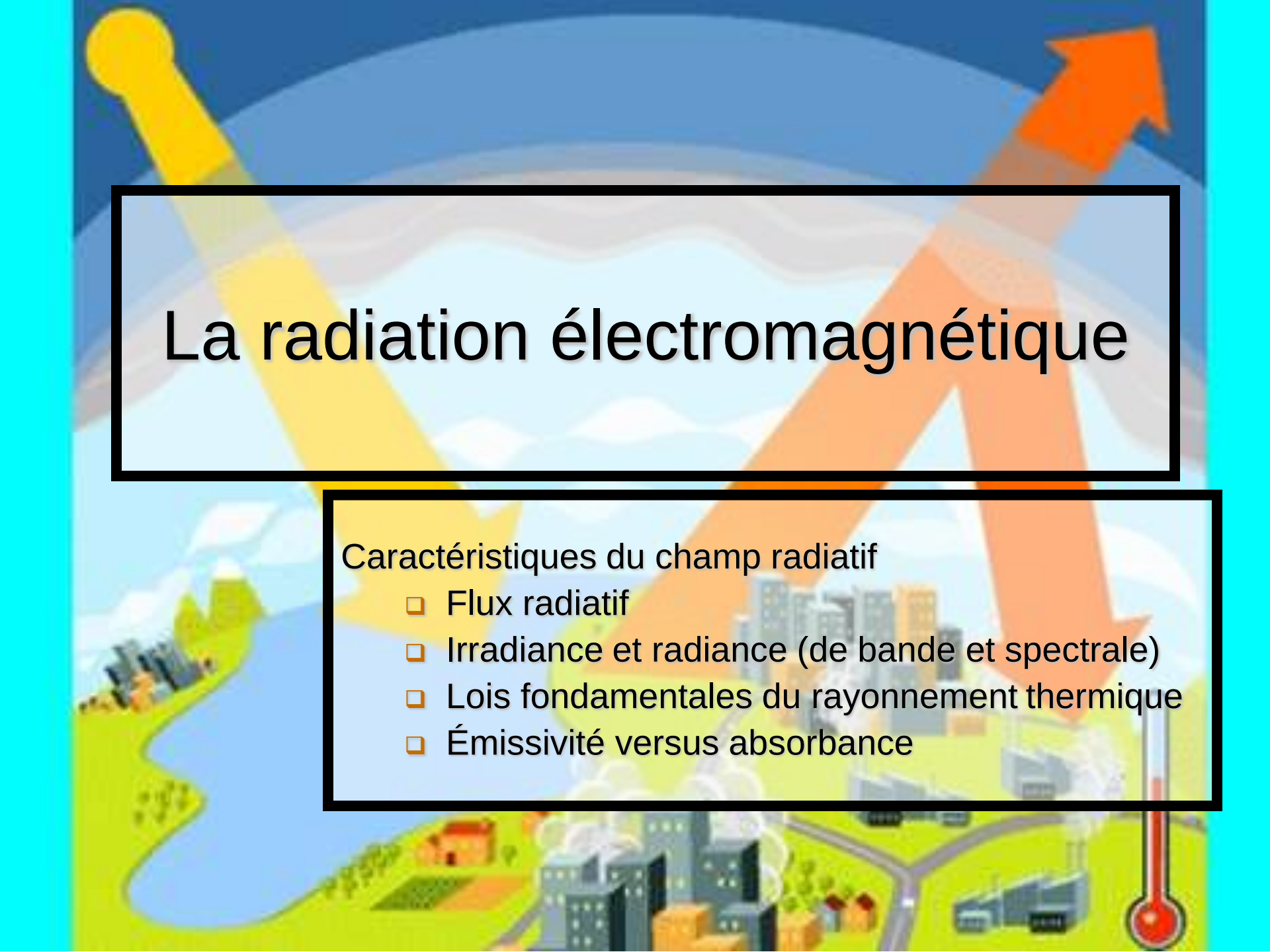


The background of the slide features a stylized illustration of the Earth. A large yellow arrow points from the top left towards the center, representing incoming solar radiation. A large orange arrow points from the top right towards the center, representing outgoing terrestrial radiation. The Earth is depicted with blue oceans, green landmasses, and white clouds. In the bottom right corner, there is a small red thermometer icon showing a rising temperature.

# La radiation électromagnétique

## Caractéristiques du champ radiatif

- ❑ Flux radiatif
- ❑ Irradiance et radiance (de bande et spectrale)
- ❑ Lois fondamentales du rayonnement thermique
- ❑ Émissivité versus absorbance

# Table de matières

- La radiation
  - Définition des grandeurs radiatives
  - Les lois de la radiation
    - Le corps noir
    - La loi de Planck
    - La loi de Stefan-Boltzmann
    - La loi de Kirchhoff

**Dans ce cours nous allons voir que tous les objets émettent du rayonnement mais que la quantité et le type de rayonnement dépendent fortement de leur température.**

# Radiation : points importants

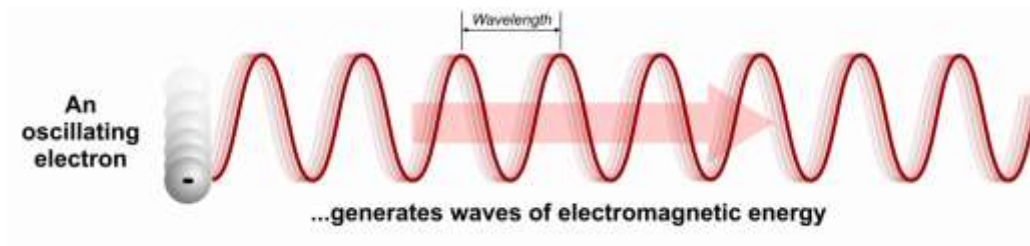
- Tous les objets dont la température est supérieure à 0 K (-273,15 K) émettent de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques : radiation.
- La quantité d'énergie émise par unité de surface et par unité de temps dépend fortement de la température.
- Tous les objets émettent du rayonnement dans toutes les longueurs d'onde du spectre de radiation.
- Pour la même température, la quantité d'énergie émise dépend de la composition chimique et de la phase de la substance émettrice.
- Pour une température donnée, la quantité d'énergie émise dépend de la longueur d'onde.

# Le rayonnement

Toute la matière émet du rayonnement. Pourquoi?

## L'énergie rayonnante

- provient de l'énergie d'agitation thermique des particules (atomes, molécules, ions) de la matière,



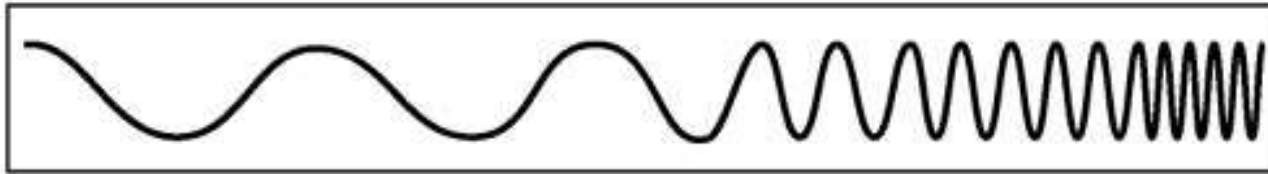
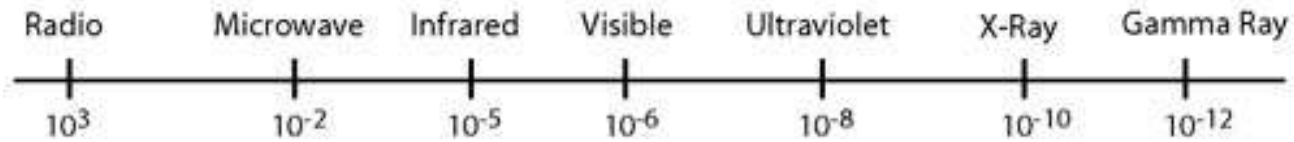
Longueur d'onde  $\lambda(m)$  est définie comme la distance séparant deux maxima (ou minima) consécutifs de l'amplitude de l'onde

- ne nécessite pas la présence d'un milieu intermédiaire matériel pour le transfert.

L'émission de **radiation** par la **surface d'un objet** du fait de sa **température** est appelée le **rayonnement thermique**. Il est constitué d'**ondes électromagnétiques**.

# THE ELECTRO MAGNETIC SPECTRUM

Wavelength  
(metres)

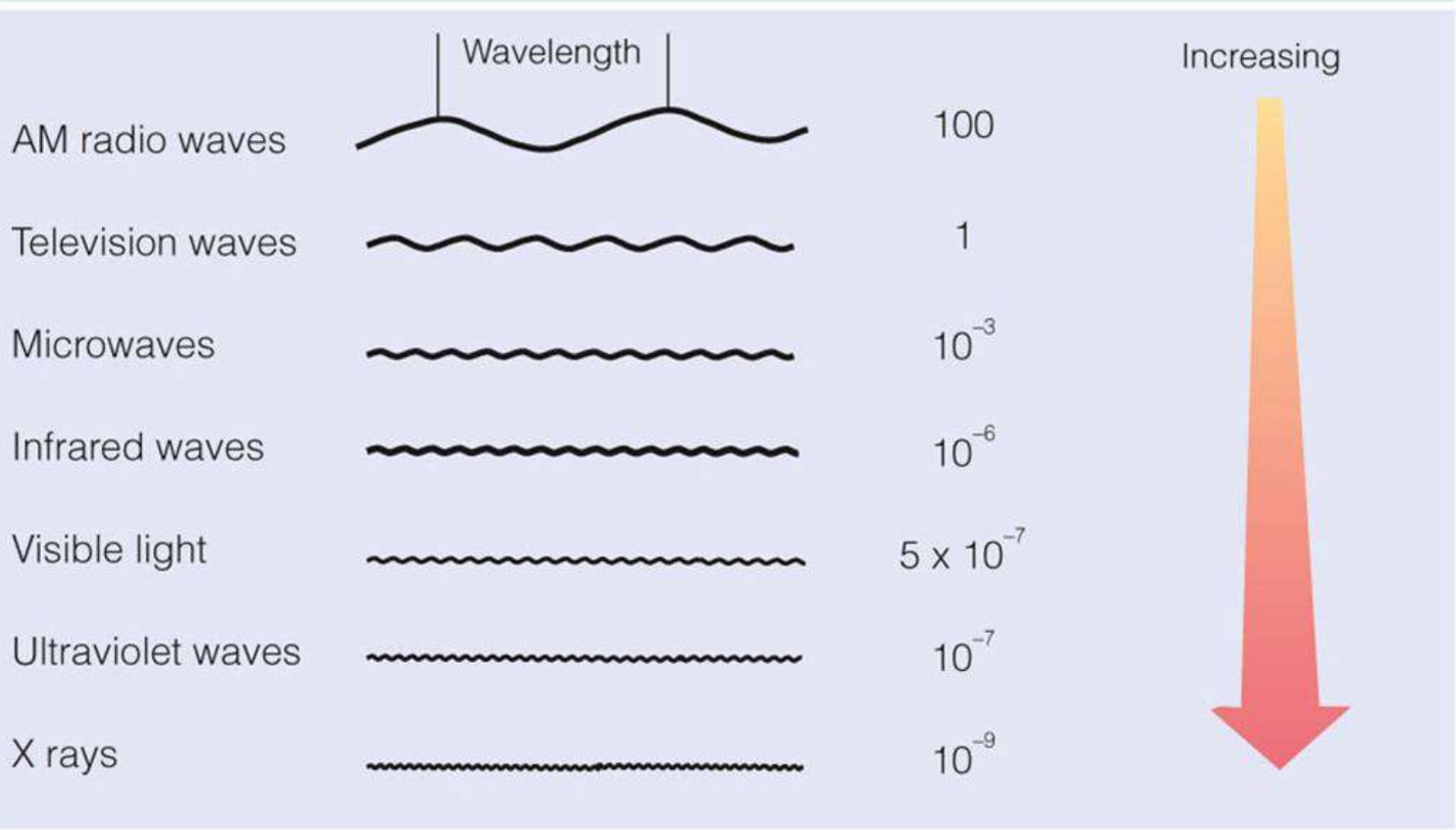


Frequency  
(Hz)



| <i>Couleur</i> | $\Delta\lambda$ ( $\mu\text{m}$ ) | $\lambda$ typique ( $\mu\text{m}$ ) |
|----------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Violet         | 0,390 – 0,455                     | 0,430                               |
| Bleu foncé     | 0,455 – 0,485                     | 0,470                               |
| Bleu pâle      | 0,485 – 0,505                     | 0,495                               |
| Vert           | 0,505 – 0,550                     | 0,530                               |
| Jaune vert     | 0,550 – 0,575                     | 0,560                               |
| Jaune          | 0,575 – 0,585                     | 0,580                               |
| Orange         | 0,585 – 0,620                     | 0,600                               |
| Rouge          | 0,620 – 0,760                     | 0,640                               |

| Type de radiation | Longueur d'onde relative | Longueur d'onde typique (m) | Énergie transportée par photon |
|-------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
|-------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------|



# Quelques grandeurs radiatives

**Le flux radiatif,  $\Phi$  [W]**, est une mesure de la quantité d'énergie radiative par unité de temps.

**La densité de flux ou irradiance,  $F$  [ $\text{W m}^{-2}$ ]**, mesure la quantité totale d'énergie transportée par la radiation électromagnétique qui traverse (ou incide dans) une surface par unité de temps et par unité de surface.

**Intensité radiative ou radiance,  $I$  [ $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$ ]**, énergie radiative reçue dans une surface, par unité de temps, par unité de surface et par unité d'angle solide (provenant d'une direction donnée).

L'irradiance et la radiance sont deux mesures de la puissance d'un champ radiatif et ce sont des définitions fondamentales dans la résolution de la plupart des problèmes en sciences de l'atmosphère.

# L'irradiance

L'irradiance mesure la contribution de toutes les longueurs d'onde dans un intervalle de longueurs d'onde limité par  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  (ces limites peuvent être spécifiées implicite ou explicitement).

On définit une **irradiance spectrale** [ $\text{W m}^{-2}$ ]  $F_\lambda$  (ou **irradiance monochromatique**), par la quantité d'énergie d'une onde électromagnétique de longueur d'onde  $\lambda$ :

L'irradiance est alors liée à l'irradiance monochromatique par la relation

$$F(\lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_\lambda d\lambda$$

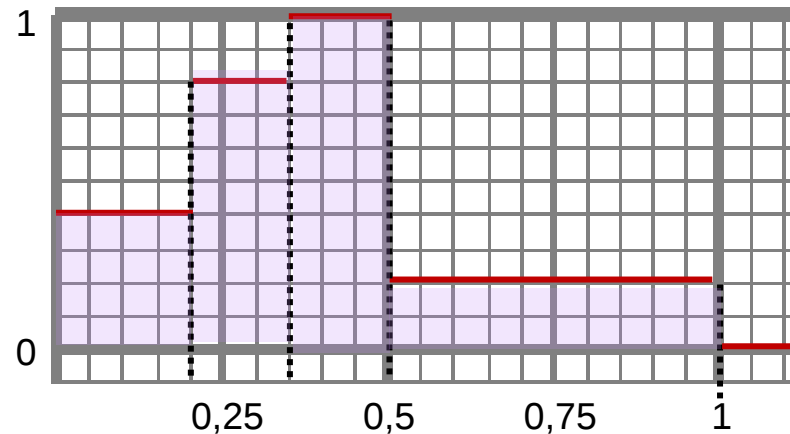
# Exemple 1

L'irradiance spectrale (monochromatique) d'un corps réel s'établit comme suit:

|                                                       |                                          |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| $\lambda < 0,20 \mu\text{m}$                          | $= 0.4 \text{ W m}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ |
| $0,20 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 0,35 \mu\text{m}$ | $= 0.8 \text{ W m}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ |
| $0,35 \mu\text{m} \leq \lambda < 0,50 \mu\text{m}$    | $= 1.0 \text{ W m}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ |
| $0.50 \mu\text{m} \leq \lambda < 1.00 \mu\text{m}$    | $= 0.2 \text{ W m}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ |
| $1,00 \mu\text{m} \leq \lambda$                       | $= 0.0 \text{ W m}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ |

Calculez l'irradiance  $F$

Solution :



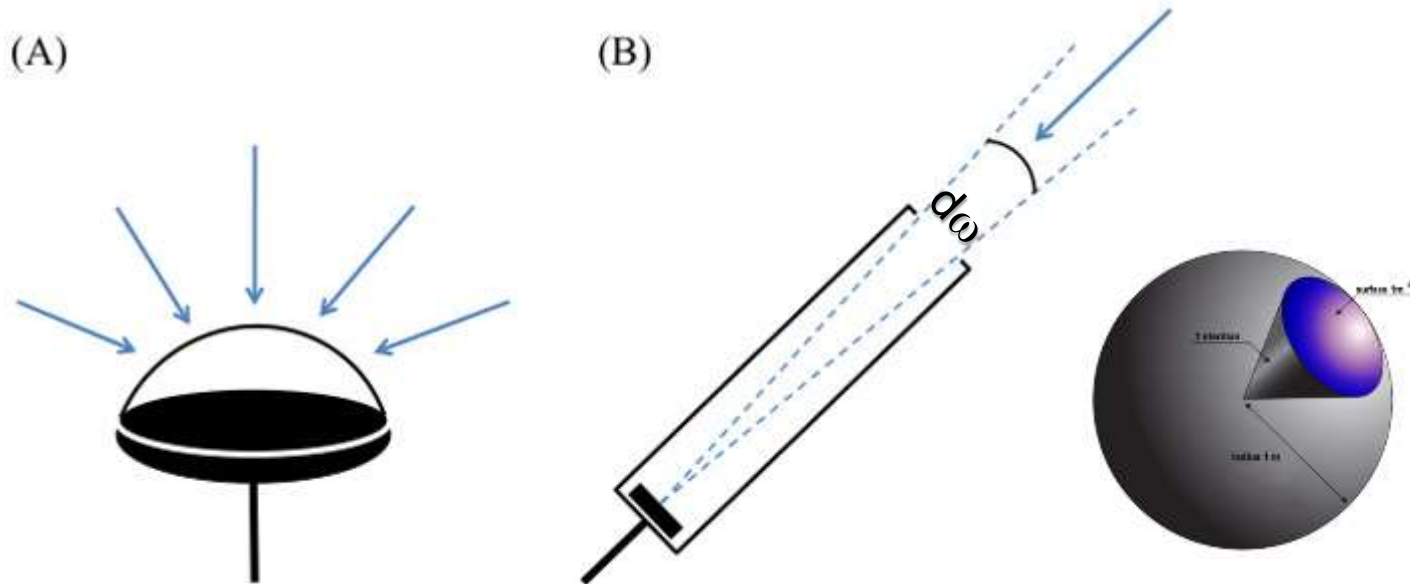
$$F = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} F_{\lambda} d\lambda = \sum \bar{F}_{\lambda} \cdot \Delta\lambda$$

$$F = 0,4 \cdot (0,20 - 0) + 0,8 \cdot (0,35 - 0,20) + 1 \cdot (0,50 - 0,35) + 0,2 \cdot (1,00 - 0,50)$$

$$F = 0,45 \text{ W} / \text{m}^2$$

# Radiance : flux d'énergie directionnelle

Pour bien caractériser le champ radiatif à un point donné, il faut connaître l'irradiance mais aussi la direction (ou directions) d'où provient le rayonnement, ainsi que la direction où il s'en va...



(A) **Irradiance** =  $F$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] est la densité de flux d'énergie total, et comprend le rayonnement diffus et direct. Il est mesuré par un instrument qui collecte le rayonnement provenant d'un angle solide de  $180^\circ$ .

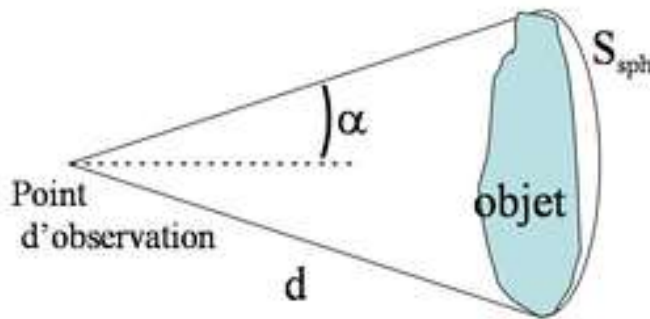
(B) **Radiance** =  $I$  [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ ] est la densité de flux d'énergie provenant d'une seule direction. L'angle solide,  $d\omega$ , sur lequel l'instrument doit mesurer doit être spécifié.  $I = dF/d\omega$ .

# Angle solide $\omega$ (stéradian, sr)

En mathématiques, en géométrie et en physique, un angle solide est l'analogie tridimensionnel de l'angle plan ou bidimensionnel.

Angle solide (sous lequel est vu un objet depuis un point d'observation) =  $\omega$

$\omega$  = rapport entre l'air  $S_{\text{sph}}$  de la calotte sphérique définie par la silhouette de l'objet, et le carré de la distance au point d'observation.



$$\omega = S_{\text{sph}} / d^2$$

Cônes de demi-angle  $\alpha$

$$\omega = 2\pi (1 - \cos \alpha)$$

$$\omega = \pi \alpha^2 \text{ (si } \alpha \text{ petit)}$$

$$\omega_{\text{sphère}} = 4\pi \text{ sr}$$

Rappel : angle  $\alpha = l_{\text{cercle}} / d$

$$\alpha_{\text{cercle}} = 2\pi \text{ rad}$$

# Radiance : définition formelle

**La radiance  $I(\hat{\Omega})$**  est l'irradiance (mesurée dans une surface perpendiculaire au faisceau) par unité d'angle solide qui se propage dans la direction  $\hat{\Omega}$ .

$$I(\hat{\Omega}) = \frac{dF}{d\omega}$$

**Radiance spectrale ou monochromatique :**

$$I_{\lambda}(\hat{\Omega}) = \frac{dF_{\lambda}}{d\omega}$$

Dans le vide, ou dans un milieu transparent, la radiance se conserve.

# Irradiance versus radiance

Dans le cas particulier d'un rayonnement isotrope la **loi de Lambert** lie l'irradiance  $F$  et la radiance  $I$ .

$$F = \pi I$$

$$F_{\lambda} = \pi I_{\lambda}$$

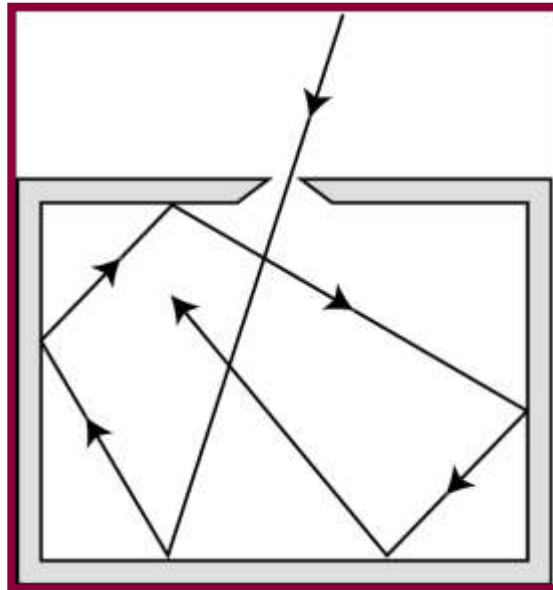
# Lois fondamentales du rayonnement thermique

- Un objet à une température  $T$  émet du rayonnement, en générale, en toutes les longueurs d'onde. Cependant, pour chaque longueur d'onde il existe un maximum d'émission que aucun objet peut franchir. La **fonction de Planck** donne la dépendance entre la température  $T$  et cette limite à chacune des longueurs d'onde  $\lambda$
- Pour chaque température la fonction de Planck a un maximum dont la longueur d'onde est inversement proportionnelle à la température. La **loi de Wien** donne la dépendance entre la température  $T$  et la longueur d'onde pour laquelle la fonction présente un maximum  $\lambda_m$ .
- L'intégration de la fonction de Planck sur toutes les longueurs d'onde montre que le maximum d'irradiance émise est proportionnel à la température à la puissance 4 ( $T^4$ ). C'est la **loi de Stefan-Boltzman**.
- Un bon absorbeur de rayonnement dans un intervalle de longueur d'ondes est un bon émetteur dans ce même intervalle spectral. C'est la **loi de Kirchhoff**.

# Rayonnement du corps noir

Un objet qui absorbe toute la radiation est un **corps noir**. Il est aussi un émetteur parfait (loi de Kirchhoff). À une température donnée, le corps noir émet le maximum d'énergie possible à chaque longueur d'onde.

Réalisation d'un corps noir



Une enceinte avec une toute petite ouverture est un corps noir...

# La fonction de Planck

L'irradiance monochromatique émise par un corps noir (\*) est donnée par la fonction de Planck

Irradiance  
spectrale du  
corps noir

$$F_{\lambda}^* = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)},$$

$$c_1 = 3,74 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$$

$$c_2 = 1,44 \cdot 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K} = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$$

Puisque le rayonnement d'un corps noir est isotrope, en appliquant la loi de Lambert on obtient la radiance monochromatique du corps noir:

Radiance  
spectrale du  
corps noir

$$I_{\lambda}^*(T) = B_{\lambda}(T) = \frac{F_{\lambda}(T)}{\pi} = \frac{c_1}{\pi \lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)}$$

Les propriétés radiatives du corps noir sont identifiées avec l'indice \* et la température est en K

## Exemple 2

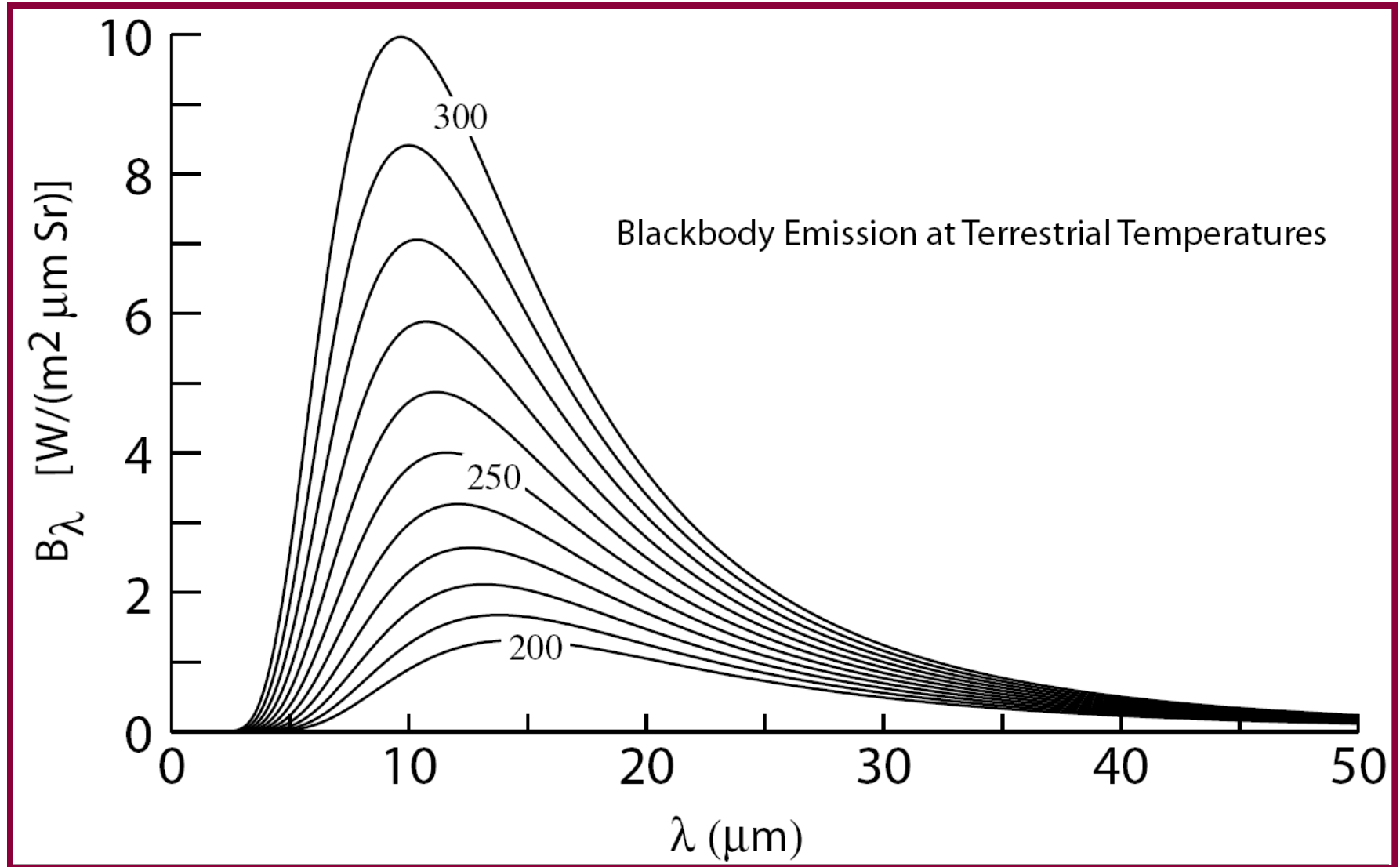
Calculez l'irradiance monochromatique de la couleur verte pure ( $\lambda = 0,53 \mu\text{m}$ ) émise par un objet à la température  $T = 3000 \text{ K}$ .

**Piste de solution** : la loi de Planck

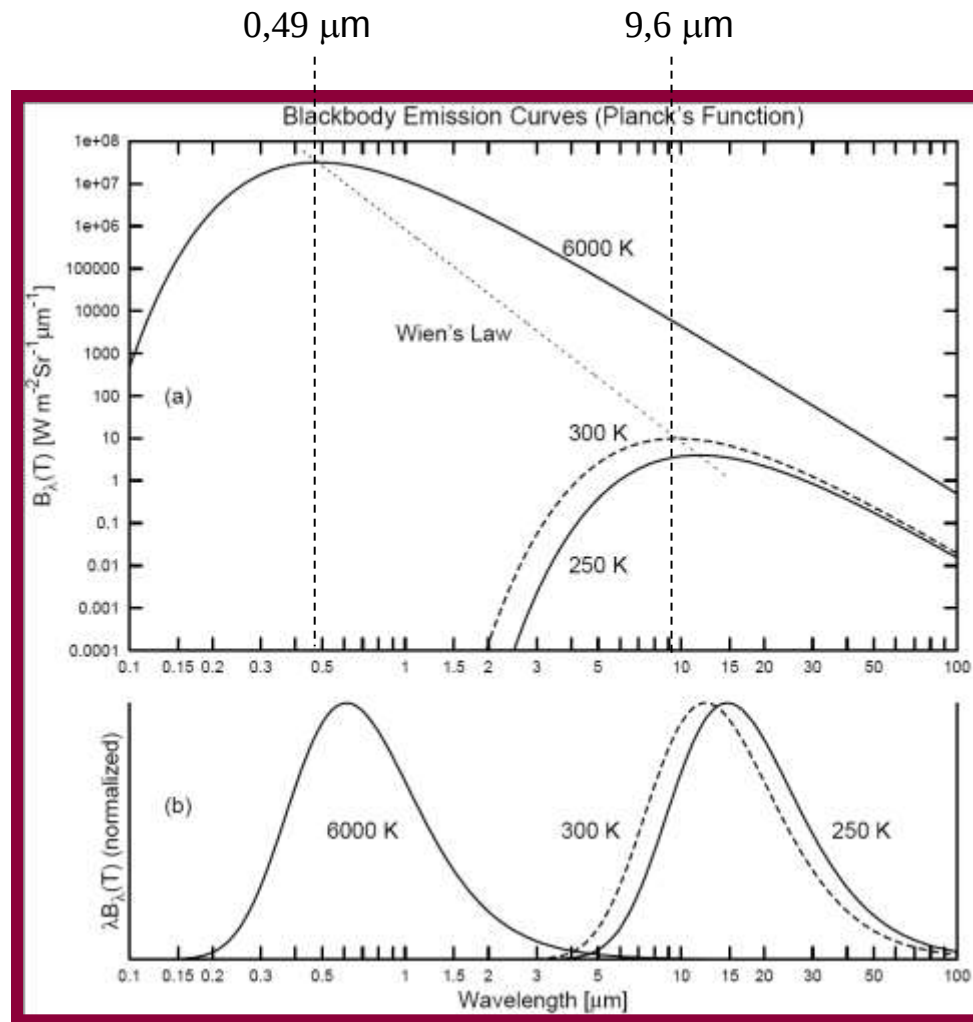
$$F_{\lambda}^* = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)}$$

**Réponse** :  $1,04.10^6 \text{ W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}$

# Fonction de Planck aux températures terrestres



# Loi de déplacement de Wien

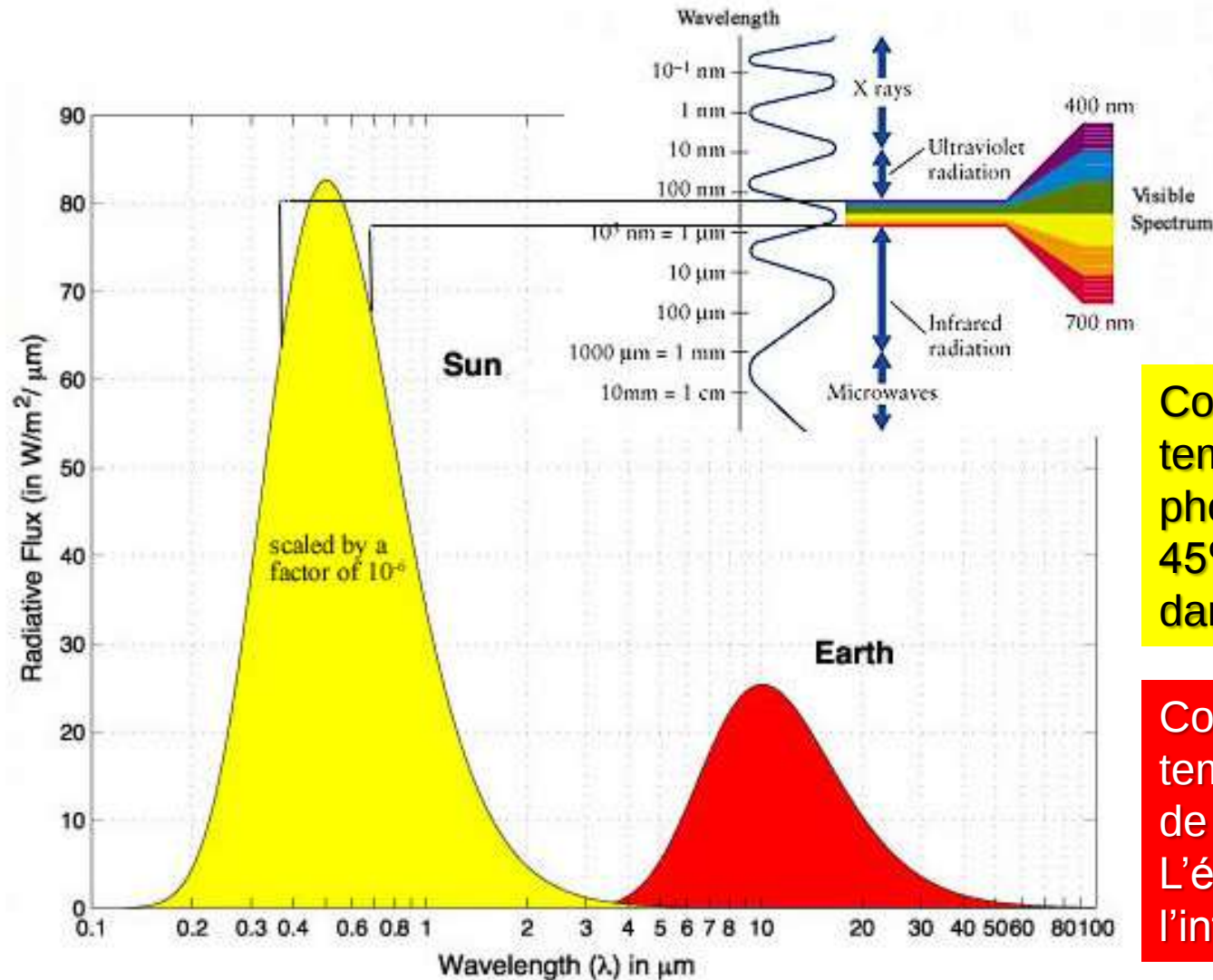


$$\lambda_{\text{max}} = \frac{k_W}{T}$$

$$k_W = 2897 \mu\text{m K}$$

# Loi de Planck

## Spectre d'émission selon la température



Corps noir à la température de la photosphère du Soleil : 45% de l'énergie émise dans le spectre visible

Corps noir à la température équivalente de la terre : L'énergie émise dans l'infrarouge

# Loi de Stefan - Boltzmann

En intégrant la fonction de Planck sur toutes les longueurs d'onde on obtient la loi de Stefan - Boltzmann

$$F^* = \int_0^{\infty} F_{\lambda}^* d\lambda = \sigma T^4$$

où  $\sigma$  est la constante de Stefan – Boltzmann :

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

# Exemple

Calculez l'irradiance totale émise par un corps noir à la température  $T = 255 \text{ K}$ .

**Piste de solution** : la loi de Stefan-Boltzmann

$$F^* = \sigma \cdot T^4$$

**Réponse** :  $240 \text{ W.m}^{-2}$

# Émissivité

L'*émissivité* correspond au flux radiatif émis par un élément de surface à température donnée, rapporté à la valeur de référence qu'est le flux émis par un corps noir à cette même température. Cette dernière valeur étant la valeur maximale possible, l'*émissivité* est un nombre inférieur ou égal à l'*unité*

Émissivité spectrale

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{F_{\lambda}}{F_{\lambda}^*(T)}, 0 \leq \varepsilon_{\lambda} \leq 1$$

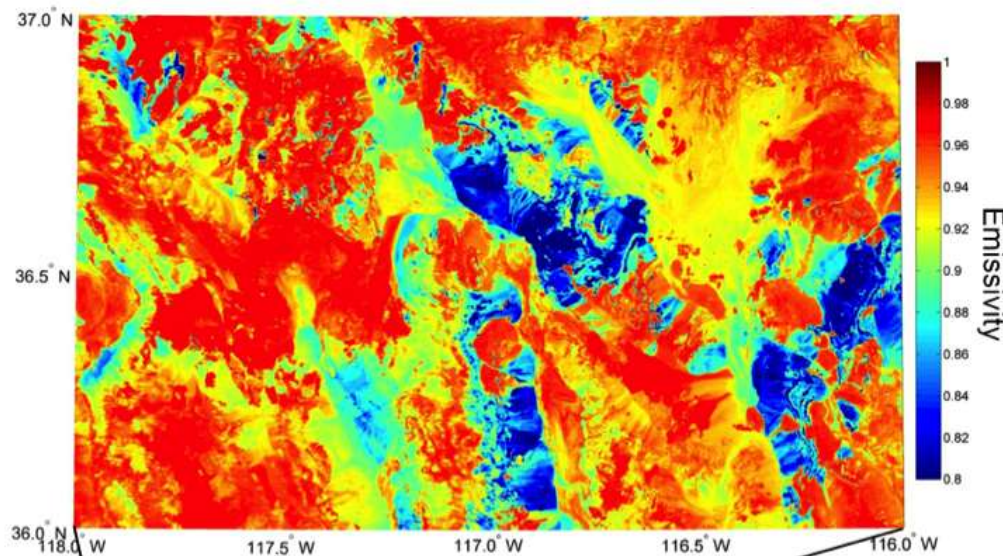
Émissivité d'un corps gris

$$\varepsilon = \frac{F}{\sigma T^4}, 0 < \varepsilon < 1$$

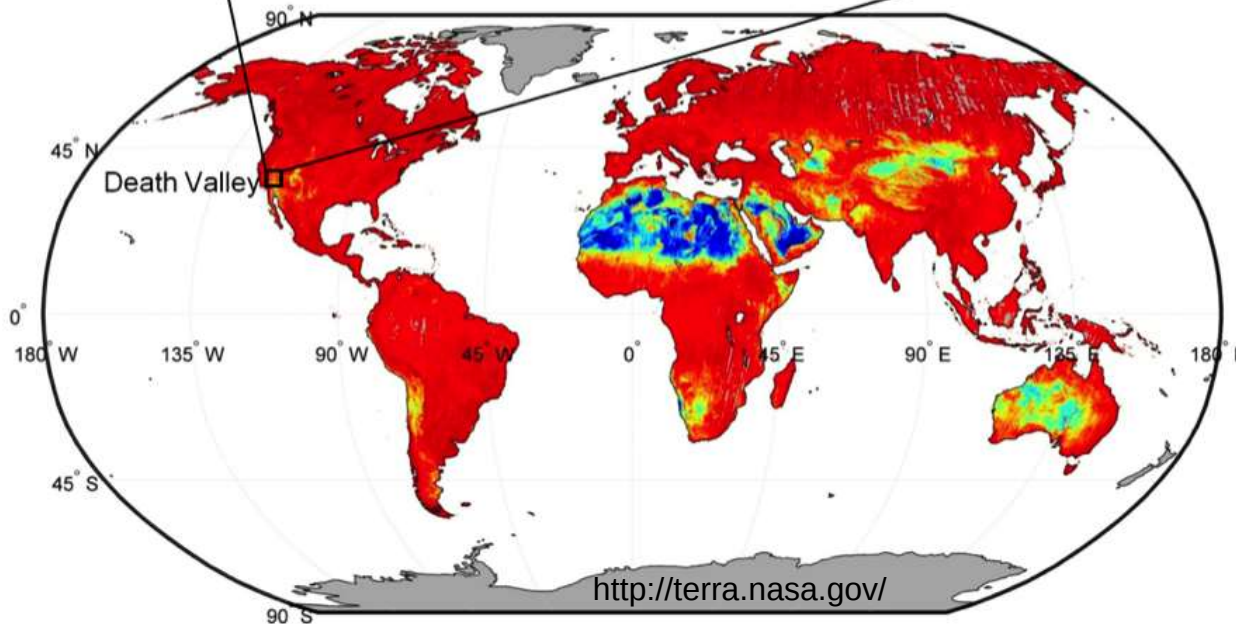
Émissivité de bande spectrale

$$\varepsilon(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{F(\lambda_1, \lambda_2)}{F^*(\lambda_1, \lambda_2)}, 0 \leq \varepsilon \leq 1$$

# Émissivité des surfaces terrestres



L'émissivité de la plupart des surfaces terrestres naturelles se situe entre environ 0,6 et 1,0, mais les surfaces avec des émissivités inférieures à 0,85 sont typiquement limitées aux déserts et aux zones semi-arides. La végétation, l'eau et la glace ont des émissivités élevées, supérieures à 0,95 dans la gamme de longueurs d'onde infrarouge thermique.

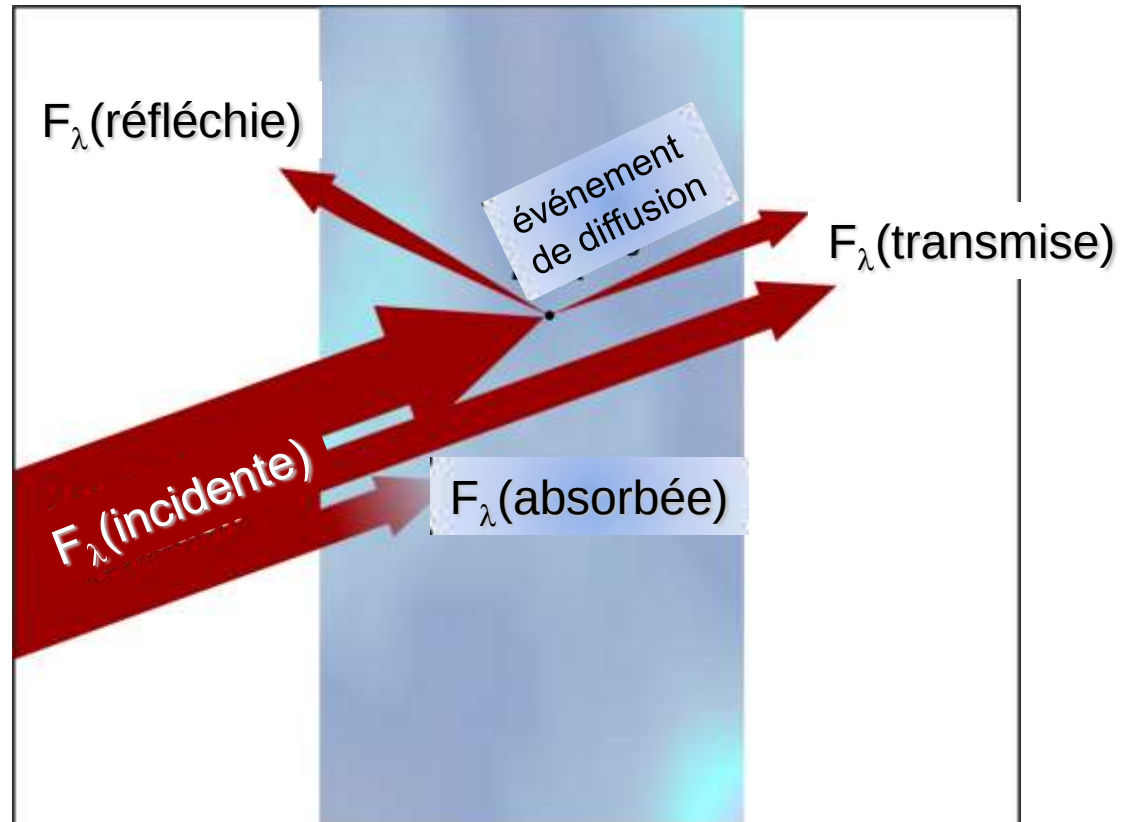


L'émissivité est une propriété intrinsèque de la surface et ne dépend pas de l'angle du soleil par rapport à la Terre ou des conditions météorologiques locales. Les variations d'émissivité se produisent en raison de la couverture du sol et des changements d'utilisation, ainsi que de la composition minérale de la surface du terrain.

# Exemples d'émissivité dans le spectre de rayonnement terrestre (IR)

|                        |              |
|------------------------|--------------|
| Eau liquide            | 0,92 – 0,96  |
| Neige fraîche et sèche | 0,82 – 0,995 |
| Glace                  | 0,96         |
| Sable sec              | 0,84 – 0,90  |
| Sable humide           | 0,95 – 0,98  |
| Sol poudreux et sec    | 0,90         |
| Désert                 | 0,90 – 0,91  |
| Forêt                  | 0,90         |
| Peau humaine           | 0,95         |
| Ciment                 | 0,71 – 0,88  |
| Aluminium poli         | 0,01 – 0,05  |

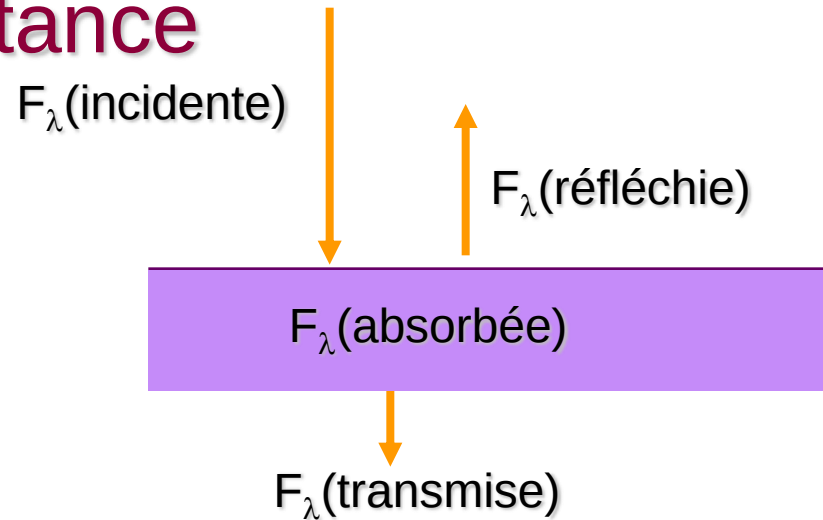
# Interaction matière-radiation



# Coefficient d'absorption (absorbance), réflectivité et transmittance

Par conservation d'énergie :

$$a_{\lambda} + r_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1$$



**Coefficient d'absorption**,  $a_{\lambda} = F_{\lambda}(\text{absorbée}) / F_{\lambda}(\text{incidente})$

**Réflectivité**,  $r_{\lambda} = F_{\lambda}(\text{réfléchie}) / F_{\lambda}(\text{incidente})$

**Transmittance**,  $\tau_{\lambda} = F_{\lambda}(\text{transmise}) / F_{\lambda}(\text{incidente})$

**milieu opaque** :  $\tau_{\lambda} = 0$

**milieu transparent** :  $\tau_{\lambda} = 1$

# Approximation du corps gris

Cette approximation s'applique à un corps opaque et ignore la dépendance spectrale de la réflectivité et du coefficient d'absorption ( de l'émissivité) dans un intervalle de longueur onde donné.

$$\bar{r} = \frac{F_r}{F_i}, \bar{a} = 1 - \bar{r}$$

*Important*

## Application de cette approximation en sciences de l'atmosphère :

- on assume une absorptivité constante dans le spectre solaire  $[0 < \lambda < 0,3 \mu\text{m}]$ ,  $a_{\text{sw}}$ ;
- et une autre absorptivité constante dans le spectre du rayonnement terrestre  $[0,3 < \lambda < 100 \mu\text{m}]$ ,  $a_{\text{lw}}$ .

La réflectivité moyenne d'une surface dans le spectre du rayonnement solaire s'appelle son **albédo**.

# Loi de Kirchhoff

$$\varepsilon_{\lambda} = a_{\lambda}$$

Pour une surface en équilibre thermique l'émissivité est égale à l'absorbance à la même longueur d'onde. Un bon émetteur est un bon absorbeur.

On applique la loi de Kirchhoff aussi à un corps gris ou à un intervalle fini de longueurs d'onde.

$$\varepsilon = a$$

**Attention** : ceci est toujours une approximation dans le cas d'une surface réelle. Les surfaces réelles ont des absorptivités qui dépendent et de la longueur d'onde et de la direction.

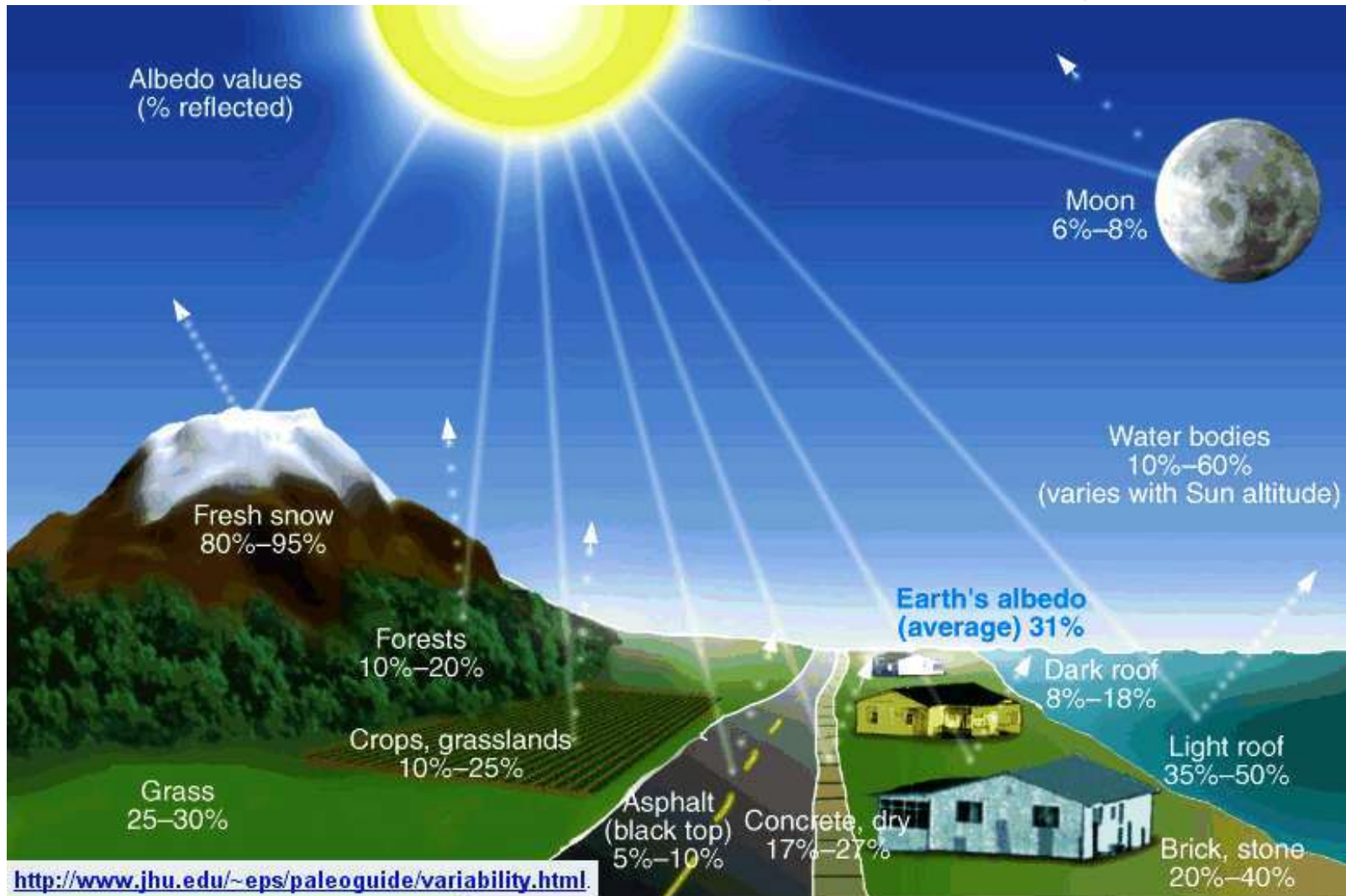


*Engagez votre cerveau*

Même si **l'émissivité** est égale à **l'absorbance**, la quantité de rayonnement **émis** n'est pas forcément égale à la quantité de rayonnement **absorbé**. **La quantité de rayonnement émis dépend de la température du corps; La quantité de rayonnement absorbée dépend de la quantité du rayonnement incident.**

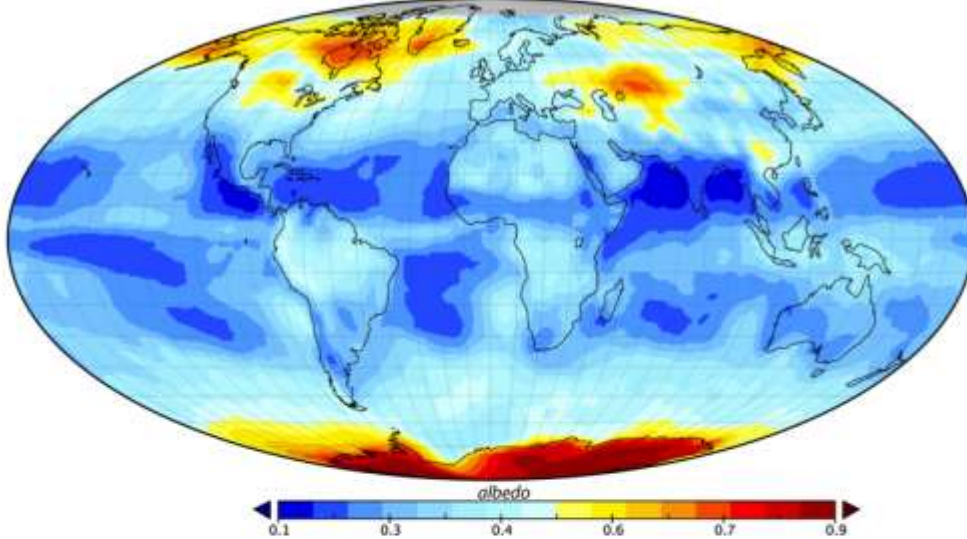
# L'albédo, $\alpha$

**L'albédo** d'une surface est sa réflectivité spectrale dans le spectre solaire

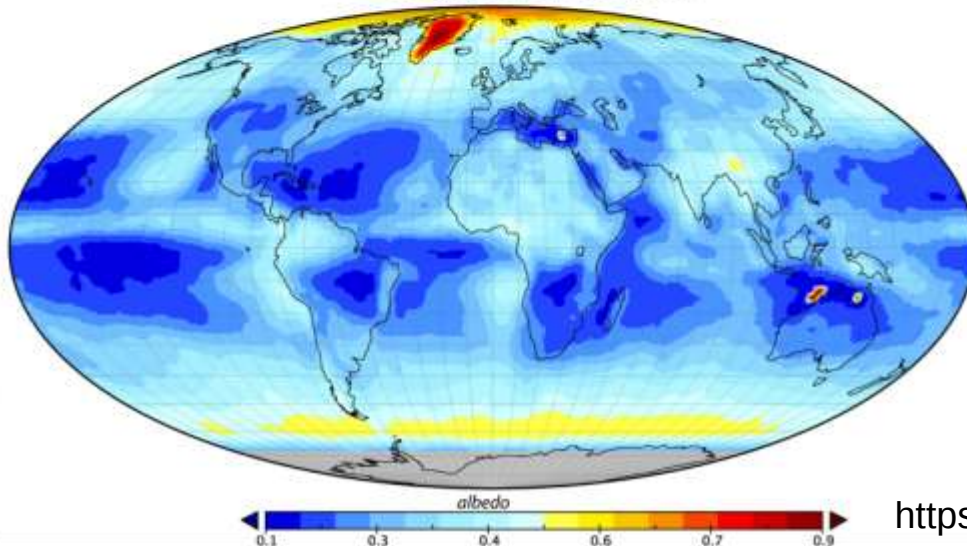


# Albédo de la surface terrestre

February Albedo (1974-1978)



July Albedo (1974-1978)



Laquelle des surfaces suivantes a l'albédo le plus élevé?

- A. Prairie
- B. Sable
- C. Forêt pluviale
- D. Neige

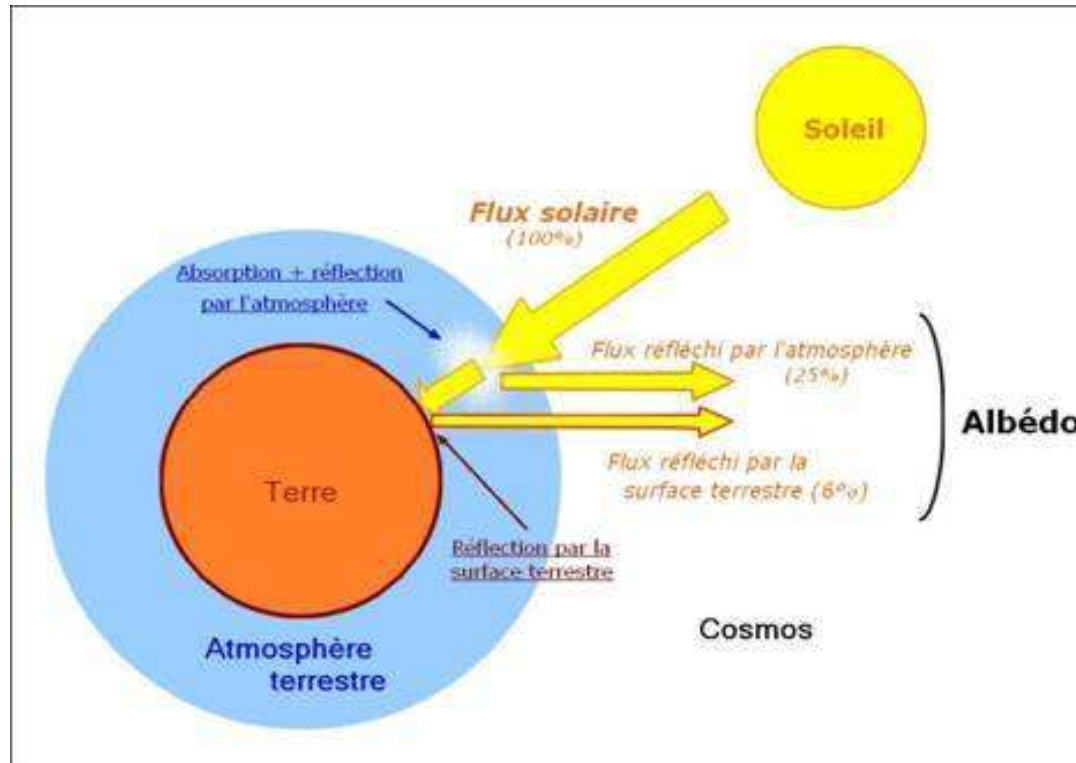


Pourquoi il n'y a pas de valeurs d'albédo proche du pôle nord en février et proche du pôle sud en juillet?



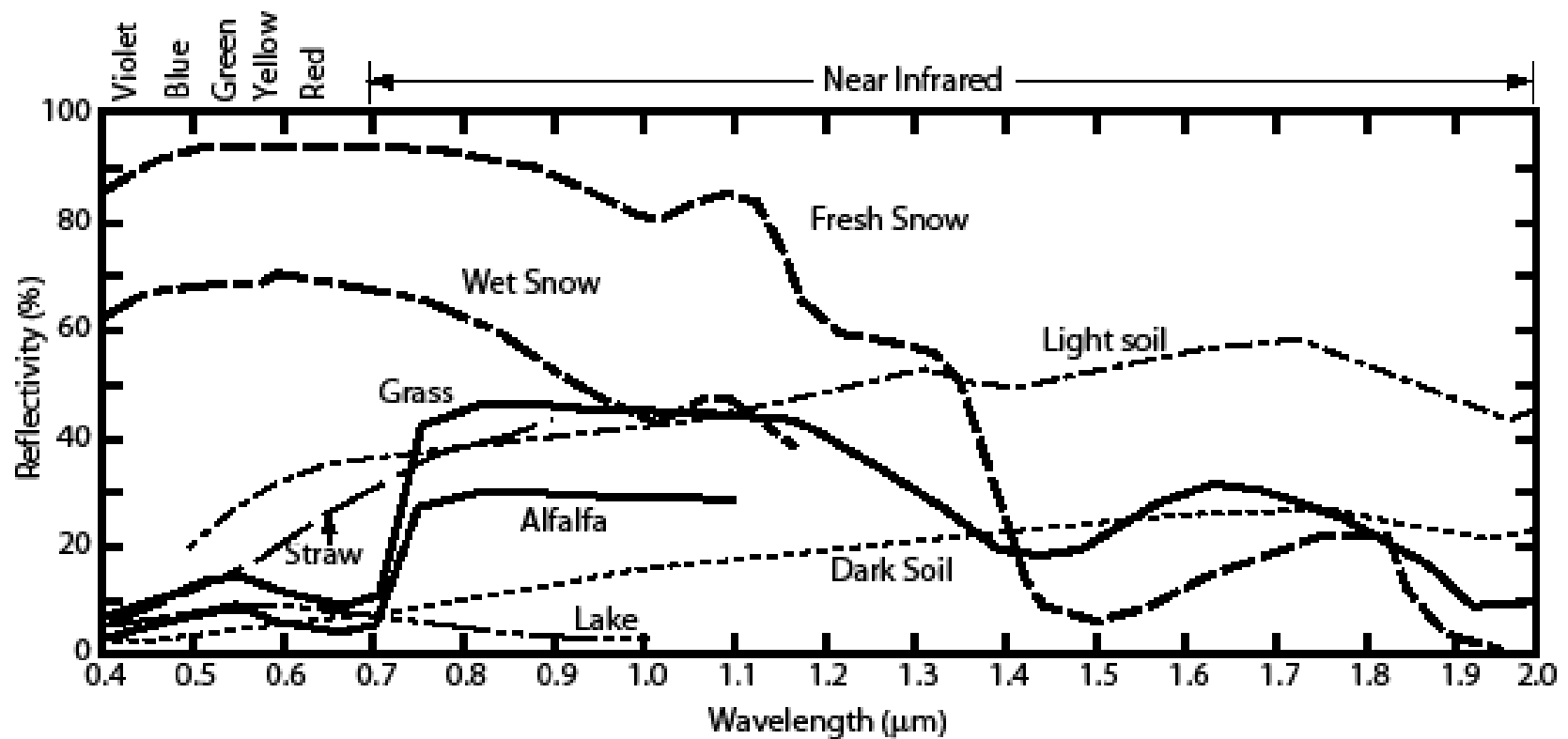
# L'albédo

**L'albédo** du système Terre-atmosphère est la fraction de l'énergie solaire qui est réfléchi vers l'espace. Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Sa valeur moyenne est de 0,3

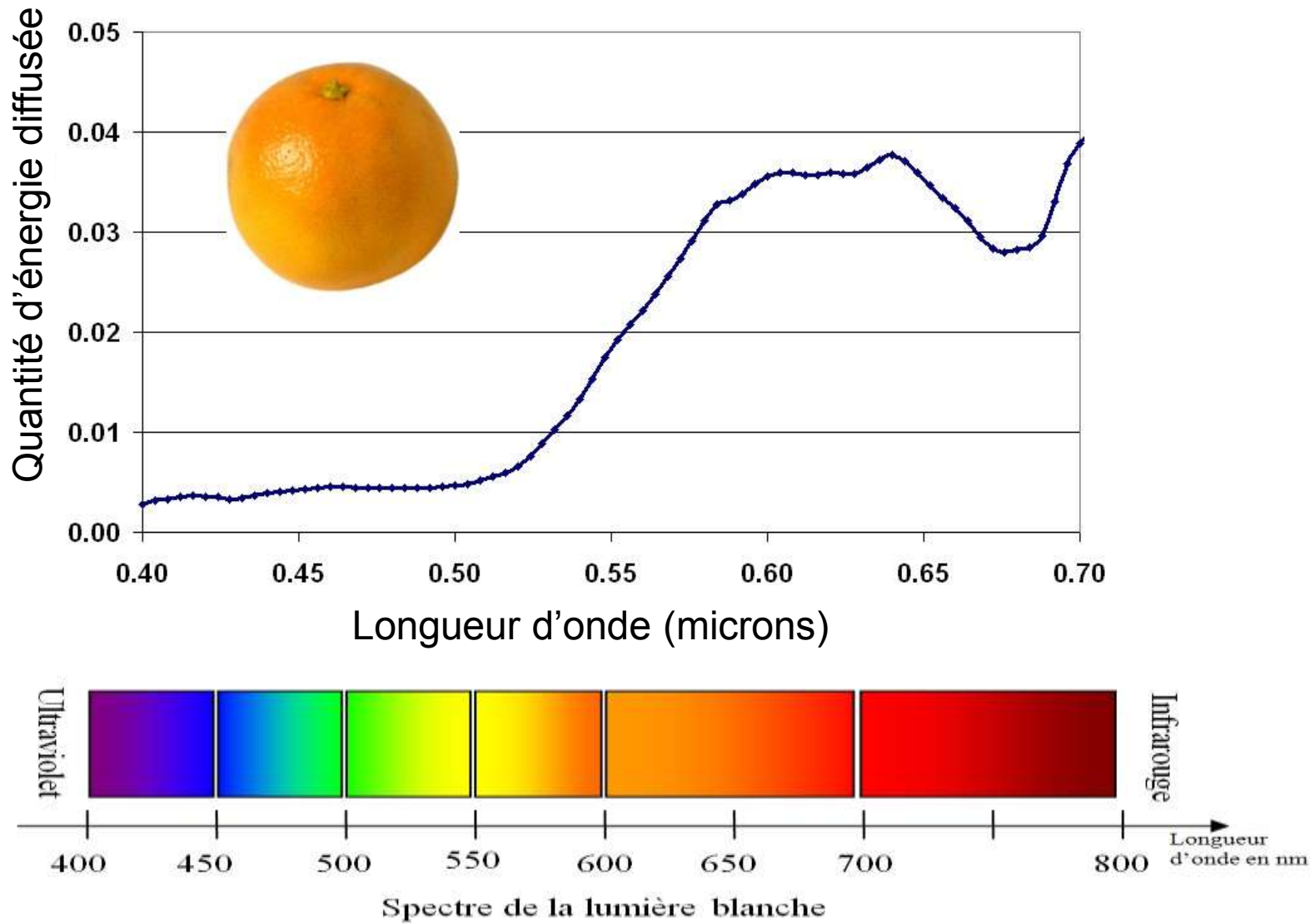


Les éléments qui contribuent le plus à l'albédo de la Terre sont les nuages, les surfaces de neige et de glace et les aérosols. Par exemple, l'albédo de la neige fraîche est de 0,87, ce qui signifie que 87 % de l'énergie solaire est réfléchi par ce type de neige.

# Exemples d'albédo spectral

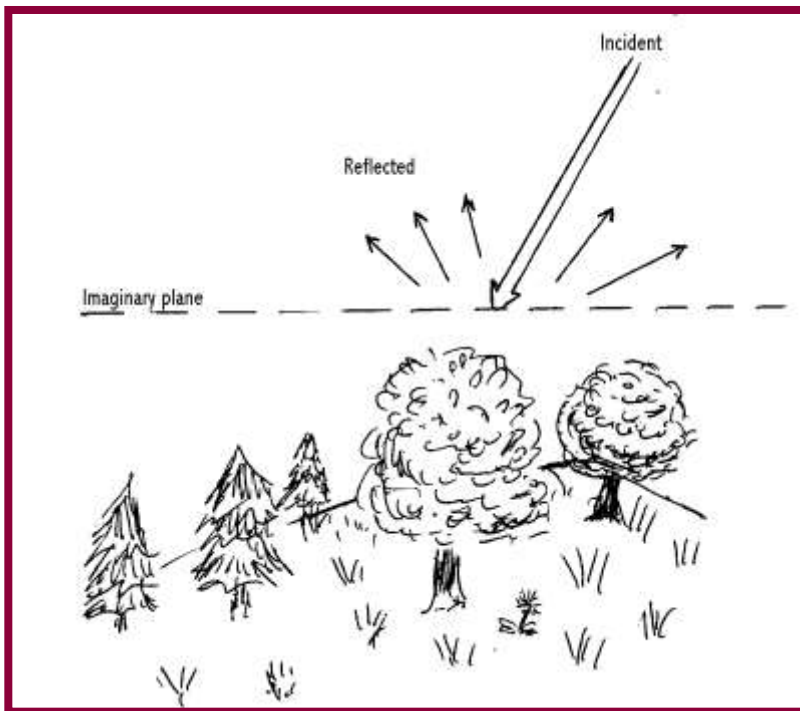


# Spectre de réflectivité d'une orange dans le visible



# Propriétés radiatives des surfaces naturelles

La plupart des surfaces naturelles sont trop complexes pour qu'on puisse déterminer leurs propriétés radiatives théoriquement. La caractérisation se fait par des mesures, donc empiriquement.



Surface plane équivalente

# Albédos caractéristiques de diverses surfaces

|                        |             |
|------------------------|-------------|
| Neige fraîche et sèche | 0,70 – 0,90 |
| Vieille neige          | 0,35 – 0,65 |
| Sable (désert)         | 0,25 – 0,40 |
| Végétation asséchée    | 0,20 – 0,30 |
| Forêt de feuillus      | 0,15 – 0,25 |
| Gazon                  | 0,15 – 0,25 |
| Surface océanique      | 0,00 – 0,70 |
| Sol sans végétation    | 0,10 – 0,25 |
| Forêt de conifères     | 0,10 – 0,15 |

# Résumé

- Le spectre électromagnétique est composé de rayonnement qu'on peut voir (visible), qu'on peut sentir (infrarouge), qu'on peut exploiter (microondes pour cuisiner et communiquer), du rayonnement dangereux pour nous (rayons X, rayons gamma et une grande partie du rayonnement UV).
- Les longueurs d'ondes que nous intéressent dans ce cours sont le ultraviolette, le visible et l'infrarouge (proche et lointain).
- Les atomes et les molécules absorbent des longueurs d'onde pour lesquelles ils ont une certaine affinité. Un corps qui absorbe toutes les longueurs d'onde est un corps noir. Son absorbance est égale à 1.
- Un corps gris est un corps dont l'absorbance ne dépend pas de la longueur d'onde et est inférieure à 1
- Caractéristiques de la radiation électromagnétique :
  - Tous les objets émettent du rayonnement

# Résumé

- Caractéristiques de la radiation électromagnétique :
  - La quantité d'énergie émise est proportionnelle à la température à la puissance 4 : loi de Stefan Boltzmann
  - La loi de Planck nous donne le spectre d'énergie émis par le corps
  - La loi de Wien permet le calcul de la longueur d'onde qui correspond au maximum d'énergie émise. Selon cette loi la longueur d'onde du maximum de la courbe de Planck est inversement proportionnelle à la température du corps noir.
- La radiation interagit avec la matière. Cette interaction dépend de la longueur d'onde et de la substance avec laquelle le rayonnement interagit. La radiation peut être
  - Absorbée : coefficient d'absorption ou **absorbance**
  - Réfléchie (rétrodiffusée) : **réflectivité**; L'**albédo** d'une surface est sa réflectivité dans le spectre solaire
  - Transmise : **transmittance**

# Résumé

- La loi de Kirchhoff nous dit que, à l'équilibre thermodynamique, un corps qui absorbe une longueur d'onde émettra avec la même efficacité cette même longueur d'onde. C'est-à-dire que son émissivité est égale à son absorbance. **La quantité de rayonnement absorbé dépend de la quantité du rayonnement incident.** **La quantité de rayonnement émis dépend de la température du corps.**

## À venir ...

Les transformations de l'énergie solaire dans le système terre-atmosphère ...

