , et d'épaisseur e . On suppose que la hauteur et la profondeur de la plaque sont très grandes devant son épaisseur de façon à pouvoir faire l'hypothèse du problème unidirectionnel.

Le flux de chaleur se propagera dans une seule direction (suivant Ox , perpendiculaire aux deux faces A et B) et la température à l'intérieur de la plaque ne dépendra que d'une seule variable d'espace : $T = T(x)$. Les faces parallèles A et B sont maintenues aux températures respectives T_A et T_B .

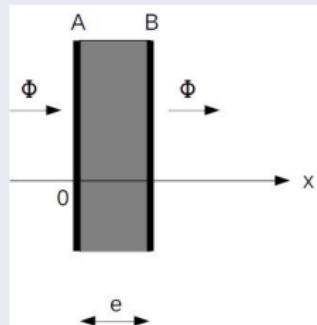
- Quelle est la répartition de température dans la plaque?
- Quel est le flux thermique à travers une surface de 1 m^2 ?

En appliquant la relation sur la face B de la plaque, on trouve :

$$T_B = -\frac{\Phi_{th}}{\lambda S} e + T_A$$

Résistance thermique

Premier exemple



Considérons une plaque homogène, indéformable, de conductivité thermique constante λ , et d'épaisseur e . On suppose que la hauteur et la profondeur de la plaque sont très grandes devant son épaisseur de façon à pouvoir faire l'hypothèse du problème unidirectionnel.

Le flux de chaleur se propagera dans une seule direction (suivant Ox , perpendiculaire aux deux faces A et B) et la température à l'intérieur de la plaque ne dépendra que d'une seule variable d'espace : $T = T(x)$. Les faces parallèles A et B sont maintenues aux températures respectives T_A et T_B .

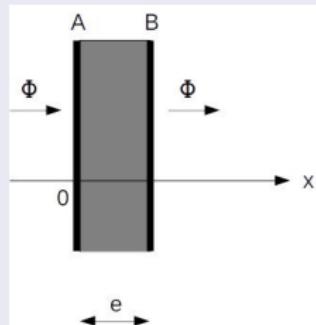
- Quelle est la répartition de température dans la plaque?
- Quel est le flux thermique à travers une surface de 1 m^2 ?

Ou :

$$T_A - T_B = \frac{e}{\lambda S} \Phi_{th}$$

Résistance thermique

Premier exemple



Considérons une plaque homogène, indéformable, de conductivité thermique constante λ , et d'épaisseur e . On suppose que la hauteur et la profondeur de la plaque sont très grandes devant son épaisseur de façon à pouvoir faire l'hypothèse du problème unidirectionnel.

Le flux de chaleur se propagera dans une seule direction (suivant Ox , perpendiculaire aux deux faces A et B) et la température à l'intérieur de la plaque ne dépendra que d'une seule variable d'espace : $T = T(x)$. Les faces parallèles A et B sont maintenues aux températures respectives T_A et T_B .

- Quelle est la répartition de température dans la plaque?
- Quel est le flux thermique à travers une surface de 1 m^2 ?

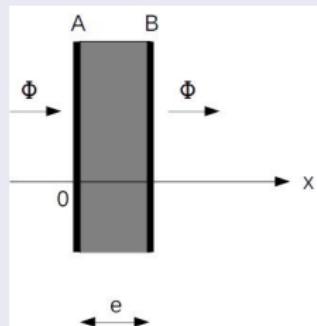
Ou :

$$T_A - T_B = \frac{e}{\lambda S} \Phi_{th}$$

Cette relation fournit le flux thermique pour une unité de surface si $S = 1 \text{ m}^2$. Il est proportionnel à la différence de température entre les deux faces et à la conductivité thermique λ du matériau.

Résistance thermique

Premier exemple



Considérons une plaque homogène, indéformable, de conductivité thermique constante λ , et d'épaisseur e . On suppose que la hauteur et la profondeur de la plaque sont très grandes devant son épaisseur de façon à pouvoir faire l'hypothèse du problème unidirectionnel.

Le flux de chaleur se propagera dans une seule direction (suivant Ox , perpendiculaire aux deux faces A et B) et la température à l'intérieur de la plaque ne dépendra que d'une seule variable d'espace : $T = T(x)$. Les faces parallèles A et B sont maintenues aux températures respectives T_A et T_B .

- Quelle est la répartition de température dans la plaque?
- Quel est le flux thermique à travers une surface de 1 m^2 ?

Ou :

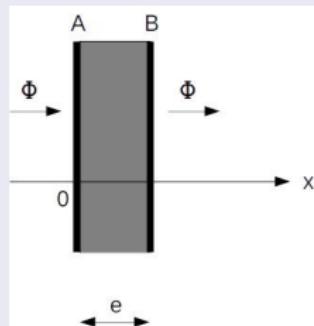
$$T_A - T_B = \frac{e}{\lambda S} \Phi_{th}$$

On peut dire que le comportement thermique est semblable à celui des conducteurs électriques. Le matériau oppose à la propagation de la chaleur une certaine résistance appelée **résistance thermique** :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda S}$$

Résistance thermique

Premier exemple



Considérons une plaque homogène, indéformable, de conductivité thermique constante λ , et d'épaisseur e . On suppose que la hauteur et la profondeur de la plaque sont très grandes devant son épaisseur de façon à pouvoir faire l'hypothèse du problème unidirectionnel.

Le flux de chaleur se propagera dans une seule direction (suivant Ox , perpendiculaire aux deux faces A et B) et la température à l'intérieur de la plaque ne dépendra que d'une seule variable d'espace : $T = T(x)$. Les faces parallèles A et B sont maintenues aux températures respectives T_A et T_B .

- Quelle est la répartition de température dans la plaque?
- Quel est le flux thermique à travers une surface de 1 m^2 ?

On peut dire que le comportement thermique est semblable à celui des conducteurs électriques. Le matériau oppose à la propagation de la chaleur une certaine résistance appelée **résistance thermique** :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda S}$$

Cette relation ressemble à celle de la résistance électrique d'un fil homogène de longueur L et conductivité électrique σ :

$$R = \frac{L}{\sigma S}$$

Analogie résistance électrique et thermique

Il est possible de poser des analogies d'écriture :

Grandeur électrique	Symbol et unité	Grandeur thermique	Symbol et unité
Conductivité	$\sigma = \frac{1}{\rho} (\Omega^{-1} \cdot m^{-1})$	Conductivité	$\lambda (W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1})$
Potiel	U (V)	Température	T (K)
Courant	I (A)	Flux thermique	$\Phi_{th} (W)$
Résistance électrique	R (Ω)	Résistance thermique	$R_{th} (K \cdot W^{-1})$

Exercices d'application