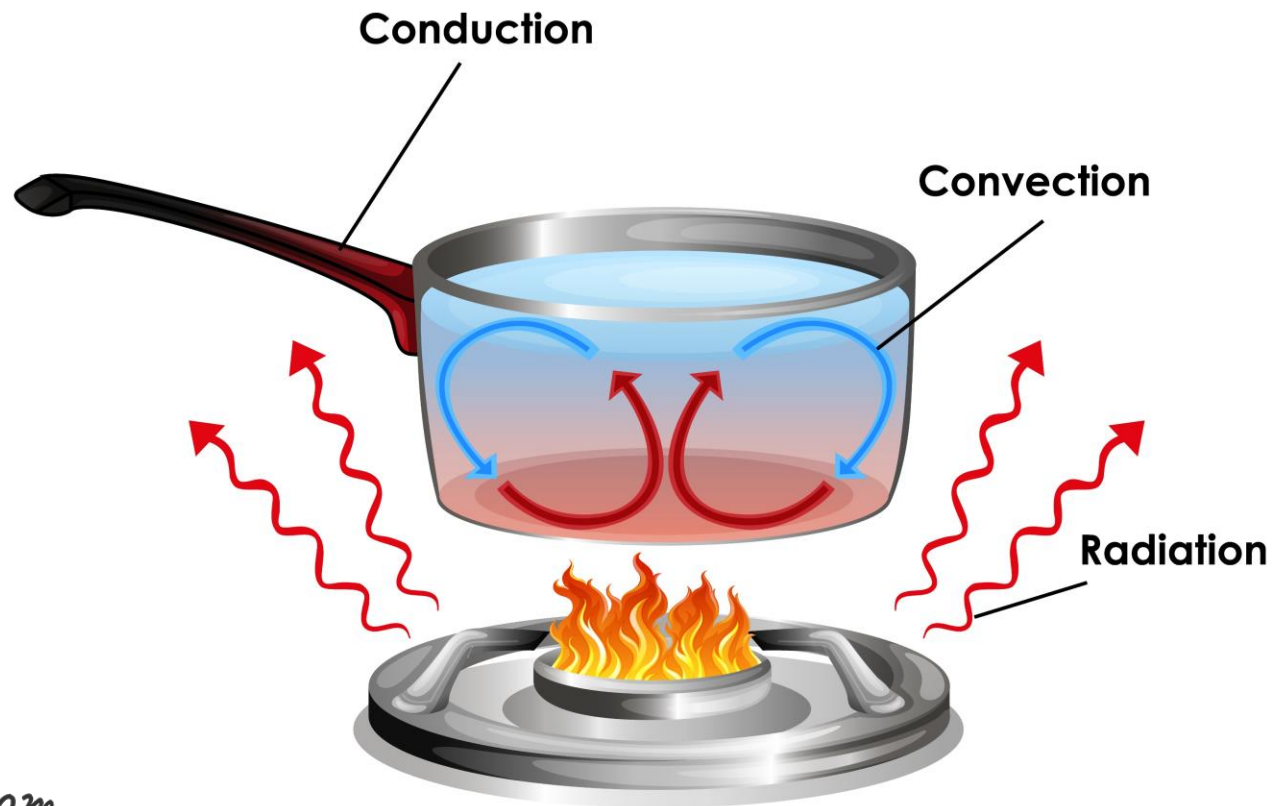


Cours Transferts Thermiques



<https://www.bazgaou.com>

Heat Transfer



Chapitre I : Introduction aux transferts thermiques

Chapitre II : Conduction de la chaleur

Chapitre III : Transfert de chaleur par Convection

Chapitre IV : Transfert de chaleur par Rayonnement

I. Introduction aux Transferts Thermiques

Les lois de base du transfert de chaleur sont reliées à la thermodynamique :

première loi de la thermodynamique c'est le principe de conservation de l'énergie. Cette loi stipule que la variation de l'énergie interne dans un système fermé est égale à la somme du flux de chaleur qui traverse le système et de la chaleur produite par le système : $\Delta U = Q + W$

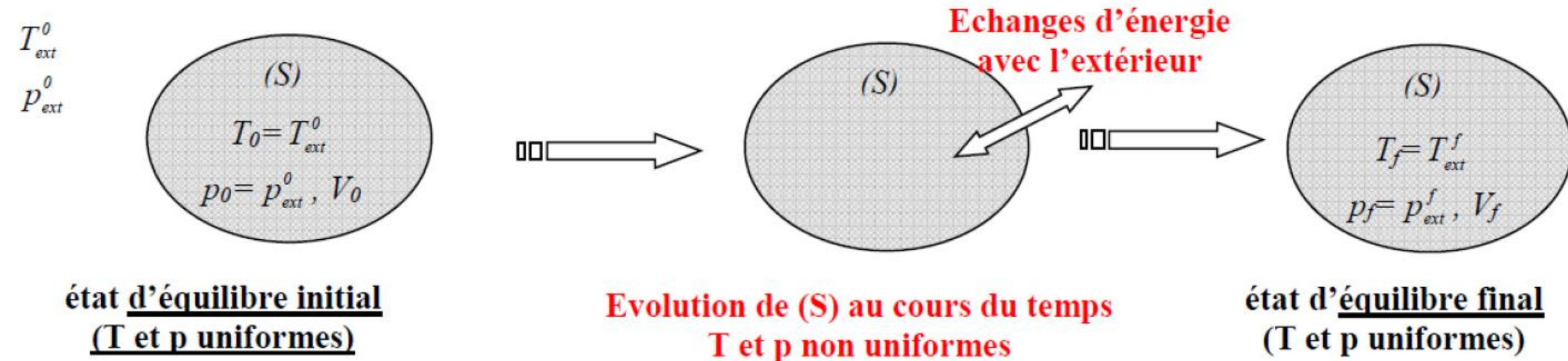
Q est le taux de transfert de chaleur et W le travail apporté au système.

C'est le principe de base du transfert de chaleur,

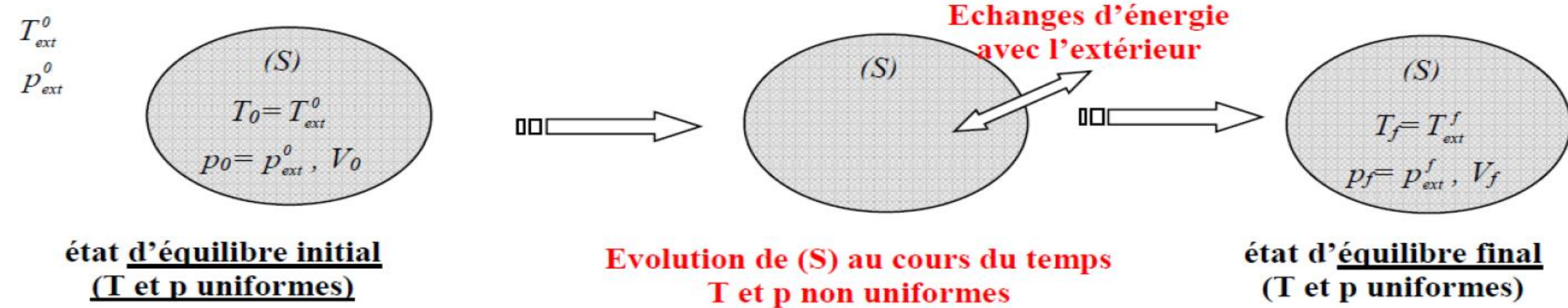
deuxième principe de la thermodynamique cette loi donne le sens du transfert de chaleur. Le transfert de chaleur se fait toujours dans le sens inverse du gradient de température, c'est-à-dire que le flux de chaleur se déplace de la température la plus chaude à la température la plus froide,

I. Introduction aux Transferts Thermiques

La thermodynamique nous apprend que l'énergie peut être transférée à partir d'interactions entre le système et son environnement, sous forme de chaleur et de travail. Cependant, **la thermodynamique ne se préoccupe que de l'état initial et de l'état final du système à l'équilibre**, et ne fournit aucune information sur la nature des interactions mises en jeu et sur l'évolution temporelle du système entre les deux états d'équilibre.



I. Introduction aux Transferts Thermiques

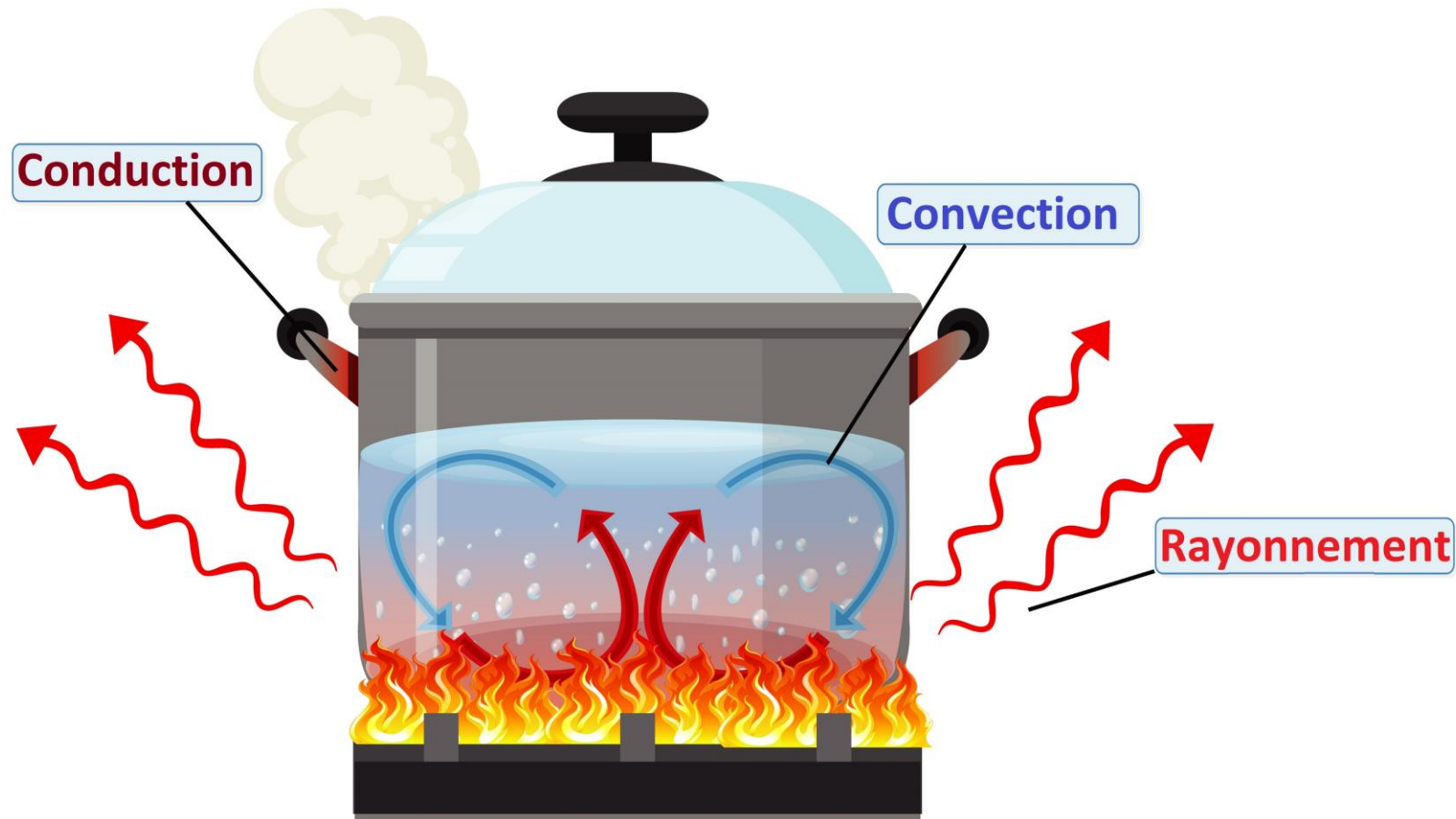


Un transfert de chaleur au sein d'un système ne se produit que s'il existe des gradients de température entre les différentes parties du système, ce qui implique que celui-ci n'est alors pas à l'équilibre thermodynamique (la température n'est pas uniforme dans tout le système).

Le but de l'analyse des transferts de chaleur est *d'identifier quels sont les modes de transfert mis en jeu au cours de la transformation et de déterminer quantitativement comment varie la température en chaque point du système au cours du temps.*

I. Introduction aux Transferts Thermiques

I. Les trois modes de transfert de chaleur



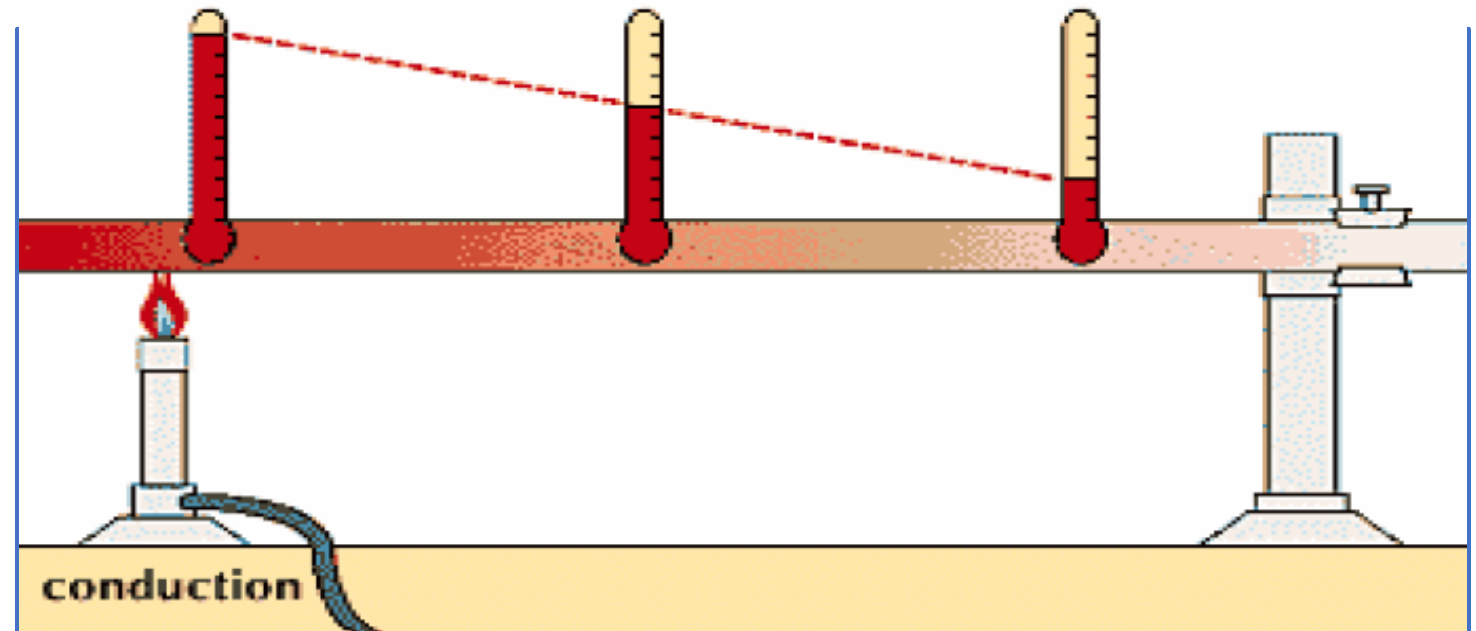
I. Introduction aux Transferts Thermiques

I. Les trois modes de transfert de chaleur

1) Transfert de chaleur par Conduction

La conduction est un mode de transfert de chaleur **dans un milieu solide ou fluide qui ne bouge pas**. L'activité des atomes ou des molécules permet de transférer l'énergie cinétique des vibrations moléculaires du milieu qui a le plus d'énergie vers le milieu qui en a le moins.

Ce mode de transfert de chaleur existe dans tous les solides. Il existe parfois dans les gaz qui ne bougent pas.



I. Introduction aux Transferts Thermiques

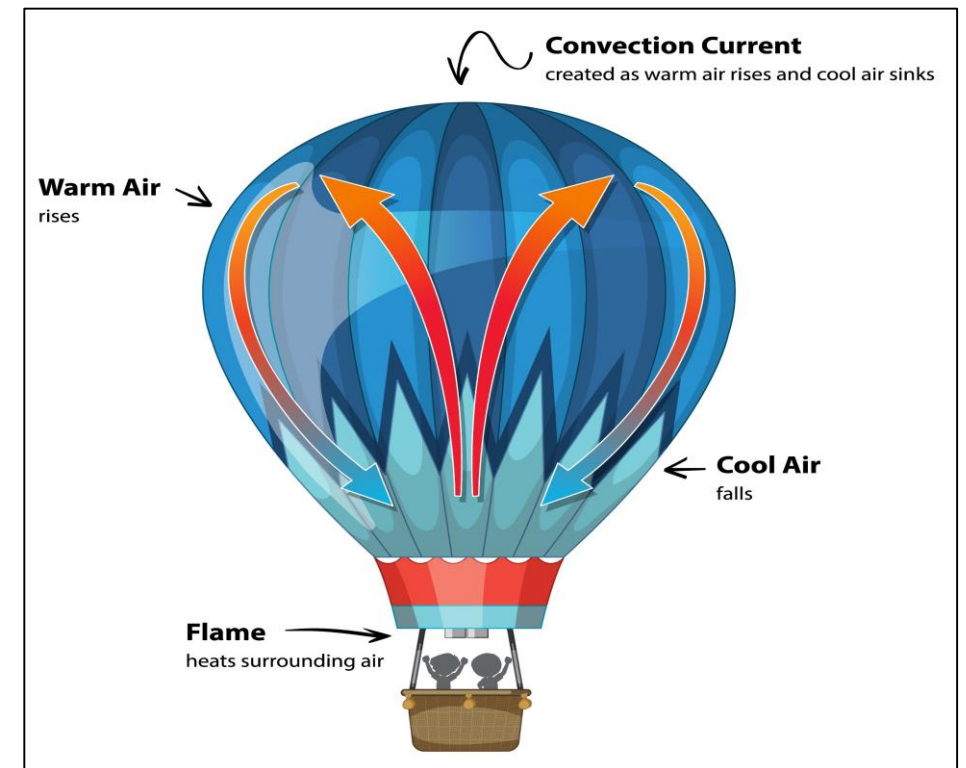
I. Les trois modes de transfert de chaleur

2) Transfert de chaleur par Convection

La convection est le transfert de chaleur accompagné de vitesse. Il se déroule **entre une surface solide et un fluide en déplacement**. La chaleur est transportée grâce à la conduction et grâce au mouvement du fluide.

Le transfert de chaleur par convection est indépendant des propriétés du matériau qui est en contact avec le fluide. Il ne dépende que du fluide. **La géométrie et la nature de la surface ont une influence sur la convection.**

Des exemples de convection existent : le vent qui transporte de la chaleur, l'eau qui bout, le ventilateur qui rafraichit l'air ambiant ...



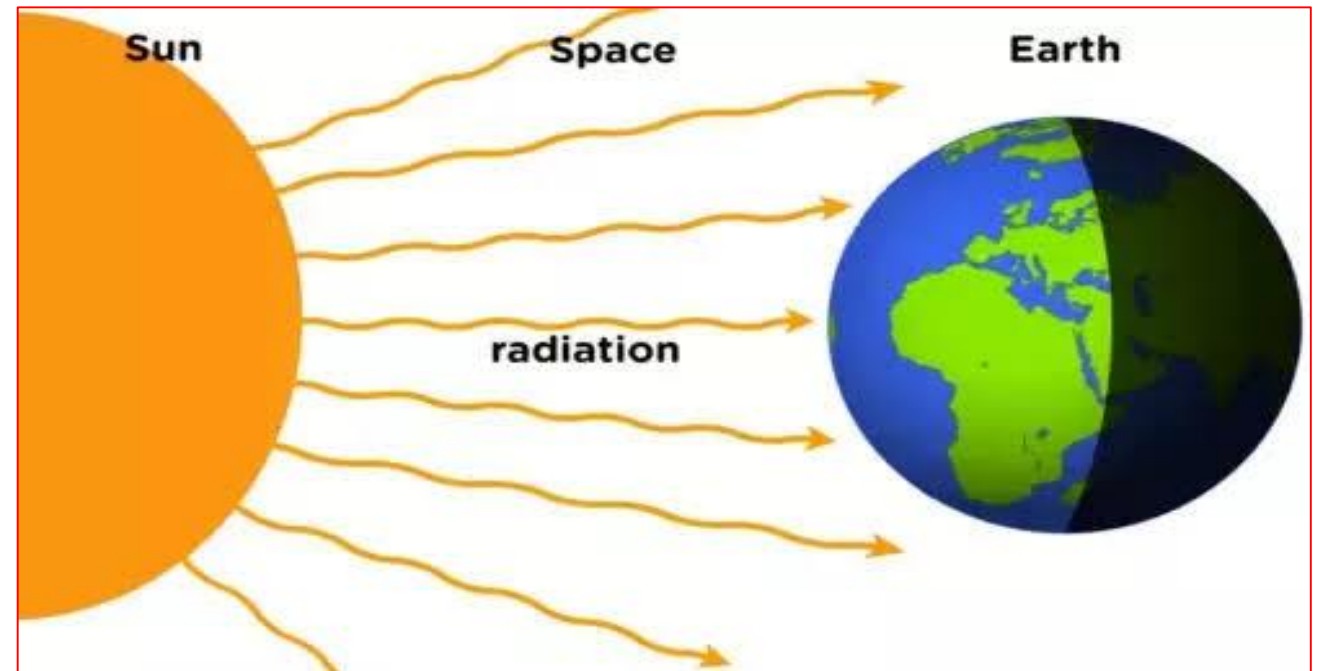
I. Introduction aux Transferts Thermiques

I. Les trois modes de transfert de chaleur

3) Transfert de chaleur par Rayonnement

Le rayonnement est un transfert de chaleur **sans support matériel**. Il a lieu grâce aux photons. Dans le rayonnement, **la chaleur est transportée par des ondes électromagnétiques**. L'exemple le plus connu est la chaleur du soleil.

La chaleur se propage mieux par rayonnement dans le vide. Le rayonnement dépend de la nature de la surface et de sa matière.



I. Introduction aux Transferts Thermiques

I. Les trois modes de transfert de chaleur

4) Exercice d'application

1 Trouver les modes de transfert de chaleur qui interviennent dans chaque cas :

- a. Rayons de soleil sur une route
- b. Le transfert de chaleur des personnes dans une salle de température basse
- c. Un chauffe-eau électrique
- d. Un moteur à combustion interne

Réponses

1. a : rayonnement, conduction – b convection – c convection – d conduction, convection et rayonnement

I. Introduction aux Transferts Thermiques

I. Les trois modes de transfert de chaleur

4) Exercice d'application

2 Une conduite qui transporte de la vapeur à 300°C traverse une pièce dans laquelle l'air est à 30°C . La plus grande partie des pertes de chaleur a lieu par :

a. conduction vers l'air ambiant ☐

b. convection vers l'air ambiant ☒

c. rayonnement ☐

d. conduction et convection ☐

I. Introduction aux Transferts Thermiques

II. Flux et densité du flux de chaleur

1) Densité de flux

Le flux de chaleur Φ représente la puissance de chaleur transmise ou transportée. Son unité est donc le **Watt**. Le flux de chaleur est transporté dans le sens inverse du gradient de température. Le gradient de température est de la température la plus basse vers la température la plus élevée, le flux de chaleur est transporté de la température la plus élevée à la plus basse.

La **densité du flux** ϕ est égale au flux divisé par la surface que traverse ce flux : $\phi = \frac{\Phi}{S}$

L'unité de ϕ est W/m^2 .

On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps: $\phi = \frac{dQ}{dt}$ en W

Le flux de chaleur est positif par convention.

II. Flux et densité du flux de chaleur

2) Flux stocké

Le stockage d'énergie dans un corps correspond à une augmentation de son énergie interne au cours du temps d'où (à pression constante) :

$$\varphi_{st} = \rho c V \frac{\partial T}{\partial t}$$

Où :

φ : Flux de chaleur stocké en [W]

ρ : est la masse volumique en (Kg/m^3)

c : chaleur massique ($\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

t : est le temps en (s)

V : est le volume en (m^3)

I. Introduction aux Transferts Thermiques

II. Flux et densité du flux de chaleur

3) Flux généré

Il est due à l'existence d'une source d'énergie (chimique, électrique, mécanique, nucléaire) dont le flux est convertie en énergie thermique. Il s'écrit sous la forme suivante :

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

Où :

φ_g : Flux de chaleur générée en [W]

$\dot{q}$: est la densité volumique d'énergie générée en (W/m^3)

V: est le volume en (m^3)

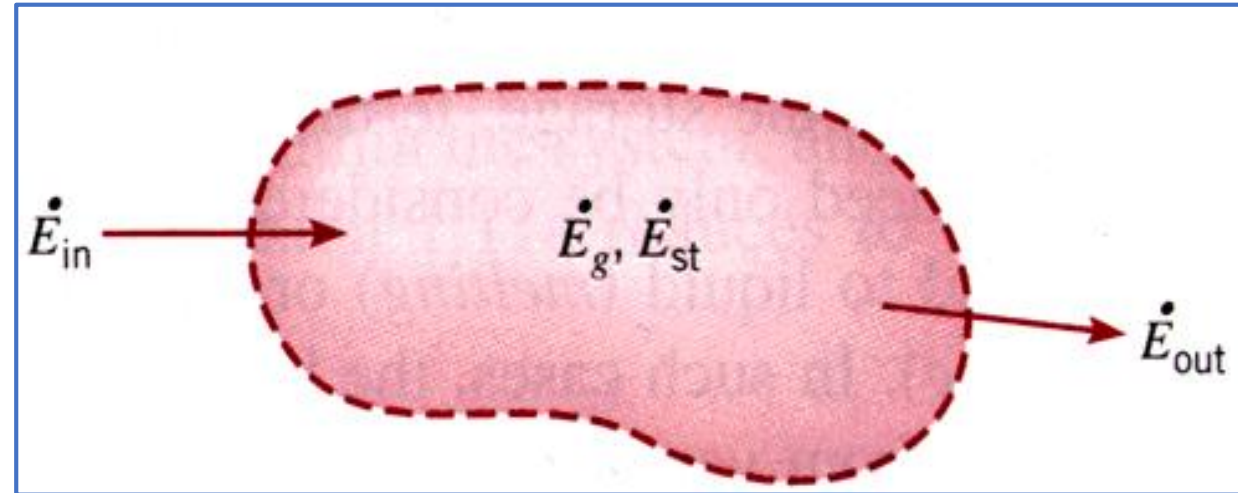
I. Introduction aux Transferts Thermiques

II. Flux et densité du flux de chaleur

4) Bilan d'énergie

Considérons un système (S) délimité dans l'espace et établissons l'inventaire des différents flux de chaleur qui influent sur l'état du système et qui sont comme illustrés sur le schéma ci-dessous :

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_g = \dot{E}_{st}$$



Où :

$\dot{E}_{st}$ est le flux d'énergie stockée en W.

$\dot{E}_g$ est le flux d'énergie générée par une source en W.

$\dot{E}_{out}$ et $\dot{E}_{in}$ désignent respectivement les flux d'énergie sortant et entrant en W.

III. Lois de base du transfert de chaleur

Pour chaque mode de transfert de chaleur, il existe une loi qui donne l'expression du flux de chaleur.

1) Conduction : loi de Fourier

Quand la chaleur est transmise par conduction thermique, le flux est donné par la loi de Fourier :

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

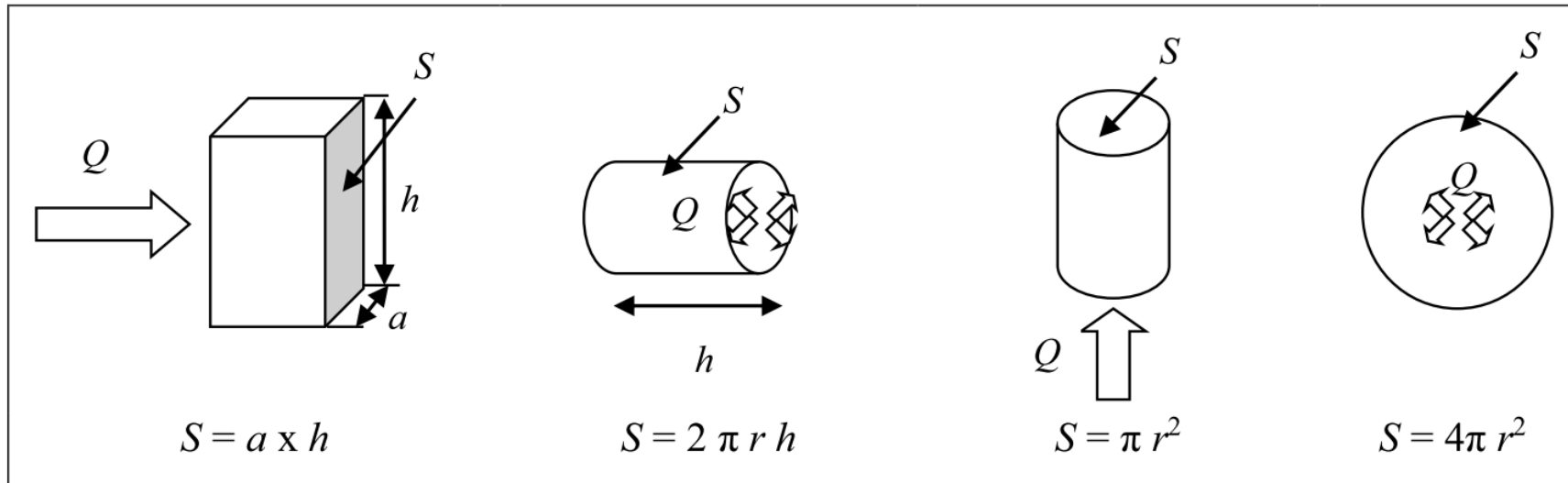
Dans cette expression, Q est le flux de chaleur (W), S la surface d'échange de chaleur (m^2), λ est le coefficient de conduction thermique ou conductivité thermique ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$), T est la température ($^\circ\text{C}$) et x l'abscisse (m).

I. Introduction aux Transferts Thermiques

III. Lois de base du transfert de chaleur

1) Conduction : loi de Fourier

La surface d'échange S est la surface qui est traversée par le flux de chaleur. La figure montre la manière de calculer cette surface dans différents cas.



Le **signe négatif** dans l'équation de Fourier reflète le **deuxième principe de la thermodynamique** : le flux de chaleur va dans le sens inverse du gradient de température, c'est-à-dire que le flux se déplace de la température la plus haute vers la plus basse.

I. Introduction aux Transferts Thermiques

III. Lois de base du transfert de chaleur

1) Conduction : loi de Fourier

La densité du flux de chaleur en conduction est donnée par l'expression :

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$

Si le régime est permanent, c'est-à-dire qu'il ne varie pas dans le temps, on a :

$$\frac{\partial T}{\partial x} \approx \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T_2 - T_1}{e}$$

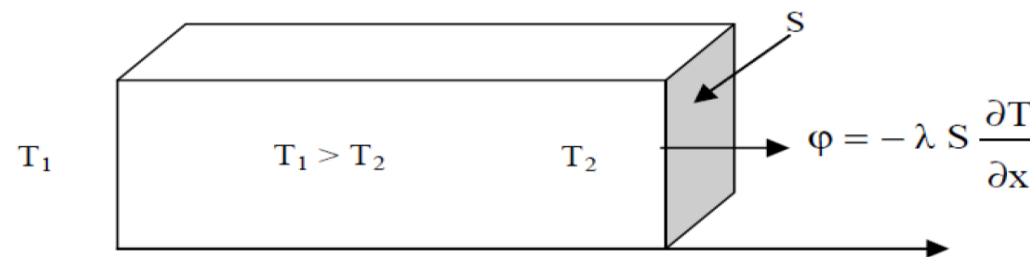
e est l'épaisseur. Donc :

$$Q = -\lambda S \frac{\Delta T}{\Delta x} = -\lambda S \frac{T_2 - T_1}{e}$$

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

La différence de température est égale à la température la plus basse moins la température la plus élevée si on garde le signe -, sinon, on prendra la température la plus élevée moins la plus basse si on enlève le signe -. Il faut trouver un flux positif. La densité du flux est alors :

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{e}$$



III. Lois de base du transfert de chaleur

1) Conduction : loi de Fourier

Exemple :

La paroi d'un four industriel a une épaisseur de 0,15m. Elle est fabriquée de briques de conductivité thermique 1,7W/m.K. Les mesures de la température ont donné 1400K et 1150K sur les deux faces de cette paroi. Quel est le flux de chaleur qui traverse cette paroi de dimensions 0,5m x 1,2m ?

Solution :

Le flux de chaleur est donné par la relation :

$$Q = -\lambda S \frac{\Delta T}{\Delta x} = -\lambda S \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} \quad \Rightarrow \quad Q = -1,7 \times 0,5 \times 1,2 \times \frac{1150 - 1400}{0,15} = 1700 \text{ W}$$

I. Introduction aux Transferts Thermiques

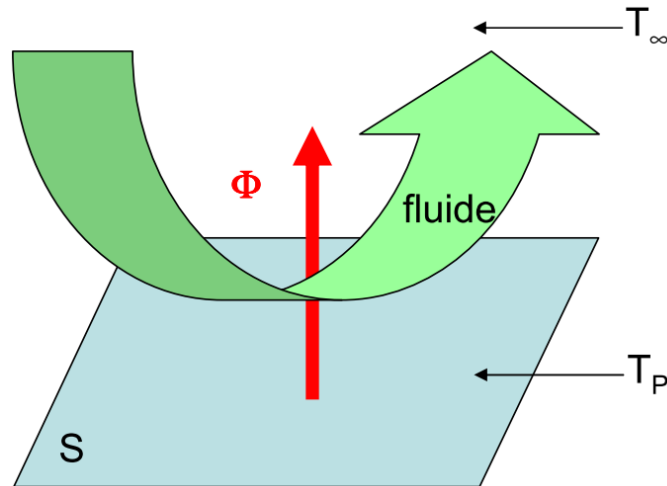
III. Lois de base du transfert de chaleur

2) Convection : loi de Newton

Puisque la convection se déroule entre une surface solide et un fluide (liquide ou gaz) en déplacement.

→ Ce phénomène peut se développer naturellement, sous l'effet des différences de densité : c'est la **CONVECTION NATURELLE**.

→ On peut aussi le générer mécaniquement à l'aide de pompes ou de ventilateurs : c'est la **CONVECTION FORCEE**.



$$\Phi = hS(T_p - T_\infty) \quad \text{loi de Newton}$$

Φ	Flux de chaleur transmis par convection	[W]
h	coefficient de transfert	[W.m ⁻² K ⁻¹]
T_p	température de la surface d'échange	[K, °C]
T_∞	température du fluide loin de la surface d'échange	[K, °C]
S	aire de la surface d'échange solide/fluide	[m ²]

III. Lois de base du transfert de chaleur

3) Rayonnement : loi de Stefan-Boltzmann

Le mode de transfert de chaleur par rayonnement diffère fondamentalement des deux premiers modes. La chaleur se propage via des ondes électromagnétiques. Celles-ci ne nécessitent pas un contact entre les corps qui échangent. Contrairement aux autres modes de transmission de chaleur, le rayonnement ne nécessite pas de milieu, il peut donc s'effectuer dans le vide. Cependant tout corps à température absolue non-nulle, émet des ondes électromagnétiques vers son environnement.

La valeur **maximale** de la densité de flux de chaleur émise par une surface est donné par **la loi de Stefan-Boltzmann** :

$$\varphi = \sigma T_s^4$$

T : Température de la surface [K]

φ : Flux de chaleur par unité de surface [W/m²]

σ : Constante de Stefan-Boltzmann = $5.67 \cdot 10^{-8}$ W/m² K⁴

Remarque : Un tel corps est appelé corps idéal ou corps noir.

III. Lois de base du transfert de chaleur

3) Rayonnement : loi de Stefan-Boltzmann

Le flux de chaleur émis par une **surface réelle** qui n'est pas idéale est plus petit que celui émis par un corps noir :

ε est une propriété de la surface appelée émissivité.

$$\varphi = \varepsilon \sigma T_s^4$$

Le flux de rayonnement qui atteint une surface s'appelle **irradiation**. Il provient de sources comme le soleil ou une lampe. Une partie de ce rayonnement est absorbée par la **surface environnante**, ce qui dépend de son absorbance α .

$$\varphi_{absorbé} = \alpha \sigma T_{s-env}^4$$

Si la surface de température T_s est couverte par un environnement de température T_∞ , le flux échangé par rayonnement est donné par :

$$\dot{Q} = S \sigma (\varepsilon T_s^4 - \alpha T_\infty^4)$$

ε : est le facteur d'émission de la surface

α : est le facteur d'absorption du milieu environnant

III. Lois de base du transfert de chaleur

3) Rayonnement : loi de Stefan-Boltzmann

Exemple

Une conduite transporte de la vapeur d'eau à travers une pièce large dans laquelle l'air et les murs sont à une température de 25°C. Le diamètre externe de la conduite est 70mm et la température de sa surface 200°C. Son émissivité est 0,8.

1. Quelle est la densité du flux d'émission de la surface de la conduite ?
2. Quelle est la densité du flux maximale de rayonnement de cette surface ?
3. Le coefficient de convection de la surface vers l'air ambiant est 15W/m².K et on considère la surface comme **grise**. Calculer la densité du flux de transfert de chaleur de cette surface par unité de longueur de la conduite ?

Rappel : On appelle **corps gris** une surface pour laquelle $\alpha = \epsilon$.

III. Lois de base du transfert de chaleur

3) Rayonnement : loi de Stefan-Boltzmann

Exemple : Solution

1. Densité du flux d'émission : $q_{surface} = \varepsilon \sigma T_p^4 = 0,8 \times 5,67 \times 10^{-8} \times (200 + 273,15)^4 = 2270 \text{ W / m}^2$

2. Densité du flux Max de rayonnement : $q_{max} = \sigma T_s^4 = 5,67 \times 10^{-8} \times (473)^4 = 2838.10 \text{ W / m}^2$

3. Flux de transfert de chaleur de cette surface :

$$Q_{tot} = Q_{ray} + Q_{conv} = hS(T_p - T_\infty) + \varepsilon S \sigma (T_p^4 - T_\infty^4) = S \times [h(T_p - T_\infty) + \varepsilon \sigma (T_p^4 - T_{senviron}^4)]$$
$$S = \pi \times D \times L = \pi \times 70 \times 10^{-3} \times L$$
$$Q_{tot} = \pi \times D \times L \times [h(T_p - T_\infty) + \varepsilon \sigma (T_p^4 - T_{senviron}^4)]$$

Densité du flux de transfert de chaleur de cette surface par unité de longueur de la conduite :

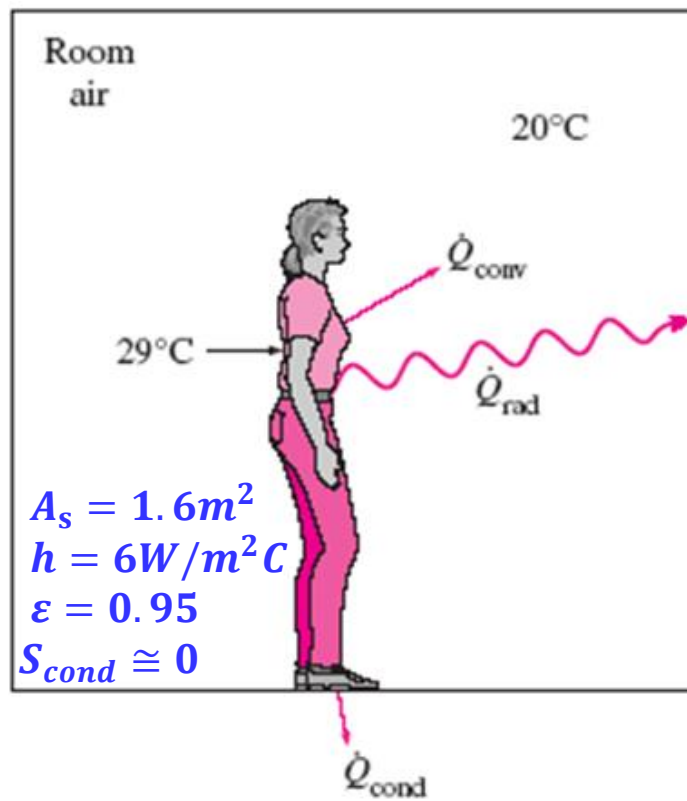
$$q_{tot} = \frac{Q_{tot}}{L} = \pi \times D \times [h(T_p - T_\infty) + \varepsilon \sigma (T_p^4 - T_{senviron}^4)]$$
$$= \pi \times 70 \times 10^{-3} \times [15(200 - 25) + 0,8 \times 5,67 \times 10^{-8} \times ((200 + 273,15)^4 - (25 + 273,15)^4)]$$
$$= 998 \text{ W / m.}$$

I. Introduction aux Transferts Thermiques

III. Lois de base du transfert de chaleur

3) Rayonnement : loi de Stefan-Boltzmann

Exemple 2 : Calcul des flux échangés



Flux de convection :

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{conv} &= hA_s (T_s - T_{\infty}) \\ &= (6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C})(1.6 \text{ m}^2)(29 - 20)^\circ\text{C} \\ &= 86.4 \text{ W}\end{aligned}$$

Flux de rayonnement :

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{rad} &= \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{surr}^4) \\ &= (0.95)(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(1.6 \text{ m}^2) \\ &\quad \times [(29 + 273)^4 - (20 + 273)^4] \text{ K}^4 \\ &= 81.7 \text{ W}\end{aligned}$$

Flux de conduction :

$$S_c \cong 0 \rightarrow \text{flux de conduction négligeable}$$

Flux total :

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} = (86.4 + 81.7) \text{ W} = 168.1 \text{ W}$$