

## 2.4 - Énergie thermique

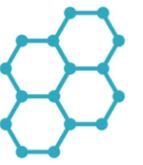
### 2.4.4 *Rayonnement*

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

*Département de génie mécanique*

François Relotius, M.ing.

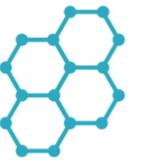
# Question



ENR2020

- Dans quel milieu le rayonnement thermique se propage-t-il le mieux ?
  - Dans les solides
  - Dans les liquides
  - Dans les gaz
  - Dans le vide
  - Aucune de ces réponses

# Question



ENR2020

- Dans quel milieu le rayonnement thermique se propage-t-il le mieux ?
  - **D**: Dans le vide sans aucun doute.
  - Il est diffusé dans les gaz, davantage dans les liquides et encore plus dans les solides dits semi-transparents (le verre). Le rayonnement est stoppé par les corps opaques à la vue s'il n'a pas suffisamment d'énergie et celle-ci dépend de sa longueur d'onde. Par exemple, un rayonnement visible ne passe pas à travers le corps humain, le corps est opaque au rayonnement visible (et autre rayonnement thermique aussi, IR). Mais les rayons X passent facilement à travers les chairs pour révéler l'ossature du corps humain.
  - Le rayonnement thermique émis par le soleil lui ne passe pas à travers le verre. Il est impossible de bronzer derrière une fenêtre. Il passe cependant facilement à travers la couche atmosphérique alors que le rayonnement thermique émis par la terre est en partie absorbé par la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone.

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Généralités
- Corps noir
- Corps réel
- Analogie
- Calcul des échanges thermiques
- Exemples
- Conclusion

# Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs de la capsule***
- Généralités
- Corps noir
- Corps réel
- Analogie
- Calcul des échanges thermiques
- Exemples
- Conclusion

# Introduction et objectifs

- Le rayonnement est l'un des trois modes de transfert thermique, avec la convection et la conduction.
- Le rayonnement thermique est l'énergie émise par la matière à une température non nulle. Ces radiations peuvent provenir de **surfaces solides, de liquides et de gaz**.
- Ce mode de transfert d'énergie n'a pas besoin d'un milieu matériel pour se produire. Il est le plus efficace dans le **vide**.

# Introduction et objectifs

- Objectifs de cette présentation
  - Comprendre le phénomène radiatif qui provient de tous types de corps, solides, liquides ou gazeux.
  - Découvrir la méthodologie permettant de quantifier les pertes thermiques
  - Connaître l'analogie qui existe avec la résistance thermique

# Plan de la présentation

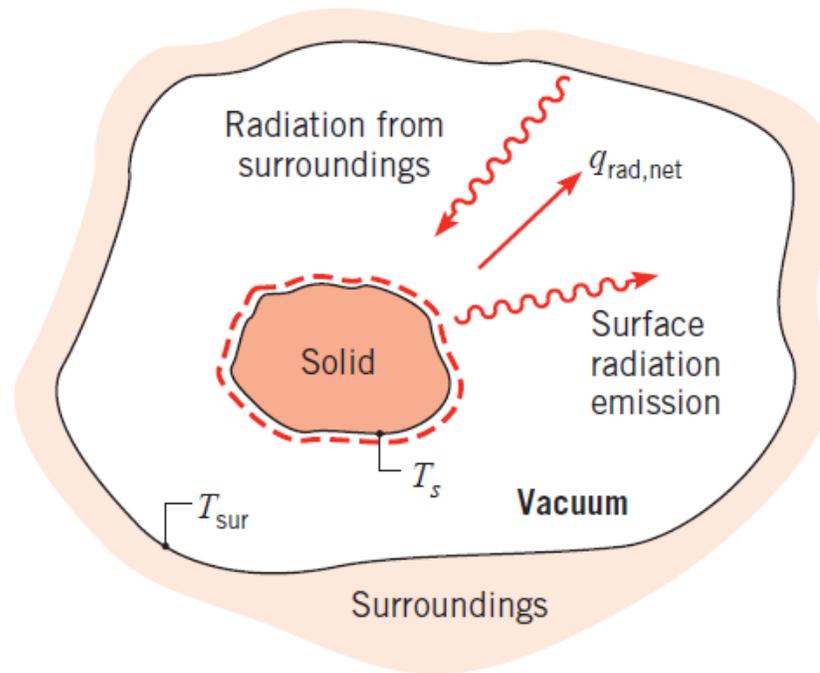
- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Généralités***
- Corps noir
- Corps réel
- Analogie
- Calcul des échanges thermiques
- Exemples
- Conclusion

# Généralités

- Qu'est-ce que le rayonnement?
  - *Transfert de chaleur par des ondes électromagnétiques d'un corps chaud vers un corps froid **et inversement**.*
  - *Tout corps émet un rayonnement dont la longueur d'onde dépend de sa température*
  - *Le rayonnement est due aux oscillations et transitions d'états des électrons formant la matière.*
  - ***Pour effectuer des calculs, il faut considérer les températures en degrés Kelvin [K] et non en degrés Celsius [°C].***

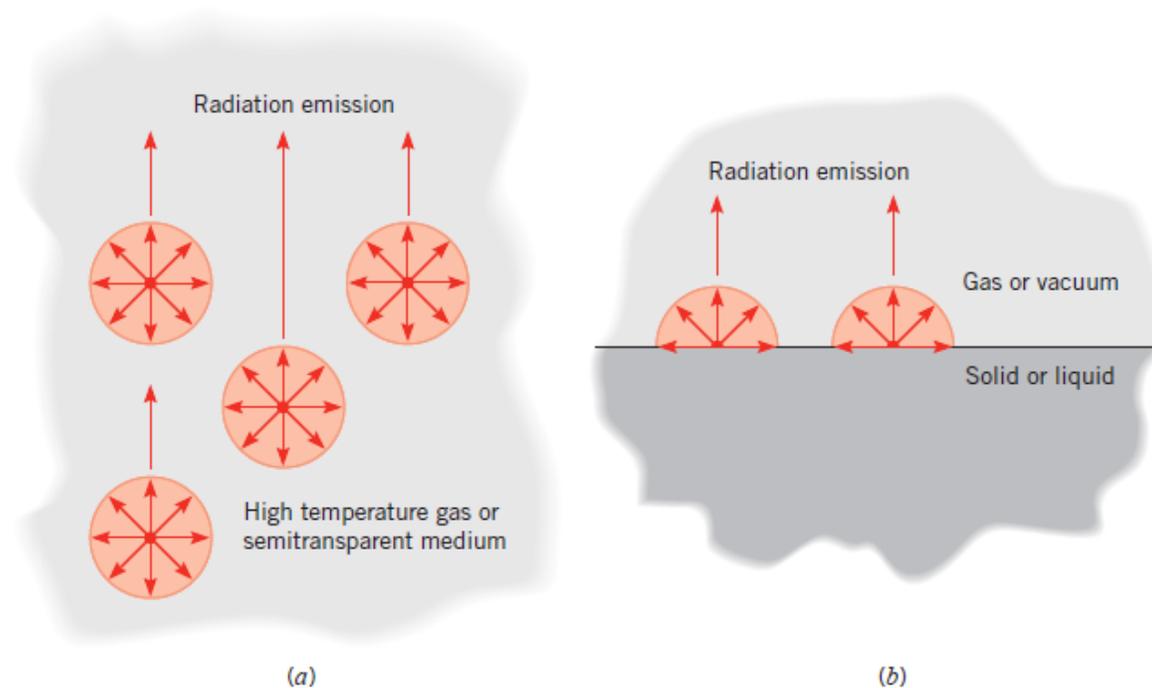
# Généralités

- Taux de transfert
  - Si  $T_s > T_{sur}$  alors  $q_{rad,net}$  sort du solide et le solide atteindra éventuellement  $T_{sur}$



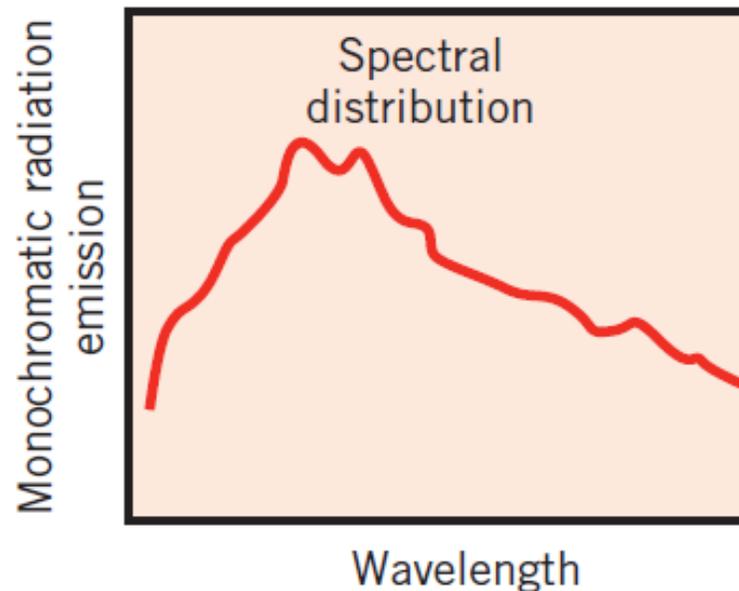
# Généralités

- Nature volumétrique du phénomène
  - L'émission radiante est volumétrique, mais pour un solide ou un liquide opaque **on considère un phénomène surfacique.**



# Généralités

- Caractéristiques du rayonnement
  - *Aspect spectral* : l'émission dépend de la longueur d'onde
    - Une surface opaque n'émet pas à une seule longueur d'onde mais possède un spectre d'émission



# Généralités

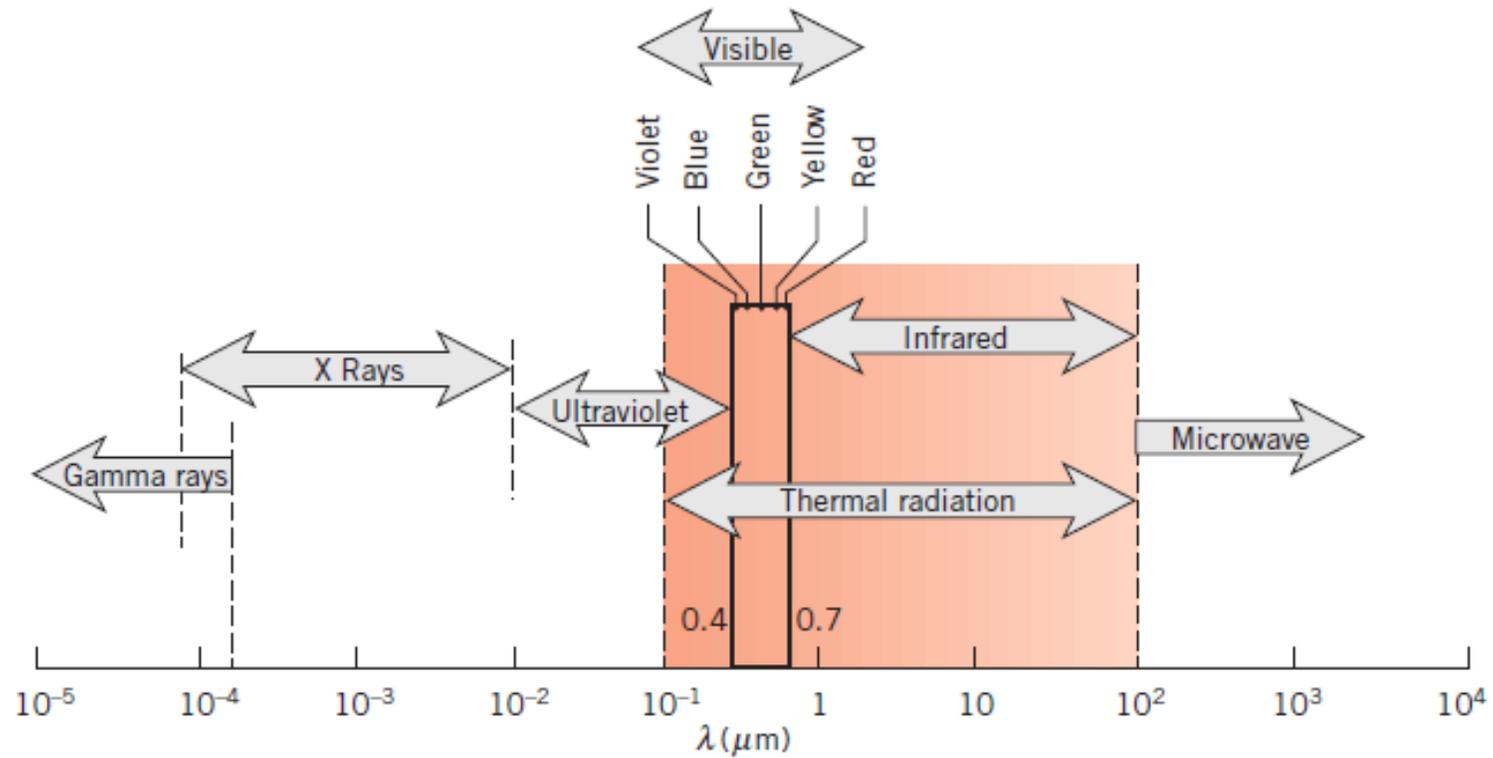
- Caractéristiques du rayonnement
  - L'aspect spectral est caractérisé par une fréquence et une longueur d'onde

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

- Où  $\lambda$  est la longueur d'onde,
- $c$  est la vitesse de la lumière dans le milieu,
- $\nu$  est la fréquence,
- $c_0$  est la vitesse de la lumière dans le vide soit  $2.998 \times 10^8 m/s$

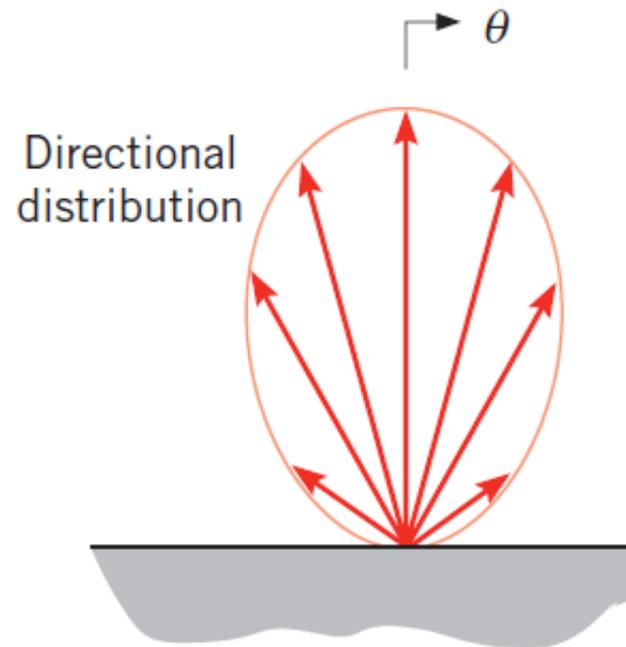
# Généralités

- Caractéristiques du rayonnement
  - Spectre électromagnétique du rayonnement



# Généralités

- Caractéristiques du rayonnement
  - *Aspect directionnel: l'émission dépend de la direction de propagation*
    - Une surface opaque n'émet pas dans une seule direction mais possède une distribution de directions



# Plan de la présentation

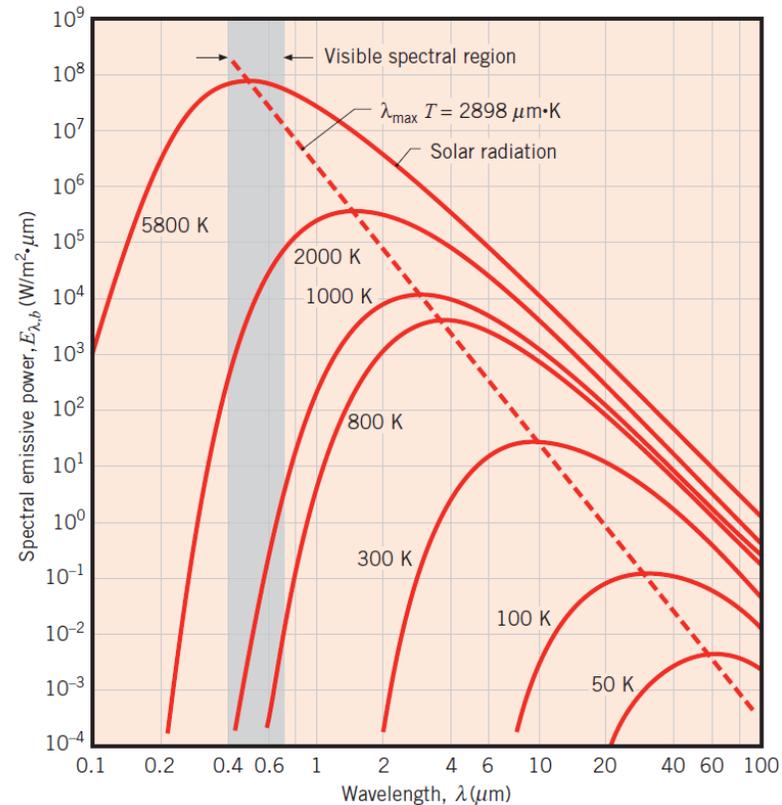
- Introduction et objectifs de la capsule
- Généralités
- ***Corps noir***
- Corps réel
- Analogie
- Calcul des échanges thermiques
- Exemples
- Conclusion

# Corps noir

- Un corps noir est un corps idéal qui **absorbe toute la radiation incidente** (toute la lumière, tous les UV, tout l'infra-rouge, etc. quelque soit sa longueur d'onde) à une température donnée.
- Un corps noir est un corps idéal qui **émet le maximum de radiation** de façon diffuse (également dans toutes les directions).
- Il existe plusieurs lois permettant de quantifier l'émissivité des corps noirs.

# Corps noir

- Distribution spectrale du pouvoir émissif d'un corps noir,  $E_{\lambda,b}$  pour différentes températures



# Corps noir

- La distribution de Planck (**Loi de Planck**)
  - Le pouvoir émissif spectral d'un corps noir (émetteur diffus) à une température donnée :

$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \pi I_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]}$$

$$C_1 = 3,742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \frac{\mu\text{m}^4}{\text{m}^2}$$

$$C_2 = 1,439 \times 10^4 \mu\text{m}/\text{K}$$

# Corps noir

- Loi de Wien

- Le pouvoir émissif d'un corps noir,  $E_{\lambda,b}$  possède un maximum pour une certaine longueur d'onde.
- Ce maximum est donné par:

$$\lambda_{max}T = C_3 = 2898 \mu\text{m K}$$

- Cas du soleil à  $\lambda_{max} = 0,5 \mu\text{m}$
- Attention,  $T$  est en Kelvin!

# Corps noir

- **Loi de Stefan-Boltzmann**

- Intégrale de la loi de Planck sur tout  $\lambda$
- Pouvoir émissif total d'un corps noir :

$$E_b = \int_0^{\infty} E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \int_0^{\infty} \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2 / \lambda T) - 1]} = \sigma T^4$$

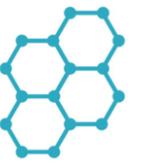
$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$$

- $\sigma$  est connue sous le nom de constante de Stefan-Boltzmann

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Généralités
- Corps noir
- ***Corps réel***
- Analogie
- Calcul des échanges thermiques
- Exemples
- Conclusion

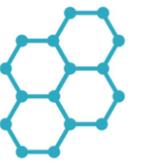
# Question



ENR2020

- Comment peut se comporter une radiation incidente au contact d'un corps ?
  - Elle peut être absorbée
  - Elle peut être transmise
  - Elle peut disparaître
  - Elle peut être réfléchie
  - Aucune de ces réponses

# Question



ENR2020

- Comment peut se comporter une radiation incidente au contact d'un corps ?
  - Elle peut être absorbée
  - Elle peut être transmise
  - Elle peut être réfléchie
  - Donc A, B, et D

# Corps réel

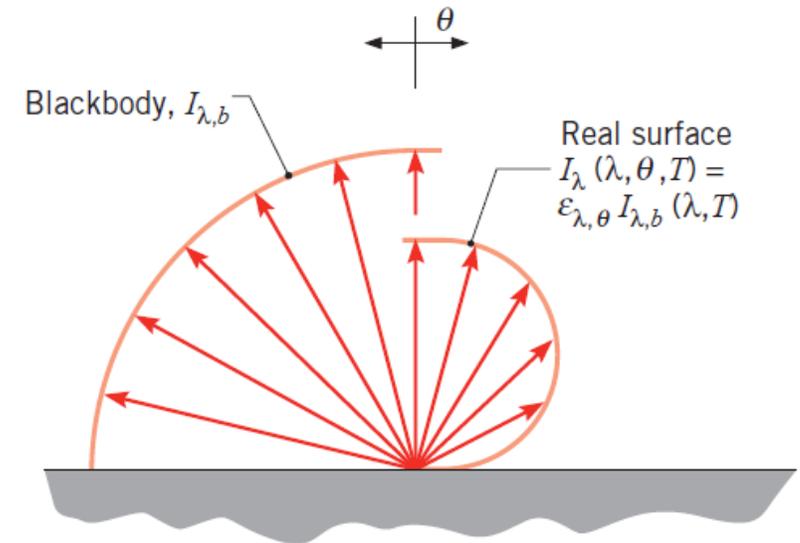
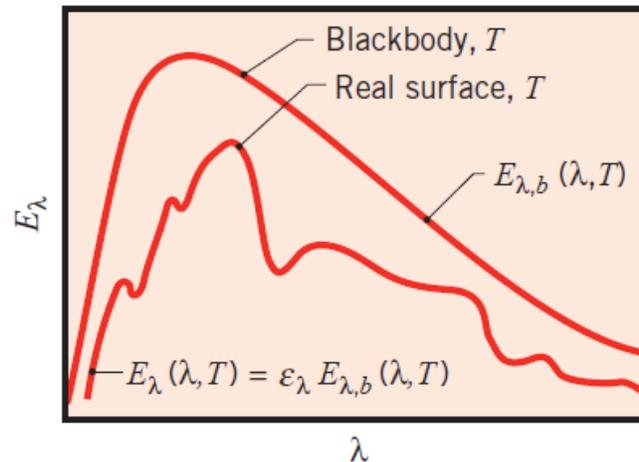
- Corps gris

- On le caractérise à l'aide de l'émissivité,  $\varepsilon$

- Ratio du pouvoir émissif total hémisphérique d'une surface réelle par rapport à celui d'un corps noir de même température :

$$\varepsilon = \frac{E(T)}{E_b(T)} = \frac{E(T)}{\sigma T^4}$$

$$E(T) = \varepsilon \sigma T^4$$

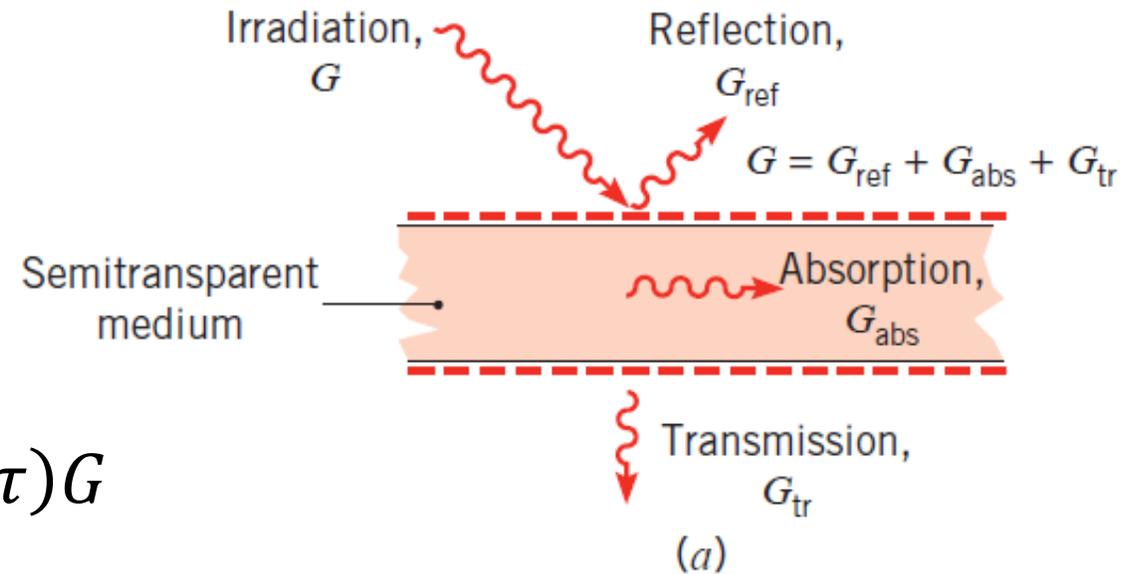


# Corps réel

- Matériau partiellement transparent
  - L'irradiation ( $G$ ) peut être :
    - Absorbée
    - Réfléchi
    - Transmise

$$G = \alpha G + \rho G + \tau G = (\alpha + \rho + \tau)G$$

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$



# Corps réel

- Absorptivité  $\alpha$ 
  - Propriété qui détermine la fraction de l'irradiation absorbée par un volume. Cette propriété dépend de la direction d'incidence et de la longueur d'onde.
- Transmissivité  $\tau$ 
  - Propriété qui détermine la fraction de l'irradiation transmise à travers un volume. Cette propriété dépend de la longueur d'onde. Nulle pour un matériau opaque.

# Corps réel

- Matériau opaque

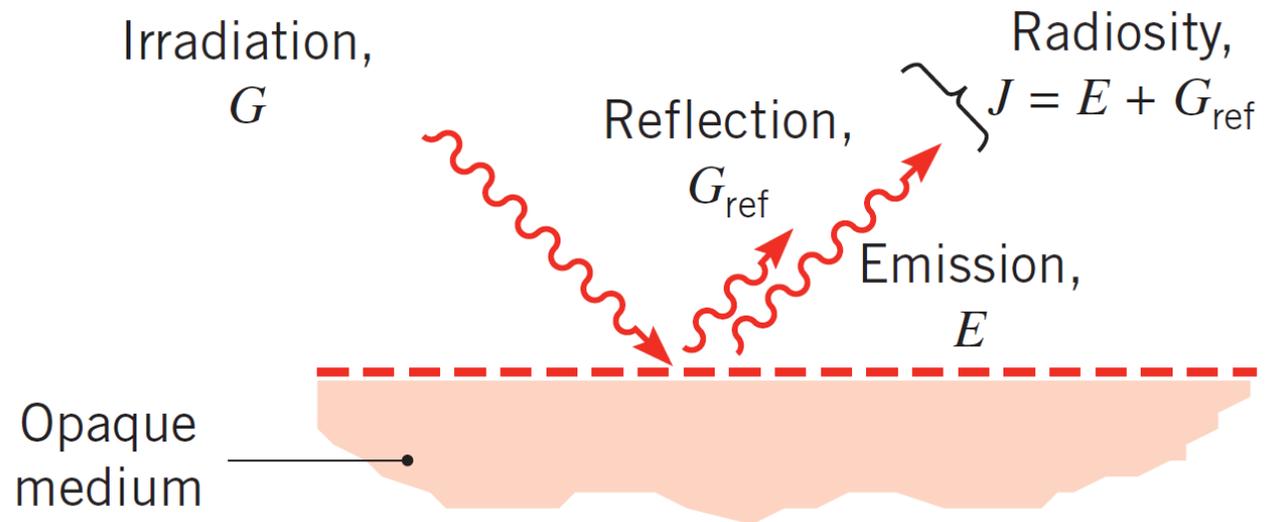
$$\tau = 0$$

– Donc, dans ce cas, l'irradiation ( $G$ ) peut uniquement être :

- Absorbée
- Réfléchie

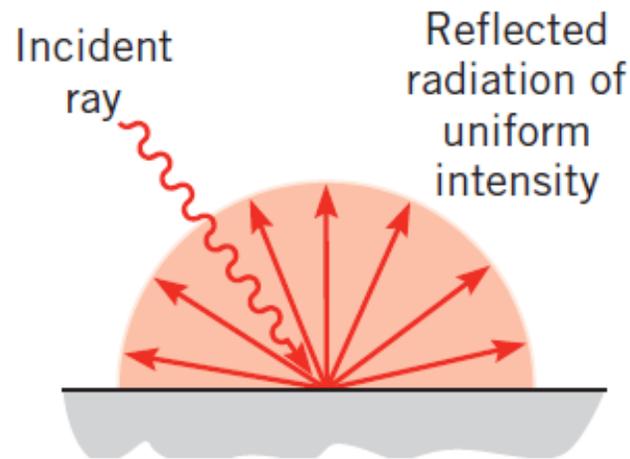
– Et ainsi,

$$\alpha + \rho = 1$$

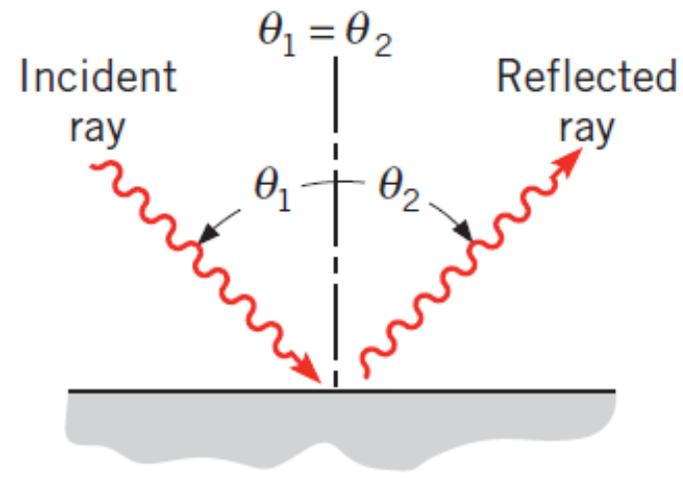


# Corps réel

- Réflectivité  $\rho$ 
  - Propriété qui détermine la fraction de l'irradiation réfléchie par une surface. Cette propriété dépend de la **direction d'incidence et de la direction de réflexion** de même que de la longueur d'onde.



Réflexion diffuse



Réflexion spéculaire

# Corps réel

- Loi de Kirchhoff

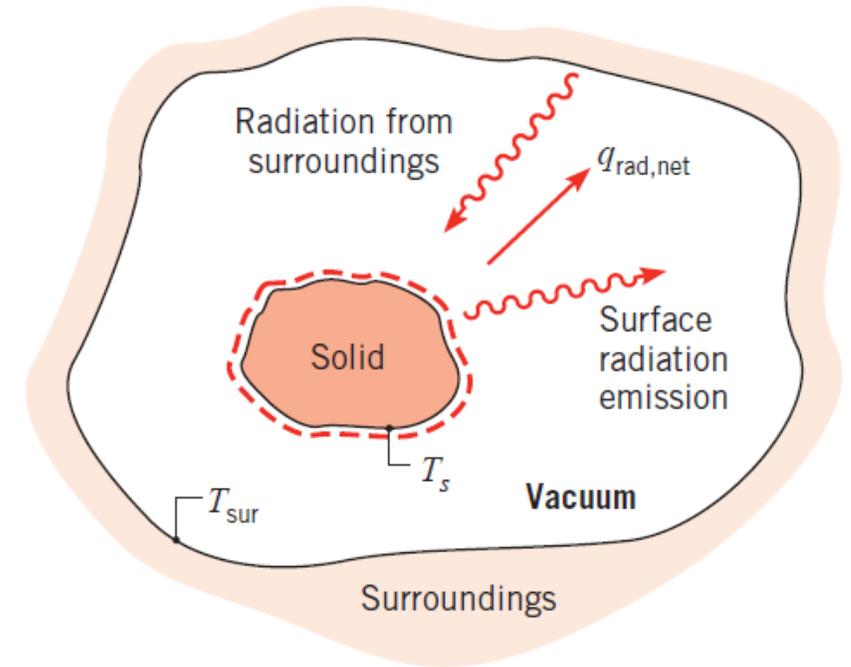
$$\varepsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda}$$

– Dans ce cours, on fera l'hypothèse :

$$\varepsilon = \alpha$$

Cette hypothèse est presque toujours vraie sauf si les sources d'irradiation et d'émission sont à des températures très différentes.

Exemple : irradiation solaire alors on emploiera deux valeurs dont l'absorptivité au rayonnement solaire  $\alpha_s$



# Corps réel

- La difficulté dans les problèmes de radiation consiste à déterminer  $G$

Émis    Absorbé    Corps gris  
↑        ↑        ↑

$$q_{rad}'' = E - \alpha G = \varepsilon E_b - \alpha G$$

$$q_{rad}'' = \varepsilon(E_b - G) \text{ car } \varepsilon = \alpha$$

$$q_{rad}'' = \varepsilon(\sigma T^4 - G)$$

# Corps réel

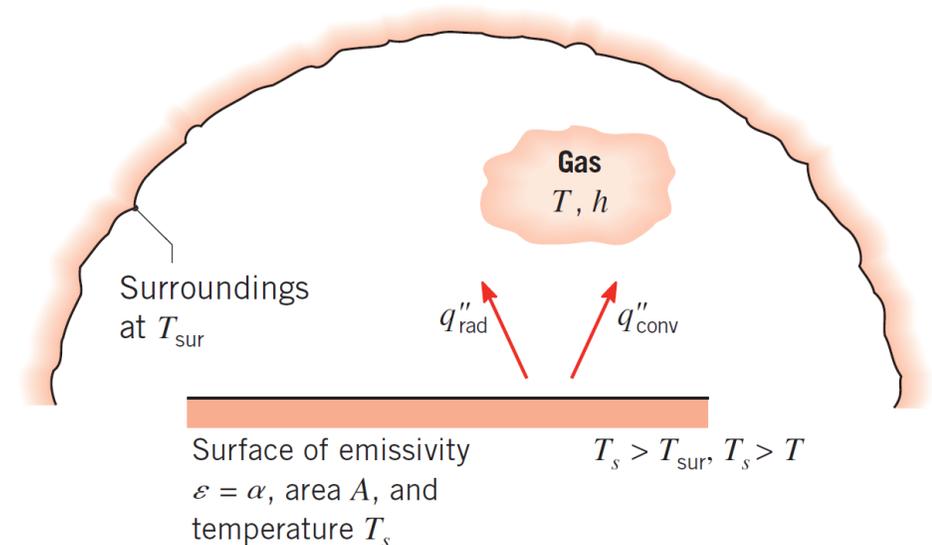
- Un cas particulier est lorsqu'on considère une petite surface ( $T_s$ ) complètement entourée par une grande surface ( $T_{sur}$ )

– Dans ce cas la grande surface agit comme un corps noir et

$$G = \sigma T_{sur}^4$$

– Relation de Stefan-Boltzmann :

$$q''_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4)$$



# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Généralités
- Corps noir
- Corps réel
- ***Analogie***
- Calcul des échanges thermiques
- Exemples
- Conclusion

# Analogie

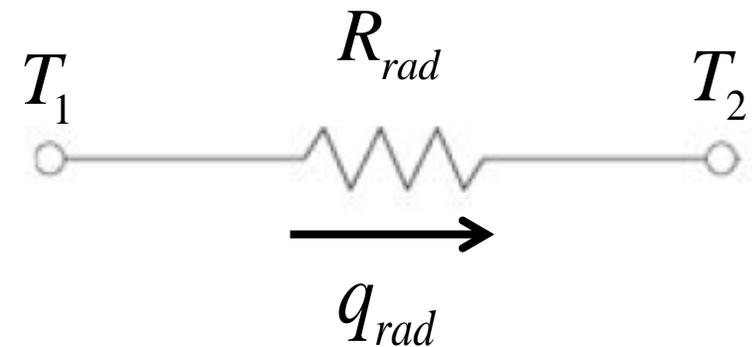
- Notion de résistance thermique

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma A(T_1^4 - T_2^4) = \varepsilon\sigma A(T_1^2 - T_2^2)(T_1^2 + T_2^2)$$

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma A(T_1 - T_2)(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2)$$

$$R_{rad} = \frac{1}{\varepsilon\sigma A(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2)}$$

$$q_{rad} = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{rad}}$$



# Analogie

- Notion de coefficient de transfert radiatif

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_1 - T_2) (T_1 + T_2) (T_1^2 + T_2^2)$$

$$h_{rad} = \varepsilon \sigma (T_1 + T_2) (T_1^2 + T_2^2)$$

$$q_{rad} = h_{rad} A (T_1 - T_2)$$

Il importe de noter que l'expression de  $h_{rad}$  permet de linéariser le problème mais que cette valeur dépend de la température. Pour résoudre il faut donc faire un estimé de  $h_{rad}$  à partir de probables températures de surface lorsque ces dernières ne sont pas connues. Il faut par la suite itérer jusqu'à convergence (équilibre des flux).

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Généralités
- Corps noir
- Corps réel
- Analogie
- ***Calcul des échanges thermiques***
- Exemples
- Conclusion

# Calcul des échanges thermiques

- Il arrive aussi qu'on ait une source connue de radiation comme le Soleil, une lampe ultra-violet ou infra-rouge
  - Dans ce cas,  $G$  est connue
  - On doit utiliser l'absorptivité appropriée aux longueurs d'onde du rayonnement en question.
  - Il y aura donc, dans le cas d'un problème de collecteur solaire, deux valeurs de :
    - L'une valide pour l'absorptivité au rayonnement solaire,  $\alpha_s$
    - L'autre pour l'absorptivité au rayonnement en provenance de l'environnement extérieur,  $\alpha$ .

# Calcul des échanges thermiques

- Dans ce cours, nous allons limiter les calculs d'échanges radiatifs avec l'environnement au cas particulier de *Stefan-Boltzmann* avec l'hypothèse d'un corps gris

$$q_{rad}'' = \varepsilon \sigma \left( T_s^4 - T_{sur}^4 \right)$$

$$q_{rad}'' = \alpha \sigma \left( T_s^4 - T_{sur}^4 \right)$$

- Ceci implique une expression non-linéaire du flux énergétique par rapport à la température.

# Calcul des échanges thermiques

- Outre ce terme d'échange bidirectionnel net avec l'environnement (ce qui est émit par le corps moins ce qui est absorbé en provenance de l'environnement), il faudra aussi considérer la portion absorbée du rayonnement solaire par le collecteur.

$$q_{in} = \alpha_s G_s$$

# Calcul des échanges thermiques

- En général, lorsque l'on désire effectuer un bilan complet sur un collecteur, le bilan d'énergie est :

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_{gen} = \dot{E}_{acc}$$

- Le terme de génération est souvent nul et en régime permanent, le terme d'accumulation est aussi nul :

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

- En préfaçabilité, nous utilisons souvent cette forme.

# Calcul des échanges thermiques

- Ainsi, sur un collecteur le bilan d'énergie est simplement :

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\dot{E}_{in} = \alpha_s A G_s + \alpha A \sigma T_{sur}^4$$

$$\dot{E}_{out} = \varepsilon A \sigma T_s^4 + hA(T_s - T_{air}) + P_u + P_{loss}$$

- Cette équation peut aussi prendre la forme suivante:

$$\alpha_s A G_s = \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) + hA(T_s - T_{air}) + P_u + P_{loss}$$

# Calcul des échanges thermiques

- Ce bilan tient compte des phénomènes pouvant affecter le collecteur

Absorption du rayonnement solaire, moteur du collecteur

Bilan des échanges convectifs entre la surface externe du collecteur et l'air qui l'entoure,  $T_{air}$  n'est pas nécessairement  $T_{sur}$

$$\alpha_s A G_s = \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) + hA (T_s - T_{air}) + P_u + P_{loss}$$

Bilan des échanges radiatifs entre la surface externe du collecteur et son environnement, positif lorsque  $T_s > T_{sur}$

Puissance utile retirée du collecteur thermique, puissance qui sert à chauffer le caloporteur

Pertes thermiques de tous types non contenues dans les pertes convectives (conduction avec les structures, par exemple)

# Calcul des échanges thermiques

- Lorsque la température de surface n'est pas connue, il faut alors résoudre une équation telle que :

$$A \times T_s^4 + B \times T_s + C = 0$$

- Pour résoudre cette équation non linéaire, trois possibilités existent :
  - Préprogrammer une calculatrice pour déterminer les trois coefficients
  - Employer un résolveur d'équations tel *Interactive Heat Transfer (IHT)*
  - Induire manuellement un processus itératif dans une calculatrice jusqu'à convergence sur  $T_s$

# Calcul des échanges thermiques

- Dans les faits, il existe aussi une voie analytique mais il est rare que l'équation obtenue possède une solution de cette nature et même lorsque c'est le cas, les analystes ont oublié les recettes pour résoudre de telles équations.
- Un problème de thermique est une classe particulière de problèmes de mécanique des fluides décrits par les équations de Navier-Stokes et auxquelles l'équation d'énergie vient s'ajouter.

# Calcul des échanges thermiques

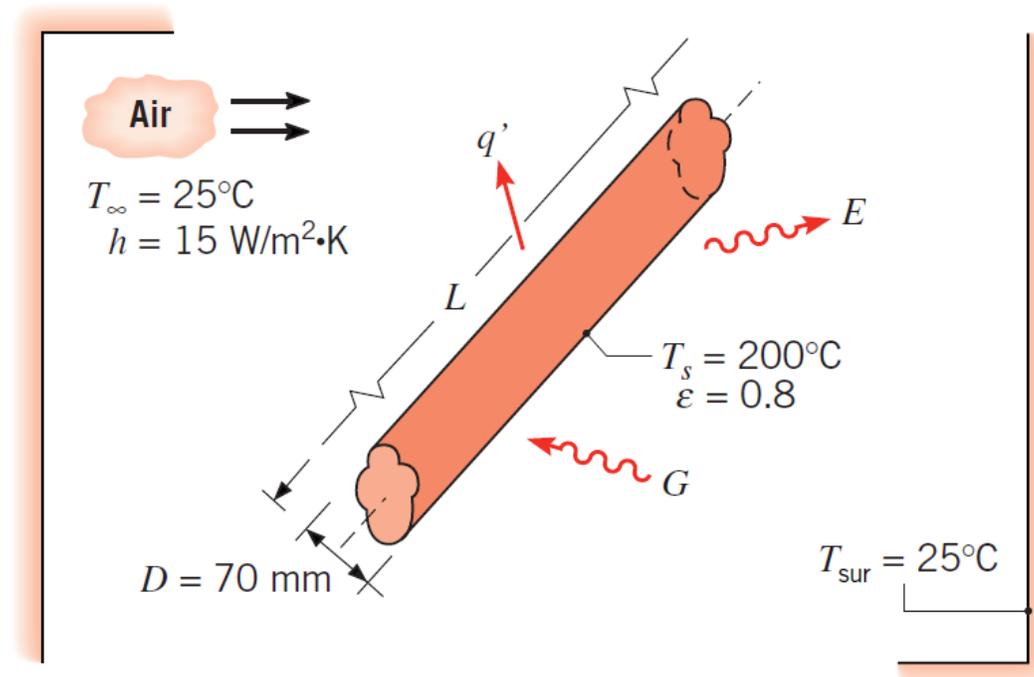
- Il faut ajouter que faire une analyse en régime stationnaire d'un collecteur solaire, d'un mur d'enceinte exposé au rayonnement solaire ou de tout autre système où le soleil est la source en faisant l'hypothèse d'un régime permanent comporte une large part d'approximation.
- Car la source varie à chaque instant.
- C'est un « instantané » qui permet d'obtenir des ordres de grandeur sur la taille, les débits, le coût d'une installation, etc.

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Généralités
- Corps noir
- Corps réel
- Analogie
- Calcul des échanges thermiques
- ***Exemples***
- Conclusion

# Exemples

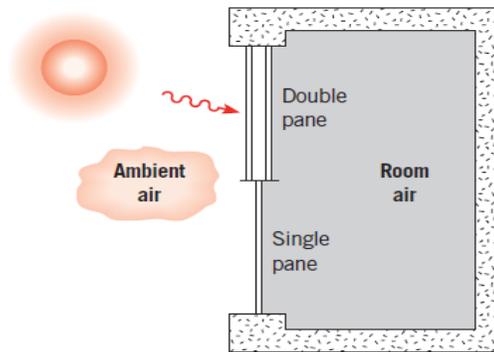
An uninsulated steam pipe passes through a room in which the air and walls are at 25°C. The outside diameter of the pipe is 70 mm, and its surface temperature and emissivity are 200°C and 0.8, respectively. What are the surface emissive power and irradiation? If the coefficient associated with free convection heat transfer from the surface to the air is 15 W/m<sup>2</sup>·K, what is the rate of heat loss from the surface per unit length of pipe?



# Exemples

In considering the following problems involving heat transfer in the natural environment (outdoors), recognize that solar radiation is comprised of long and short wavelength components. If this radiation is incident on a *semi-transparent medium*, such as water or glass, two things will happen to the nonreflected portion of the radiation. The long wavelength component will be absorbed at the surface of the medium, whereas the short wavelength component will be transmitted by the surface.

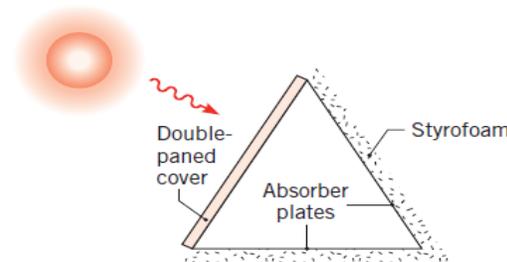
- (a) The number of panes in a window can strongly influence the heat loss from a heated room to the outside ambient air. Compare the single- and double-paned units shown by identifying relevant heat transfer processes for each case.



- (b) In a typical flat-plate solar collector, energy is collected by a working fluid that is circulated through tubes that are in good contact with the back face of an absorber plate. The back face is insulated from

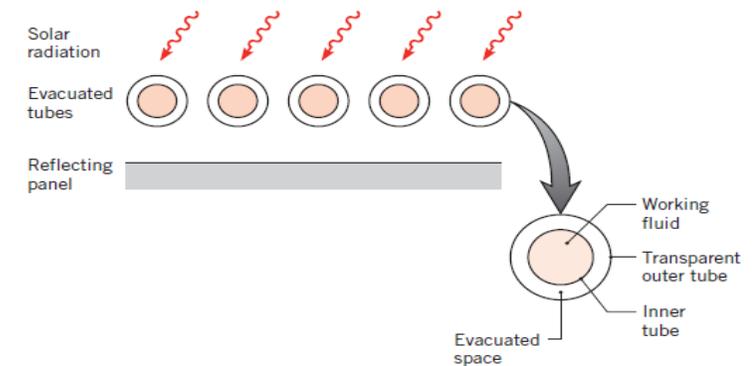
the surroundings, and the absorber plate receives solar radiation on its front face, which is typically covered by one or more transparent plates. Identify the relevant heat transfer processes, first for the absorber plate with no cover plate and then for the absorber plate with a single cover plate.

- (c) The solar energy collector design shown in the schematic has been used for agricultural applications. Air is blown through a long duct whose cross section is in the form of an equilateral triangle. One side of the triangle is comprised of a double-paned, semitransparent cover; the other two sides are constructed from aluminum sheets painted flat black on the inside and covered on the outside with a layer of styrofoam insulation. During sunny periods, air entering the system is heated for delivery to either a greenhouse, grain drying unit, or storage system.



Identify all heat transfer processes associated with the cover plates, the absorber plate(s), and the air.

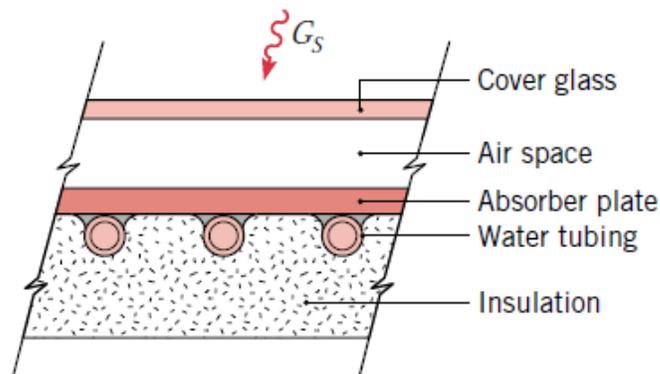
- (d) Evacuated-tube solar collectors are capable of improved performance relative to flat-plate collectors. The design consists of an inner tube enclosed in an outer tube that is transparent to solar radiation. The annular space between the tubes is evacuated. The outer, opaque surface of the inner tube absorbs solar radiation, and a working fluid is passed through the tube to collect the solar energy. The collector design generally consists of a row of such tubes arranged in front of a reflecting panel. Identify all heat transfer processes relevant to the performance of this device.



# Exemples

- Le collecteur thermique

A solar flux of  $700 \text{ W/m}^2$  is incident on a flat-plate solar collector used to heat water. The area of the collector is  $3 \text{ m}^2$ , and 90% of the solar radiation passes through the cover glass and is absorbed by the absorber plate. The remaining 10% is reflected away from the collector. Water flows through the tube passages on the back side of the absorber plate and is heated from an inlet temperature  $T_i$  to an outlet temperature  $T_o$ . The cover glass, operating at a temperature of  $30^\circ\text{C}$ , has an emissivity of 0.94 and experiences radiation exchange with the sky at  $-10^\circ\text{C}$ . The convection coefficient between the cover glass and the ambient air at  $25^\circ\text{C}$  is  $10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ .



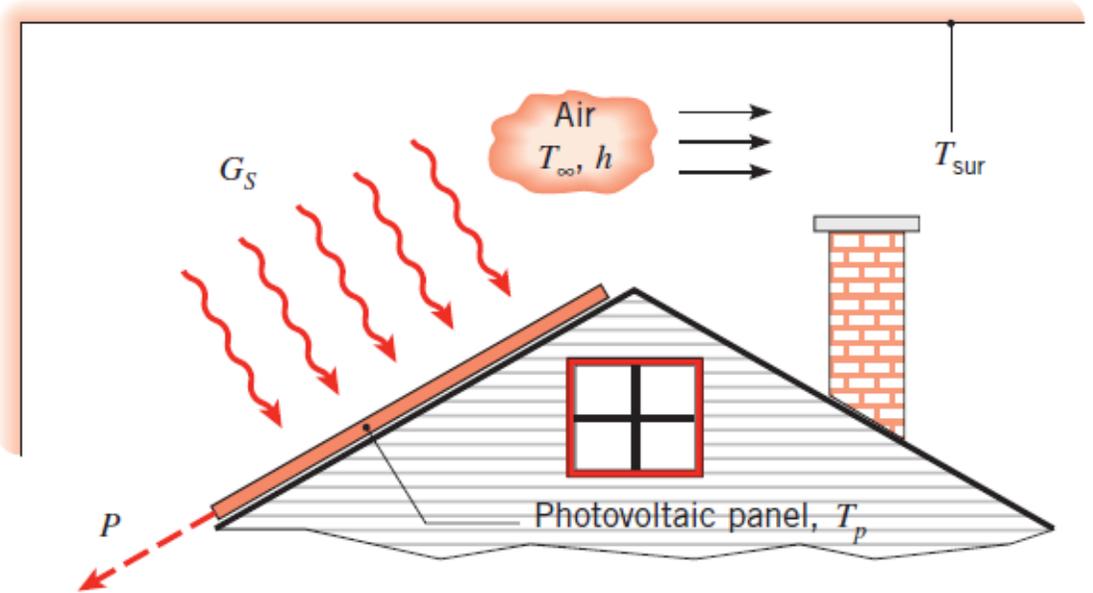
- Perform an overall energy balance on the collector to obtain an expression for the rate at which useful heat is collected per unit area of the collector,  $q''_u$ . Determine the value of  $q''_u$ .
- Calculate the temperature rise of the water,  $T_o - T_i$ , if the flow rate is  $0.01 \text{ kg/s}$ . Assume the specific heat of the water to be  $4179 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ .
- The collector efficiency  $\eta$  is defined as the ratio of the useful heat collected to the rate at which solar energy is incident on the collector. What is the value of  $\eta$ ?

**I&D, Fundamentals of heat and mass transfer, 6th ed., Wiley, 2007**

# Exemples

- Le collecteur photovoltaïque

A photovoltaic panel of dimension  $2\text{ m} \times 4\text{ m}$  is installed on the roof of a home. The panel is irradiated with a solar flux of  $G_S = 700\text{ W/m}^2$ , oriented normal to the top panel surface. The absorptivity of the panel to the solar irradiation is  $\alpha_S = 0.83$ , and the efficiency of conversion of the absorbed flux to electrical power is  $\eta = P/\alpha_S G_S A = 0.553 - 0.001\text{ K}^{-1} T_p$ , where  $T_p$  is the panel temperature expressed in kelvins and  $A$  is the solar panel area. Determine the electrical power generated for (a) a still summer day, in which  $T_{\text{sur}} = T_\infty = 35^\circ\text{C}$ ,  $h = 10\text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ , and (b) a breezy winter day, for which  $T_{\text{sur}} = T_\infty = -15^\circ\text{C}$ ,  $h = 30\text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ . The panel emissivity is  $\varepsilon = 0.90$ .



Problème Incropera & Dewitt, FHMT, 6th, 1.70 Water Solar collector  
Solution disponible avec logiciel IHT

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Généralités
- Corps noir
- Corps réel
- Analogie
- Calcul des échanges thermiques
- Exemples
- ***Conclusion***

# Conclusion

- Tout corps (solide, liquide ou gaz) émet un rayonnement dont la longueur d'onde dépend de sa température. Ce phénomène est un transfert de chaleur par ondes électromagnétiques d'un corps chaud vers un corps froid mais aussi inversement.
- Le rayonnement n'a pas besoin d'un milieu matériel pour se produire. Il est même le plus efficace dans le vide.

# Conclusion

- Les trois capsules consacrées à la thermique permettent de résoudre des problèmes simples liés aux énergies renouvelables.
- Peu importe le sujet, bâtiments, équipements de conversion et transfert, éolienne, solaire PV, biomasse, hydrogène, air comprimé, stockage, géothermie, un minimum de connaissances en thermique est requis pour arriver à faire des estimés de performance réalistes, car ultimement, toutes les sources d'énergie se dégradent et finissent par produire de la chaleur et la perdre.



**Merci de votre attention !**

Si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

# Période de questions



# Liste de questions à réflexion

- Quelle est la nature du rayonnement?
- Quelles sont les deux caractéristiques importantes caractérisant le rayonnement?
- Quelle est l'origine physique de l'émission de rayonnement d'une surface?
- Comment l'émission affecte l'énergie thermique d'un matériau?
- Dans quelle région du spectre électromagnétique le rayonnement thermique est-il concentré?
- Quelle est l'intensité spectrale du rayonnement émis par une surface? De quelles variables dépend-t-elle?
- Comment la connaissance de cette dépendance peut-elle être utilisée pour déterminer le taux auquel la matière perd de l'énergie thermique en raison de l'émission de sa surface?
- Qu'est-ce qu'un stéradian? Combien de stéradians sont associés à une hémisphère?
- Quelle est la distinction entre le rayonnement spectral et le rayonnement total?
- Entre rayonnement directionnel et rayonnement hémisphérique?
- Qu'est-ce que la puissance émissive totale?
- Quel rôle joue-t-elle dans un bilan énergétique de surface?

# Liste de questions à réflexion

- Qu'est-ce qu'un émetteur diffus? Pour un tel émetteur, comment l'intensité est-elle liée au pouvoir émissif total?
- Qu'est-ce que l'irradiation (appelée irradianance en solaire PV)? Comment est-elle liée à l'intensité du rayonnement incident, si le rayonnement est diffus?
- Qu'est-ce que la radiosité? Quel rôle jouent la radiosité totale et l'irradiation totale dans une bilan énergétique sur une surface?
- Quelles sont les caractéristiques d'un corps noir? Une telle chose existe-t-elle réellement dans la nature?
- Quel est le rôle principal du comportement du corps noir dans l'analyse des rayonnements?
- Qu'est-ce que la distribution Planck? Quelle est la loi de déplacement de Wien?
- De mémoire, esquissez la distribution spectrale de l'émission de rayonnement d'un corps noir à trois températures,  $T_1$ .  $T_2$ .  $T_3$ . Identifiez les principales caractéristiques des distributions.
- Dans quelle région du spectre électromagnétique se trouve concentrée l'émission de rayonnement d'une surface à température ambiante? Quelle est la région spectrale de concentration pour une surface à  $1000^\circ\text{C}$ ? Pour la surface du soleil?

# Liste de questions à réflexion

- Qu'est-ce que la loi de Stefan-Boltzmann?
- Comment détermineriez-vous l'intensité totale de rayonnement émis par un corps noir à une température prescrite?
- Comment évalueriez-vous l'irradiation totale d'une petite surface dans une grande enceinte isotherme?
- Dans le terme d'émissivité hémisphérique totale, à quoi les adjectifs total et hémisphérique font-ils référence?
- Comment l'émissivité directionnelle d'un matériau change-t-elle lorsque l'angle zénithal associé avec l'émission approche?
- Si l'émissivité spectrale d'un matériau augmente avec l'augmentation de la longueur d'onde, comment son émissivité totale varie-t-elle avec la température?
- Qu'est-ce qui est plus grand, l'émissivité d'un métal poli ou d'un métal oxydé? Un réfractaire ou de la glace?
- Quels processus accompagnent l'irradiation d'un matériau semi-transparent? Un matériau opaque?
- Le verre et l'eau sont-ils des matériaux semi-transparentes ou opaques?
- Comment la couleur perçue d'un matériau est-elle déterminée par sa réponse à l'irradiation dans la partie infrarouge du spectre? Comment sa couleur est-elle affectée par sa température?
- La neige peut-elle être considérée comme un bon absorbeur ou réflecteur du rayonnement infrarouge incident?
- Comment l'énergie thermique d'un matériau est-elle affectée par l'absorption de rayonnement incident? Par la réflexion d'un rayonnement incident?
- L'absorbance totale d'une surface opaque à une température fixe peut-elle différer selon si l'irradiation provient d'une source à température ambiante ou du soleil? Sa réflectivité diffère-t-elle? Son émissivité?

# Liste de questions à réflexion

- Qu'est-ce qu'un réflecteur diffus? Un réflecteur spéculaire?
- Comment la rugosité d'une surface affecte la nature de la réflexion de la surface?
- Dans quelles conditions existe-t-il une équivalence entre l'émissivité spectrale directionnelle d'une surface et de l'absorbance spectrale directionnelle? L'émissivité spectrale hémisphérique et l'absorptivité spectrale hémisphérique? L'émissivité hémisphérique totale et l'absorptivité hémisphérique totale?
- Qu'est-ce qu'une surface grise?
- Comment la teneur en gaz et aérosols de l'atmosphère modifie-t-elle la variation spectrale du rayonnement solaire se propageant vers le bas?
- Comment le contenu de l'atmosphère modifie la variation spectrale de l'émission terrestre à propagation ascendante?
- Comment la température de rayonnement effective de la terre peut-elle être calculée à partir de bilans de rayonnement atmosphérique?
- Quelle est la température effective du ciel et comment peut-elle l'être déterminée à partir du bilan de rayonnement atmosphérique?
- Quelle est la nature directionnelle du rayonnement solaire en dehors de l'atmosphère terrestre? À la surface de la terre?
- Quelle est la principale différence entre la diffusion de Rayleigh et celle de Mie? Dans le cadre du rayonnement solaire et environnemental, comment les phénomènes de diffusion (scattering) affectent-ils la température de l'atmosphère terrestre?
- Comment l'activité anthropique pourrait-elle affecter la diffusion, l'absorption et l'émission dans l'atmosphère?

**Cette présentation ne permet pas de répondre explicitement à toutes ces questions.**