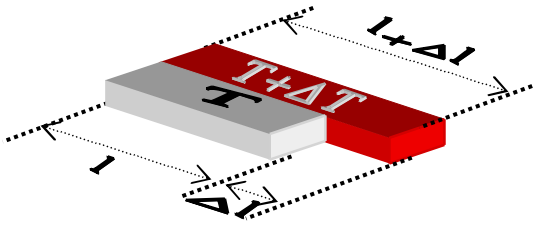
Chapitre II : Propriétés thermiques de la matière

II.1. La dilatation thermique

Lorsqu'on chauffe une substance, on provoque l'augmentation de l'énergie cinétique des atomes et des molécules, ce qui accroît la violence des chocs entre les molécules.
Les molécules ont par conséquent tendance à **se repousser davantage** l'une de l'autre et **le matériau se dilate**.

II.1.1 Dilatation linéaire

L'expérience montre que si un objet, de longueur initiale **l**, est chauffé il se produit une petite augmentation de longueur **Δl** sous l'effet d'une légère augmentation de température **ΔT**.



$\Delta l = \alpha \, . \, l \, . \, \Delta T$

α est le coefficient de dilation linéaire du matériau.
α a les dimensions de l'inverse d'une température.
α en K^{-1}

Exemple : La longueur du pont de la Golden Gate à San Francisco est de 1280 m. Certaines années, la température varie entre –12°C et 38°C. Calculer la variation de longueur correspondant à cette différence de température, sachant que la chaussée est supportée par des poutres en acier.

$\alpha_{acier} = 1.27\ 10^{-5}\ K^{-1}$

$\Delta T = 50$ deg (°C ou K)

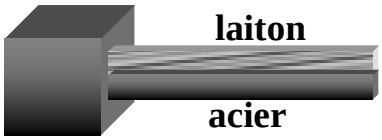
$\Delta l = \alpha \, . \, l \, . \, \Delta T = (1.27\ 10^{-5})\ 1280 \times 50$

$= 0.81$ m

Dans la structure du pont, il a fallu tenir compte du changement de l pour éviter le développement de forces capables de dégâts.

Application : le thermostat

Un thermostat est un dispositif constitué de deux rubans métalliques collés l'un à l'autre.



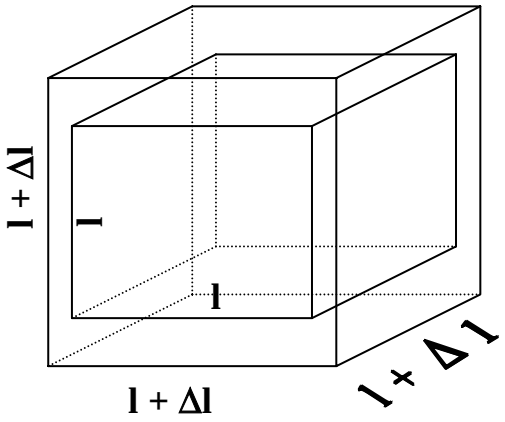
$\alpha_{laiton} \neq \alpha_{acier}$

Sous l'effet de la chaleur, la dilatation inégale du laiton et de l'acier provoque la flexion des rubans.

Lorsque la flexion est suffisamment grande, le thermostat **ouvre** ou **ferme** un interrupteur.
Le thermostat est utilisé pour le contrôle du système de chauffage central ou d'air conditionné, ou pour contrôler la température du réfrigérateur.

II.1.2 Dilatation en surface et en volume

Quand on chauffe un objet, toutes ses dimensions augmentent :
La longueur des côtés, l'aire des surfaces ainsi que le volume.



Lorsque la température augmente de ΔT :

- la longueur de chaque côté augmente et devient $\mathbf{l + \Delta l}$
- l'aire $A = l^2$ de la face augmente et **devient** $\mathbf{A + \Delta A = (l + \Delta l)^2}$

  $\mathbf{A + \Delta A = l^2 + 2l\,\Delta l + (\Delta l)^2}$

L'augmentation de la surface :

$$\mathbf{\Delta A = (l + \Delta l)^2 - l^2 = 2l\,\Delta l + (\Delta l)^2}$$

Δl est très petit $\Rightarrow$ on néglige $(\Delta l)^2$

$$\mathbf{\Delta A = 2l\,\Delta l = 2l\,(\alpha\, l\,\Delta T) = 2\,\alpha\, l^2\,\Delta T}$$

$$\mathbf{\Delta A = 2\alpha\, A\,\Delta T}$$

Les aires augmentent 2 fois plus vite que les longueurs.

Exemple :
Un disque en acier est troué en son centre. Si l'on chauffe le disque de 10°C à 100°C. calculer l'augmentation relative de l'aire du trou. Toutes les dimensions du disque augmentent sous l'action de la chaleur. L'aire du trou augmente comme s'il était rempli d'acier.

$$\frac{\Delta A}{A} = 2\alpha\Delta T = 2(1.2710^{-5})(90)$$

$$\mathbf{= 2.29\ 10^{-3}}$$

- Le volume $V = l^3$ augmente aussi $\Delta V = (l + \Delta l)^3 - l^3$

En négligeant $(\Delta l)^2$ et $(\Delta l)^3$

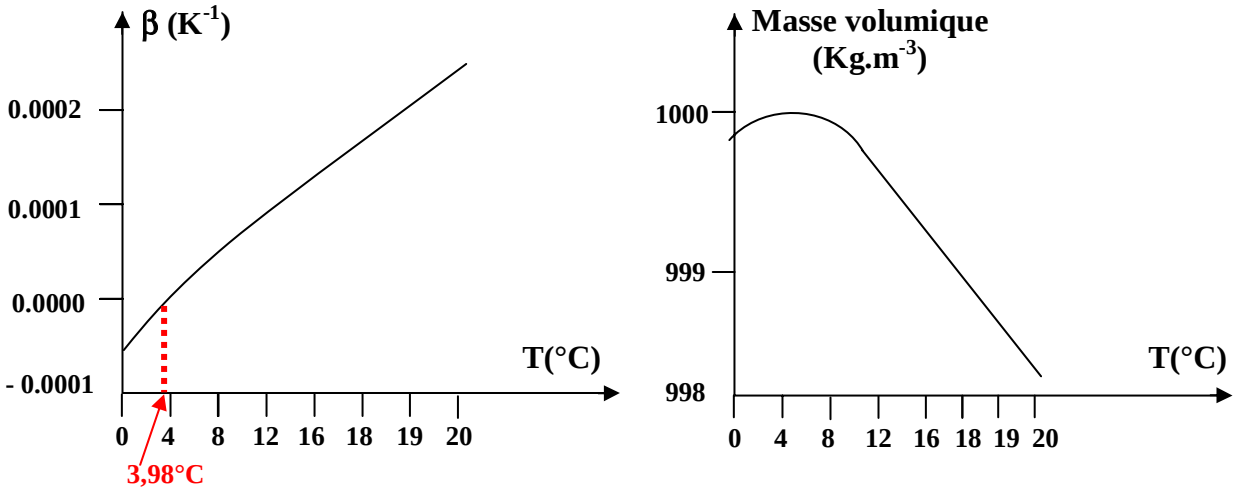
$\Delta V = 3\, l^2\, \Delta l = 3V.\ \Delta l / l$

$\Delta l = \alpha\, l\, \Delta T$

$\Delta V = 3\alpha\, V\, \Delta T$

$\beta = 3\alpha$ **:** coefficient de dilatation volumique

Application : l'eau est l'une des très rares substances qui présente un coefficient de dilatation volumique **négatif** dans un certain domaine de température.



β varie avec la température et change de signe à 3,98°C.

Quand la température augmente à partir de 0°C l'eau se contracte jusqu'à 3,98°C, puis elle se dilate lorsque cette température est dépassée ; la **masse volumique** de l'eau est donc **maximum** à 3,98°C .

Montrons l'importance de cette caractéristique pour la vie aquatique :

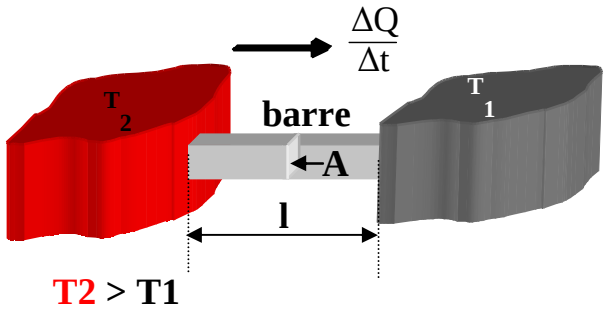
Lorsque la température de l'air diminue en début d'hiver, l'eau superficielle des lacs se refroidit. Lorsque l'eau de surface atteint 3,98°C, sa masse volumique étant maximale, elle descend vers le fond, tandis que l'eau plus chaude et moins dense du fond remonte en surface. L'eau froide qui descend emporte de l'oxygène dissous .

Lorsque le lac entier atteint la température de 3,98°C, la surface se refroidit davantage. Il y aura formation de glace. La glace de masse volumique inférieure à celle de l'eau, flotte sur l'eau. Le lac gèle donc du haut vers le bas.

La vie aquatique peut se maintenir en hiver grâce à l'eau fraîchement oxygénée qui se trouve sous la glace.

II.2. La conduction de la chaleur

Les échanges de chaleur se font toujours des régions à haute température vers les régions à basse température.



Deux objets à des températures T_1 et T_2, reliés l'un à l'autre au moyen d'une barre, verront leur différence de température $\Delta T = T_2 - T_1$ diminuer progressivement.
L'expérience montre que **la vitesse** à laquelle la chaleur est transportée de l'objet le plus chaud à l'objet le plus froid est proportionnelle à la section **A** et à $\frac{\Delta T}{l}$ **: gradient de température**.

Le flux de chaleur :

$$\mathbf{H = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = K.\ A.\ \frac{\Delta T}{l}}$$

K une constante appelée conductivité thermique.

Nous supposons K constant dans le domaine de température considéré dans ce cours.

K est en W . m^{-1} . K^{-1}

Exemples de K :

Substance	**K : conductivité thermique (W. m^{-1}. K^{-1})**
Argent	420
Cuivre	400
Aluminium	240
Acier	79
Glace	1.7
Verre, béton	0.8
Eau	0.59
Muscle animal, graisse	0.2
Bois, Amiante	0.08
Feutre, laine de verre	0.04
Air	0.024
Duvet	0.019

Les métaux sont d'excellents conducteurs de la chaleur.
K des métaux est 10^3 à 10^4 fois supérieure à K des isolants thermiques (ex : amiante, laine de verre). L'air est l'un des meilleurs **isolants**.

On utilise l'air dans plusieurs applications de **l'isolation thermique**.

- **Dans les vêtements chauds.**

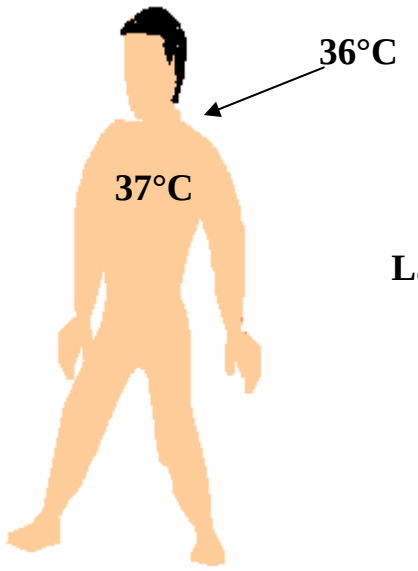
Les fibres des matériaux utilisés piègent de l'air qui agit comme isolant.

- **Dans l'isolation des maisons.**

Dans les doubles vitrages, l'air enfermé entre les deux panneaux permet de réduire les pertes de chaleur par conduction.

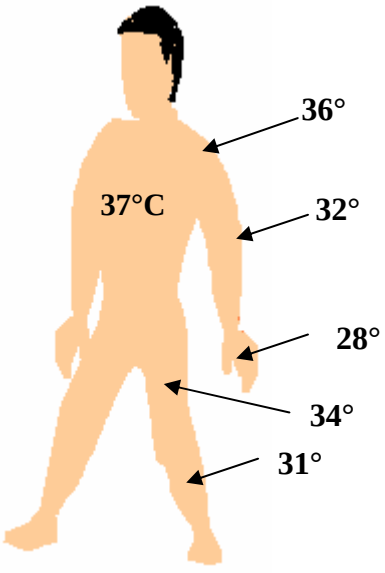
Les tissus du corps humain sont aussi de bons isolants.

- **Dans un environnement chaud**



La température interne du corps est uniforme

- **Dans un environnement froid**



La partie centrale du corps conserve une température élevée

La quantité $\frac{l}{K}$ est la résistance opposée par le matériau au transport de la chaleur par conduction.

$$\mathbf{R= \frac{l}{K}}$$

Exemple :

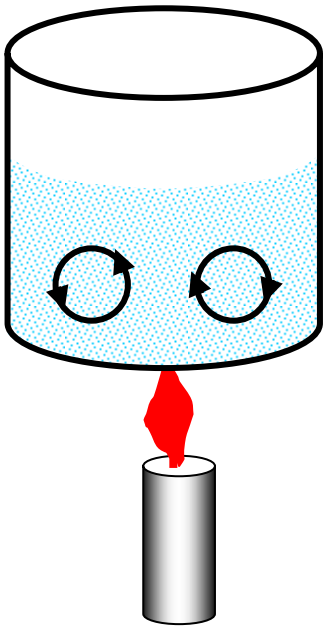
Un morceau de laine de verre, épais de 3cm possède une résistance R = $\frac{l}{K}$

$$\mathbf{R = \frac{0.03}{0.04} = 0.75\ m^2.\ K\ .\ W^{-1}}$$

II.3. Transfert de chaleur par convection

Une modification locale de la température produit des mouvements à l'intérieur des liquides et des gaz **: ce sont des courants de convection**

Récipient contenant un liquide

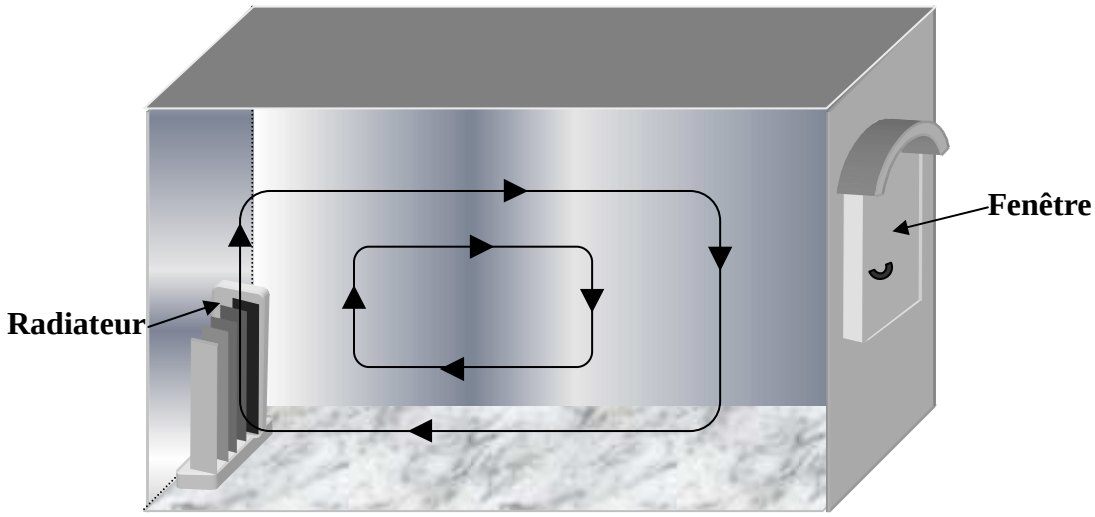


Le liquide proche de la source de chaleur est chauffé et il se dilate légèrement. Il devient plus léger que le liquide plus froid, il monte et il est remplacé par du liquide plus froid et plus lourd.

Lorsque le liquide plus chaud atteint la région plus froide du récipient, il commence à se refroidir et se contracter, il redescend vers la source de chaleur.

Si le récipient est chauffé sur sa face supérieure, **la convection ne se produirait pas**. L'ensemble du liquide serait alors chauffé par le processus plus lent de la conduction.

Un radiateur à eau chaude ou à vapeur donne une autre illustration de la convection. L'air à côté du radiateur est chauffé et a tendance à monter. L'air qui se trouve près des fenêtres et des murs extérieurs se refroidit et descend.



Pièce chauffée par radiateur

Le flux de chaleur transporté par convection, à partir d'une surface d'air A est approximativement donné par la formule empirique :

$$H = q. A. \Delta T$$

ΔT : différence de température entre la surface et l'air qui se trouve à grande distance de cette surface. .
q : constante qui dépend de la forme et de l'orientation de la surface.

Ex : q = 7.1 W. m^{-2} . K^{-1} pour une personne nue.
q = 9.5 W . m^{-2} . K^{-1} pour un tuyau rempli d'eau chaude.

Les pertes de chaleur par convection sont importantes pour les êtres humains.
Exemple :
Une personne nue est au repos dans une chambre à 29°C. Si la température de la peau est de 33°C et si la surface du corps vaut 1.5m^2, quelle est la puissance calorifique perdue par convection ?

H = q . A . ΔT
= 7.1 . 1.5 . (33 – 29)
= 43 W

Une personne au repos dégage de la chaleur avec une puissance deux fois plus élevée.
La convection est donc responsable de 50% environ des pertes de chaleur du corps.
S'il y a un courant d'air ou si la température ambiante est plus basse, les pertes de chaleur par convection augmentent.
Les skieurs et les cyclistes, en mouvement rapide par rapport à l'air, doivent être conscients des risques que cela comporte.
La chair, exposée à des températures très basses peut geler en quelques minutes.
Ex : **déplacement à v = 40 Km/h à –10°C de température**.

II.4. Le rayonnement

La conduction et la convection se produisent uniquement dans les milieux matériels. Or le transport de chaleur se fait aussi dans le vide.
Ex : l'énergie solaire traverse l'espace pour atteindre la terre.
Ce processus s'appelle **le rayonnement** qui se produit également dans les milieux matériels.
Le terme **rayonnement** est un autre mot pour désigner **les ondes électromagnétiques**.
Une onde est caractérisée par sa longueur d'onde λ et par sa fréquence f.
f. λ = c : vitesse de la lumière dans le vide

$\lambda_{rouge} = 710^{-7}$ m $\rightarrow$ f rouge = $\frac{c}{\lambda_{rouge}} = 4.210^{14}$ hz

Tout objet qui est à une température différente du zéro absolu émet du rayonnement à toutes les longueurs d'ondes.

La quantité d'énergie rayonnée à chaque λ dépend de la température.

Un objet à 800°C paraît rouge, parce qu'il émet surtout du rayonnement dont la longueur d'onde λ correspond au rouge.

Un objet chauffé à 3000°C paraît blanc car les λ émis appartiennent au spectre visible.

La longueur d'onde à laquelle le rayonnement est les plus intense est donnée par **la loi de Wien.**

$$\lambda = \frac{\beta}{T} \qquad \beta = 2.89810^{-3}\ \text{m.K}$$

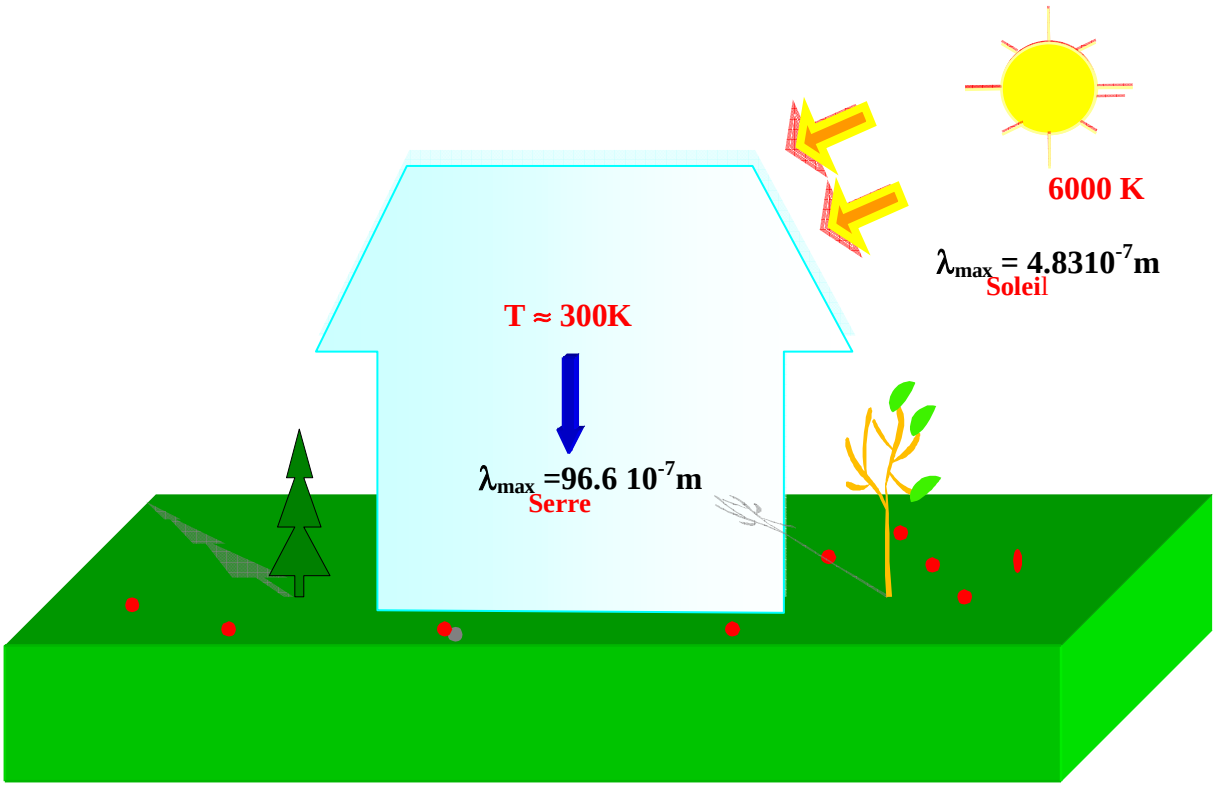
Exemple :

La température de la surface du soleil est 6000K. Calculer λ pour laquelle l'émission d'énergie est maximum. $\lambda_{max} = \frac{2.89810^{-3}}{6000} = 4.8310^{-7}$ m

Le maximum du rayonnement solaire se trouve dans la partie visible du spectre.

La variation de λ_{max} avec la température a de nombreuses conséquences très importantes.

Effet de serre :



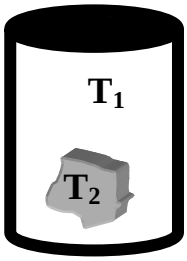
Serre en verre

Le rayonnement solaire, intense à $\lambda_{max} = 4.8310^{-7}$ m traverse la serre en verre. Il est absorbé par les objets qui réemettent du rayonnement à $\lambda_{max} = 96.610^{-7}$ m car la température de la serre est approximativement 300K.
Cette longueur d'onde se trouve dans l'infrarouge. **La serre va s'échauffer**.
La terre peut être considérée comme une immense serre. L'atmosphère joue le rôle du vitrage.
La vapeur d'eau et le CO_2 présents dans l'air sont d'excellents absorbants **de l'infrarouge.**
La lumière visible traverse l'atmosphère plus facilement que **l'infrarouge qui est piégé**.
La température du sol est donc plus élevée et plus stable en présence de l'atmosphère.
La combustion des matières fossiles (pétrole, charbon naturel, bois) augmente la teneur en CO_2 dans l'atmosphère ce qui conduit à un **accroissement de la température moyenne de la terre** appelé **" Problème d'effet de serre "**.

La puissance électromagnétique émise par une surface d'aire **A** à la température T est donnée **par la loi de Stefan (1879)** :

$$\mathbf{H = e\ \sigma\ A\ T^4}$$

σ = constante de Stefan = 5.6710^{-8} Wm^{-2} K^{-4}
e = émissivité
e dépend de la nature et de l'état de la surface ; $0 \leq e \leq 1$
La loi de Stefan semble vouloir dire qu'un objet rayonnera de l'énergie jusqu'à ce que sa température atteigne le zéro absolu.
En fait l'objet rayonne de l'énergie vers son environnement, mais il absorbe aussi de l'énergie en provenance de cet environnement.
On considère un objet à T_2 placé dans un récipient à T_1



Si $T_2 > T_1$, la température de l'objet diminue jusqu'à ce que l'objet et le récipient soient à la même température T_1.
A ce stade l'objet émet de l'énergie à la puissance $e\ \sigma\ A\ T_2^4$, et il absorbe de l'énergie rayonnée par le récipient avec la puissance $e\ \sigma\ A\ T_1^4$.

Au moment où $T_1 < T < T_2$
La puissance calorifique perdue vaut :

$$H_{net} = H_{ém} - H_{ab} = e\ \sigma\ A\ (T^4 - T_1^4)$$

On montre qu'on peut employer la même valeur de l'émissivité pour l'émission et l'absorption.
Exemple :
La température de la peau d'une personne est 33°C = 306 K. Les murs de la pièce dans laquelle elle se trouve sont à 29°C = 302 K.
Sachant que l'émissivité e = 1 et S_{corps} = 1.5 m^2, calculer la puissance perdue par rayonnement.

$\mathbf{H_{ém} = e\ \sigma\ A\ T_2^4 = 1 \times 5.67\ 10^{-8} \times 1.5 \times (306)^4}$

$\mathbf{= 746\ W}$

$\mathbf{H_{ab} = e\ \sigma\ A\ T_1^4 = 1 \times 5.67\ 10^{-8} \times 1.5 \times (302)^4}$

$\mathbf{= 707\ W}$

$\mathbf{H_{net} = 746 - 707 = 39\ W}$

$H_{ém}$ = 746 W représente 6 fois le dégagement de chaleur typique par un être humain. Une personne qui perdrait autant de chaleur sans rien absorber gèlerait rapidement.