

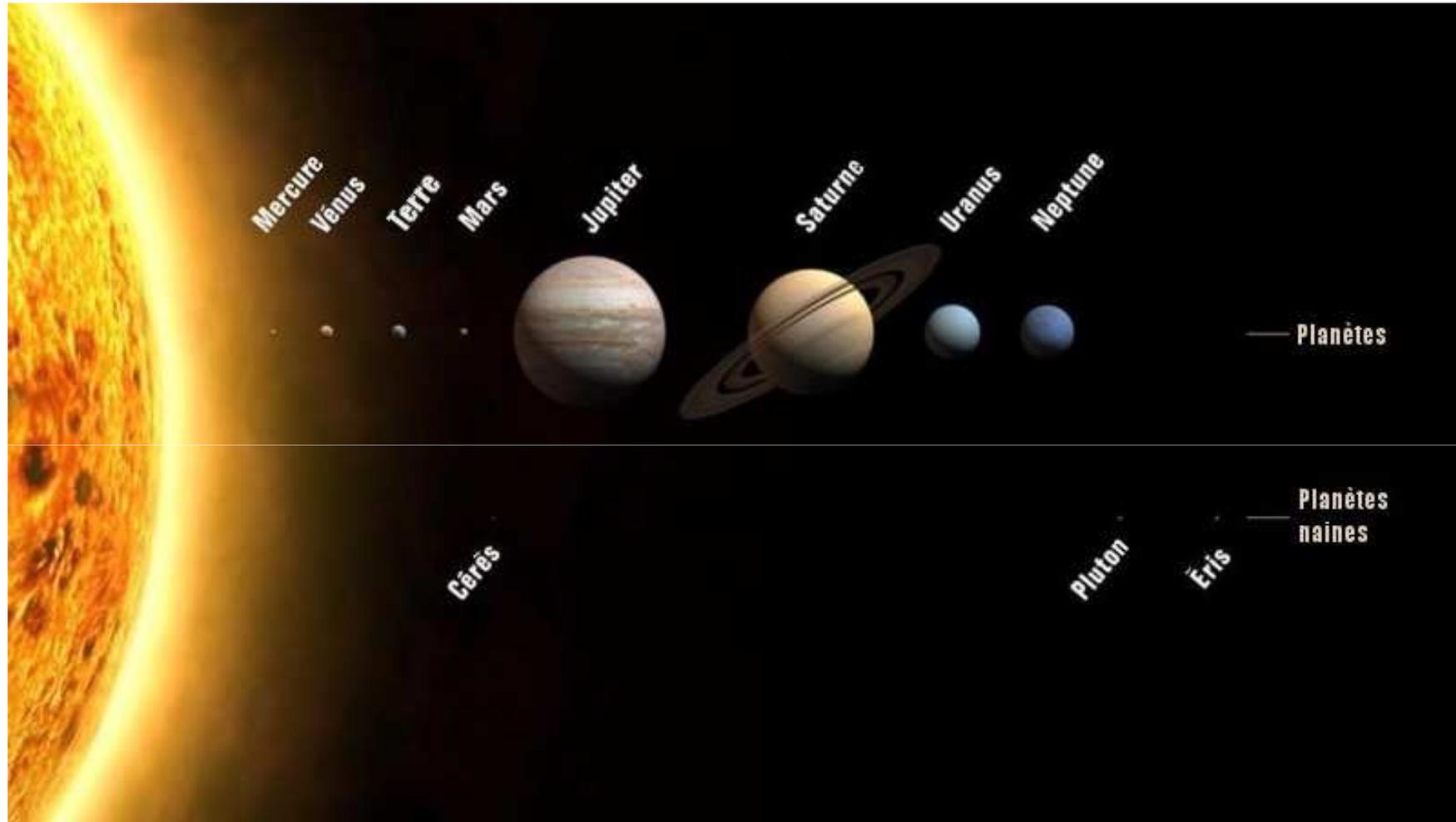
**DOSIMÉTRIE SOLAIRE :**  
**SPECTRE,**  
**INFLUENCE DE LA SAISON, DE LA LATITUDE ET**  
**DE LA MÉTÉO**  
**SUR LA DOSE LUMINEUSE DISPONIBLE**

Geneviève Bourg-Heckly

Laboratoire Jean Perrin,  
université Pierre et Marie Curie  
CNRS UMR 8237

SFLM congrès 2015

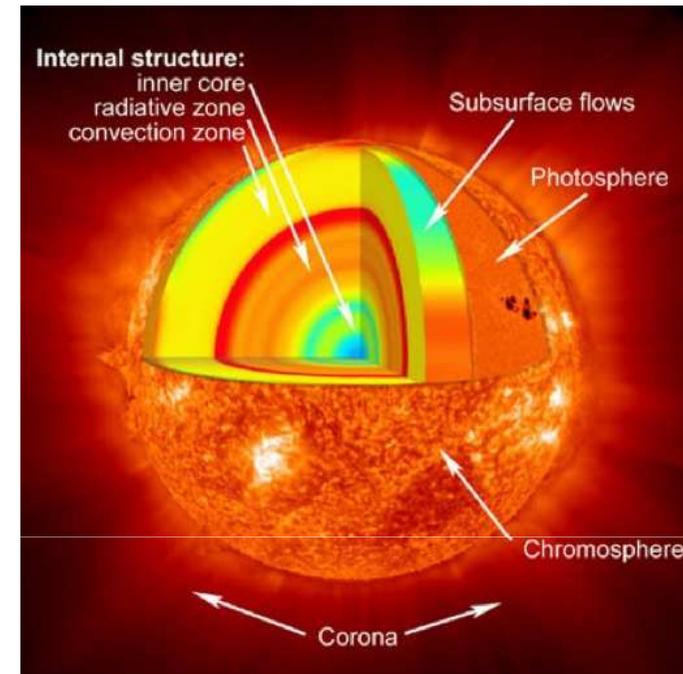
# Le système solaire



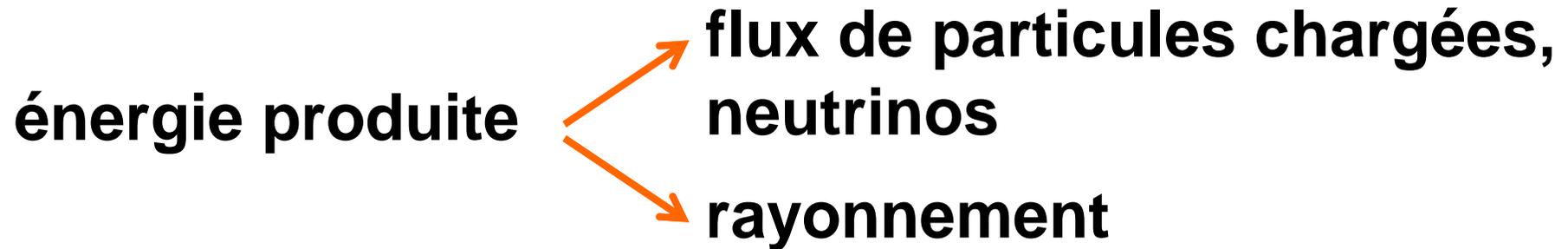
Soleil : 99% masse du système solaire  
distance Terre – Soleil : 150 millions kms

# Le soleil, une étoile banale de taille moyenne

- étoile de type G2V
- rayon : 700 000 kms (100 X  $R_{\text{Terre}}$ )
- masse : 330 000 X  $M_{\text{terre}}$
- sphère gazeuse : 74% H, 25% He
- température centrale : 15M degrés
- noyau siège des réactions de fusion thermonucléaire
- énergie produite par la fusion des noyaux d'hydrogène (protons) en Hélium migre du noyau vers la surface



# Le soleil, une source d'énergie

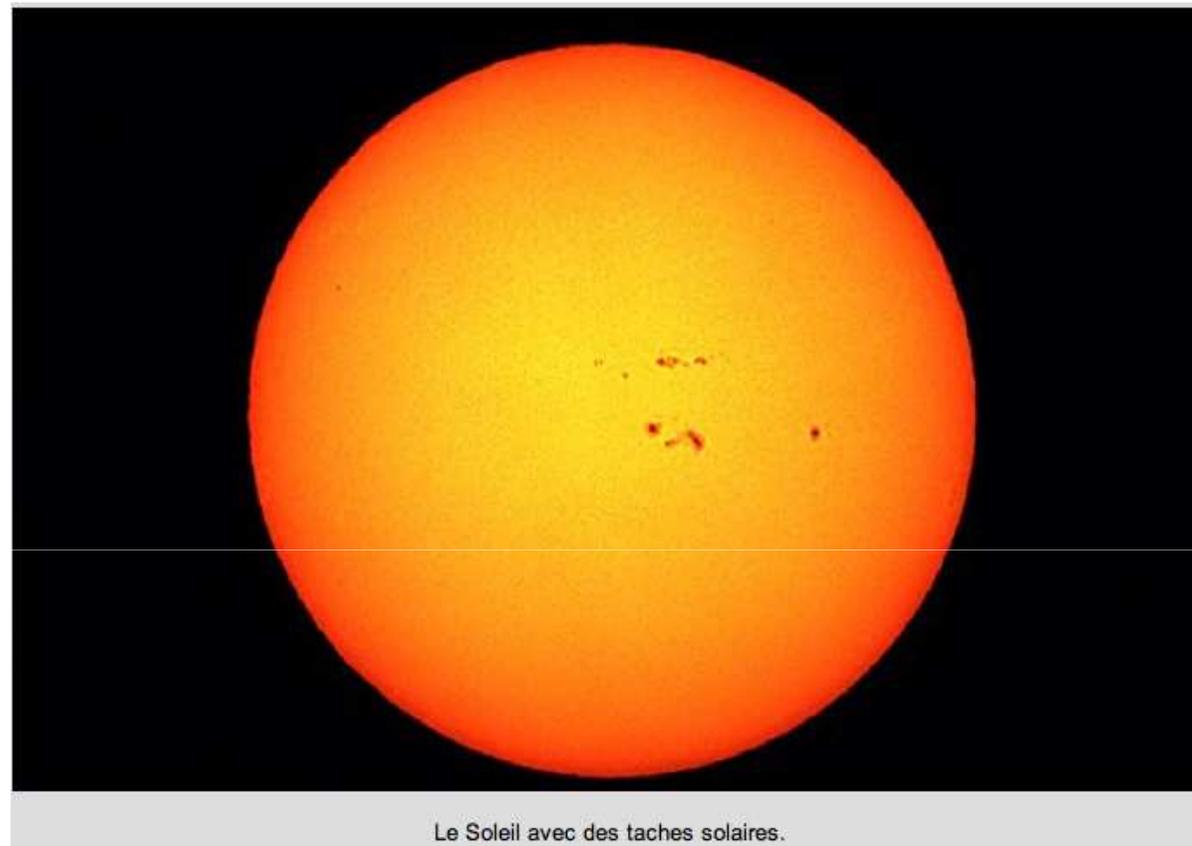


**Energie solaire émise dans tout l'espace :  $4 \times 10^{26}$  W  
( $6 \cdot 10^{12}$  bombe d'Hiroshima)**

**... une toute petite fraction reçue par la terre,**

**...1 heure de rayonnement solaire reçu par la terre =  
consommation annuelle mondiale d'énergie!!**

# La photosphère, surface visible du soleil



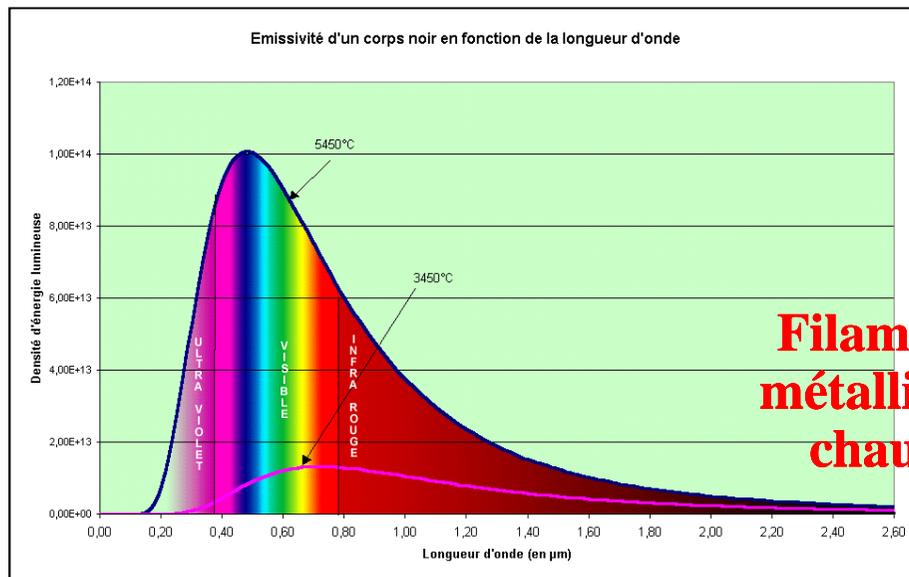
- fine couche gazeuse de 400 kms d'épaisseur
- produit la lumière visible
- corps noir à une température de 5777 °K

# Rayonnement émis par une source « chaude »

## ou émissivité du corps noir

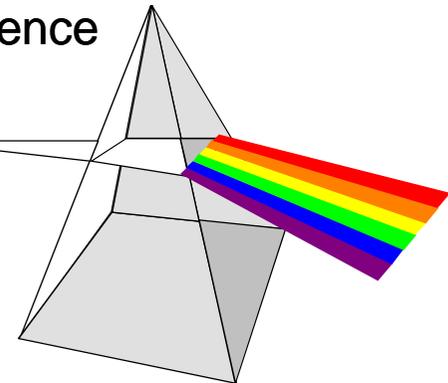
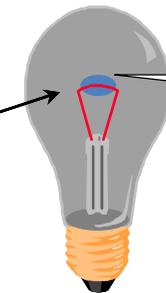
un corps noir est un corps qui absorbe toutes les radiations et réémet un rayonnement

- le spectre d'émission (puissance lumineuse émise en fonction de la longueur d'onde) est continu
- la répartition des longueurs d'onde du rayonnement émis dépend uniquement de la température



émission du corps noir

ampoule à incandescence



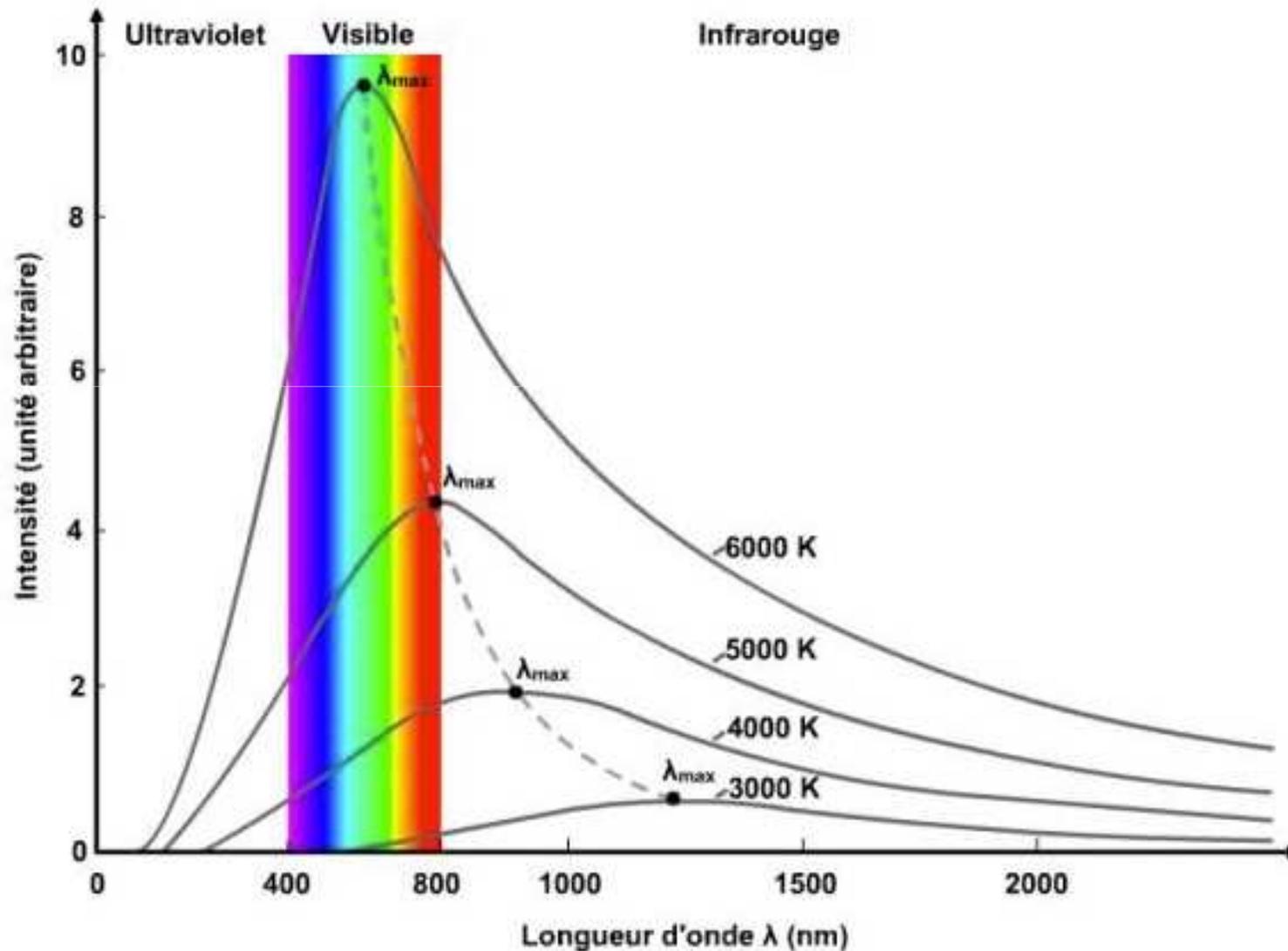
Filament  
métallique  
chaud

température filament

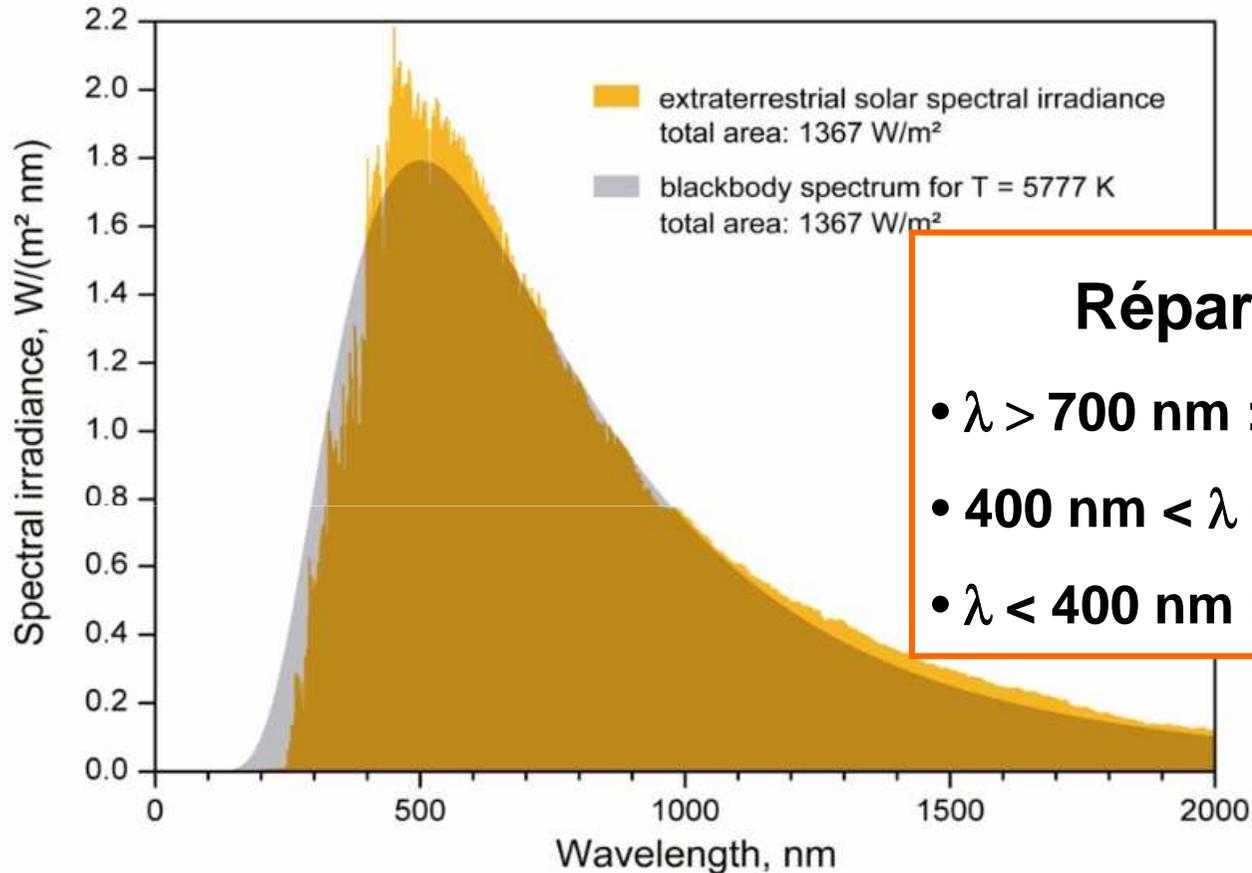
!!ampe incandescence : 2200°C

!!ampe halogène : 3000°C

# Rayonnement émis par un corps noir en fonction de sa température



# Spectre du rayonnement solaire ≈ rayonnement corps noir à 5777°K



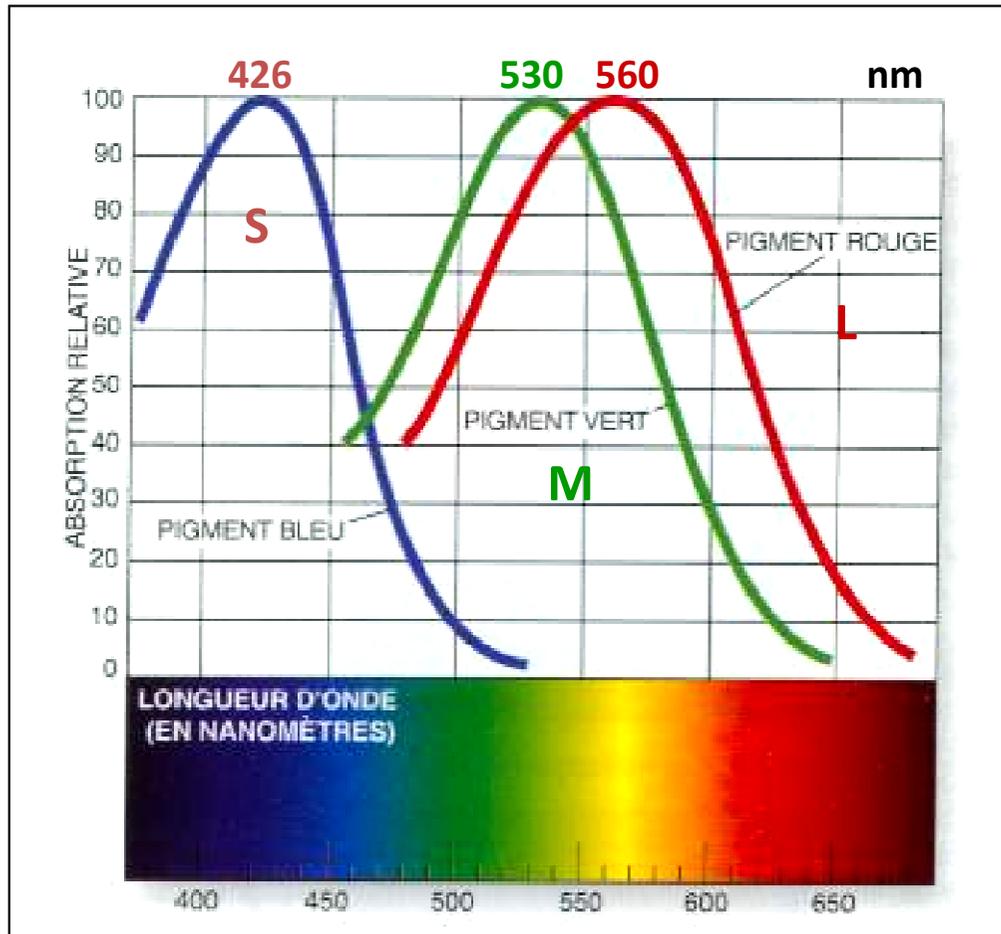
## Répartition spectrale

- $\lambda > 700 \text{ nm}$  : 52-55 %
- $400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$  : 42 – 43%
- $\lambda < 400 \text{ nm}$  : 3 – 5 %

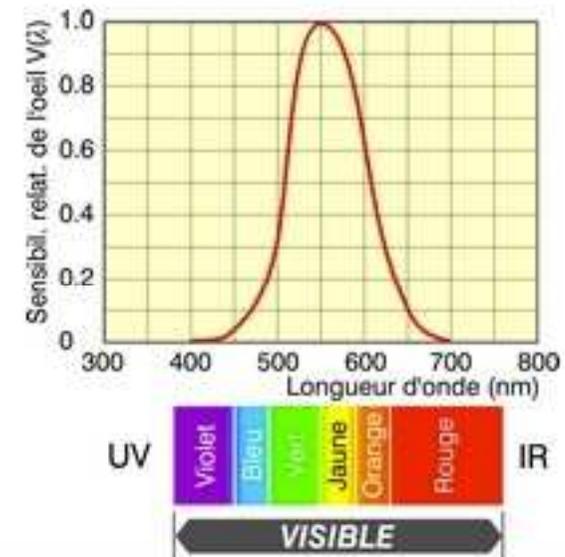
**constante solaire =**  
**irradiance sur une surface perpendiculaire aux rayons**  
**solaires en haut de l'atmosphère**  
 **$1366,1 \text{ Wm}^{-2} = 136,61 \text{ mWcm}^{-2}$**

# Vision de la couleur

3 types de cônes S (Short), M (Medium) et L(Long)  
sensibles à 3 bandes de longueurs d'onde



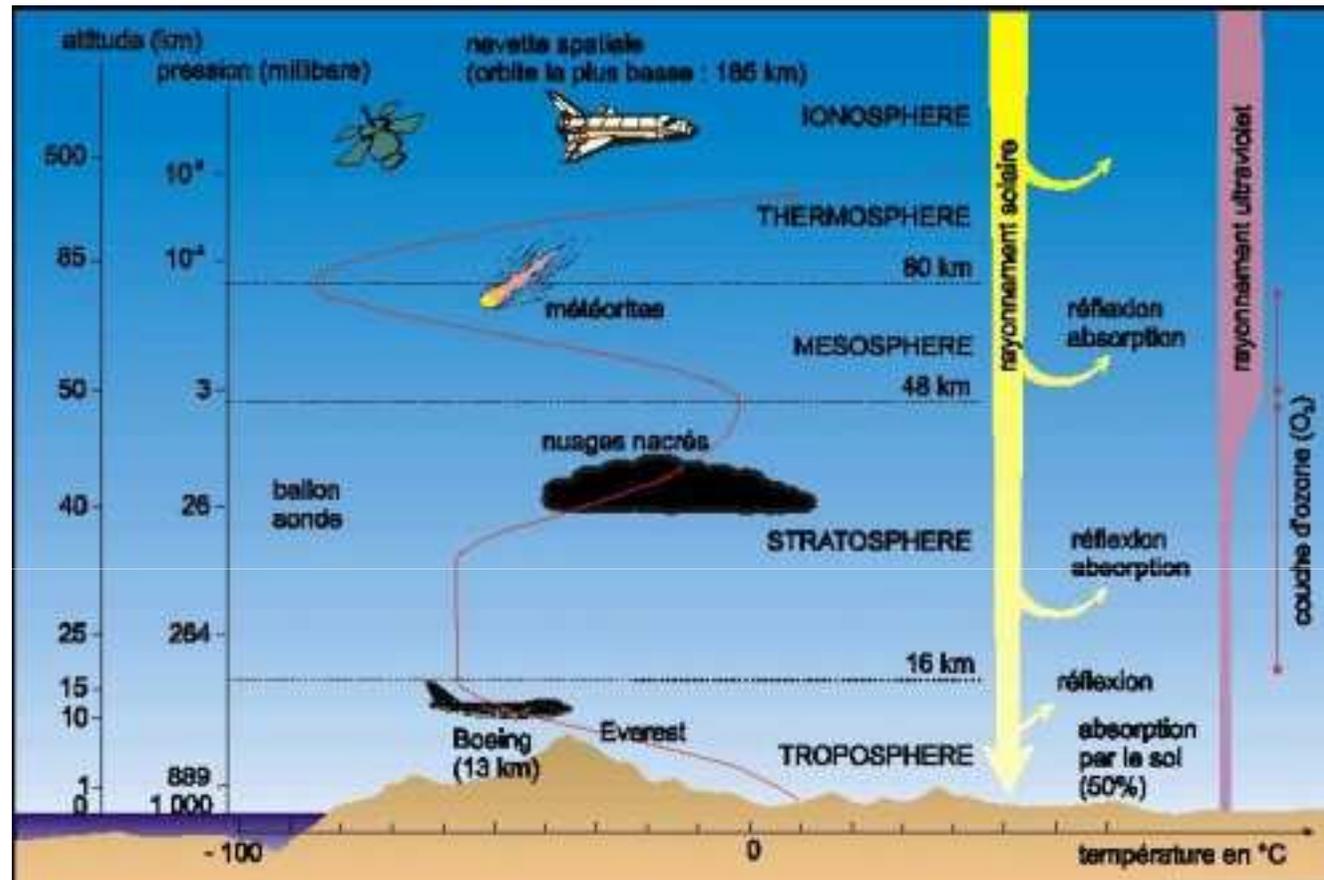
Vision trichromatique



Courbe spectrale de sensibilité de l'œil humain en vision diurne

Sensibilité spectrale de l'œil  
en vision diurne  
maximum  $\approx 555$  nm

# L'atmosphère terrestre



- épaisseur  $\approx$  800 kms
- 78% N<sub>2</sub>, 21% O<sub>2</sub> + gaz résiduels dont CO<sub>2</sub> ( $\approx$  400 ppm)
- $z < 16$  kms : 90% masse d'air
- $z < 5,6$  kms : 50% masse d'air
- effet de serre naturel  $\rightarrow$  température moyenne de 15°C au lieu de -18°C

# L'atmosphère terrestre : un filtre spectral

**absorption**

**diffusion**

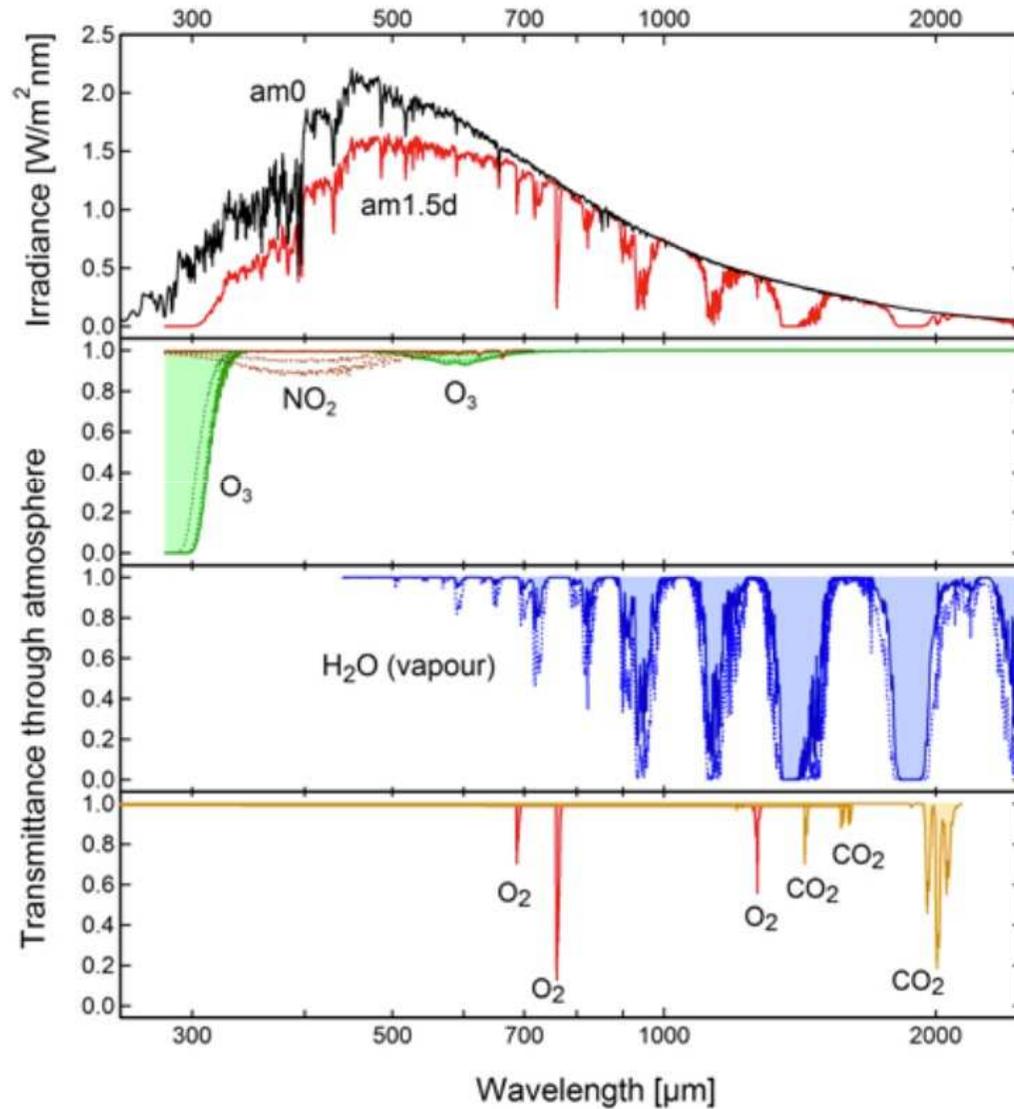
**rétrodiffusion vers l'espace**



**au niveau du sol**

- **la répartition spectrale du rayonnement diffère de celle observée au sommet de l'atmosphère**
- **l'irradiance est inférieure**

# Principales sources d'absorption



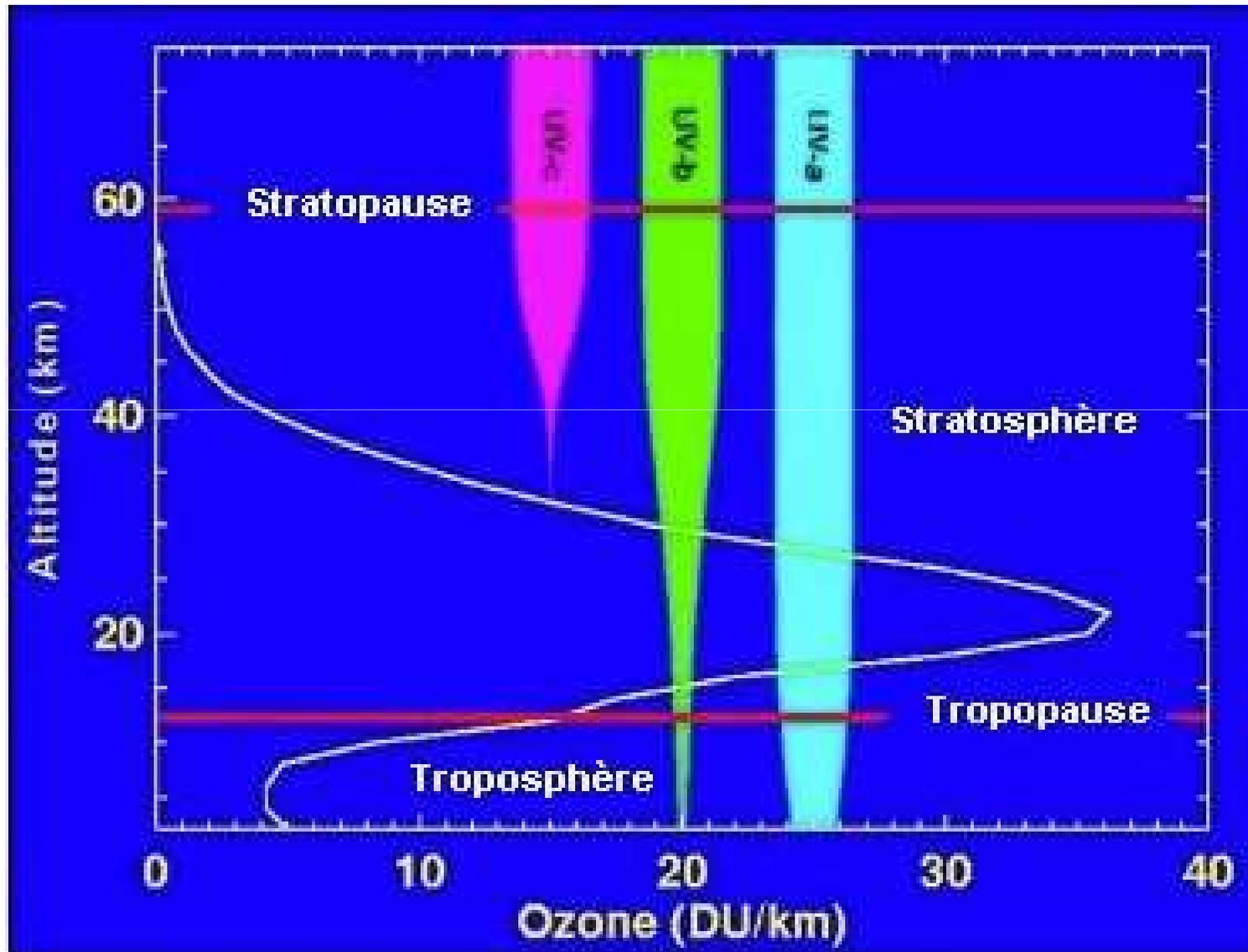
Oxygène

Ozone stratosphérique, **UV**

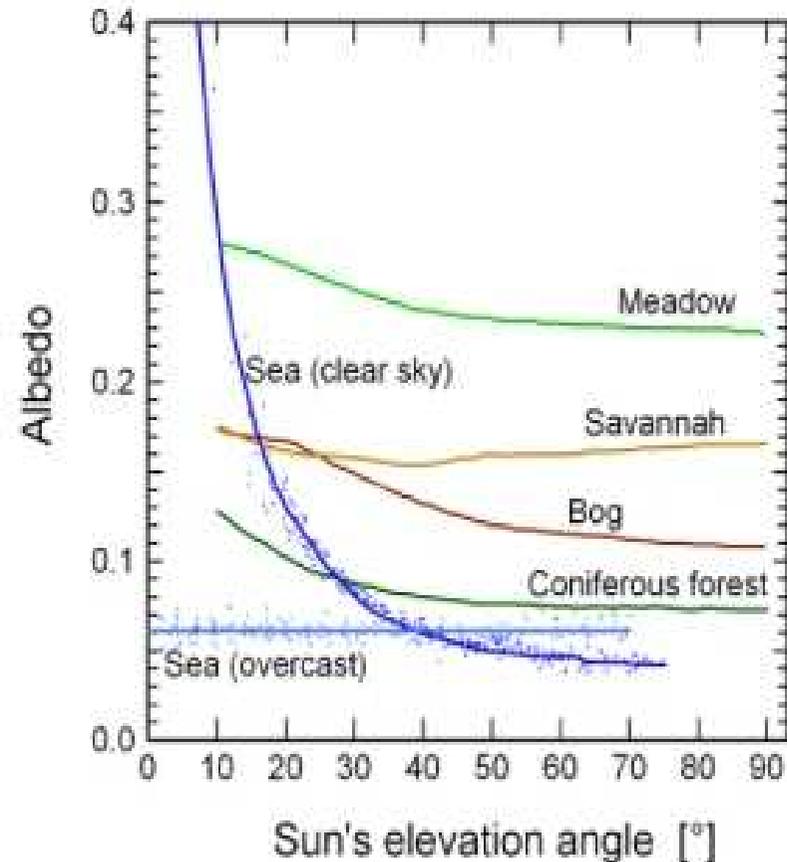
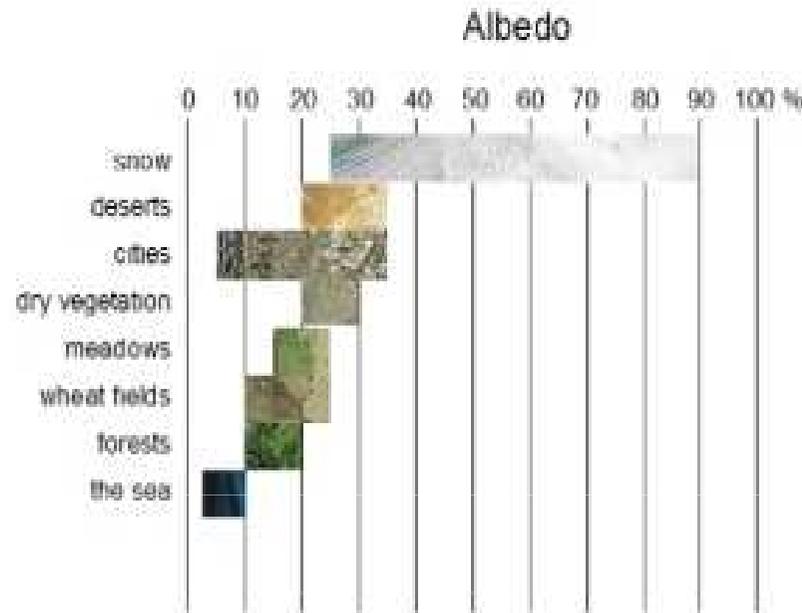
Vapeur d'eau troposphérique

Gaz carbonique CO<sub>2</sub>, **IR**

# L'atmosphère : un filtre spectral le rôle majeur de l'ozone



# Albedo = fraction de l'irradiance réfléchi

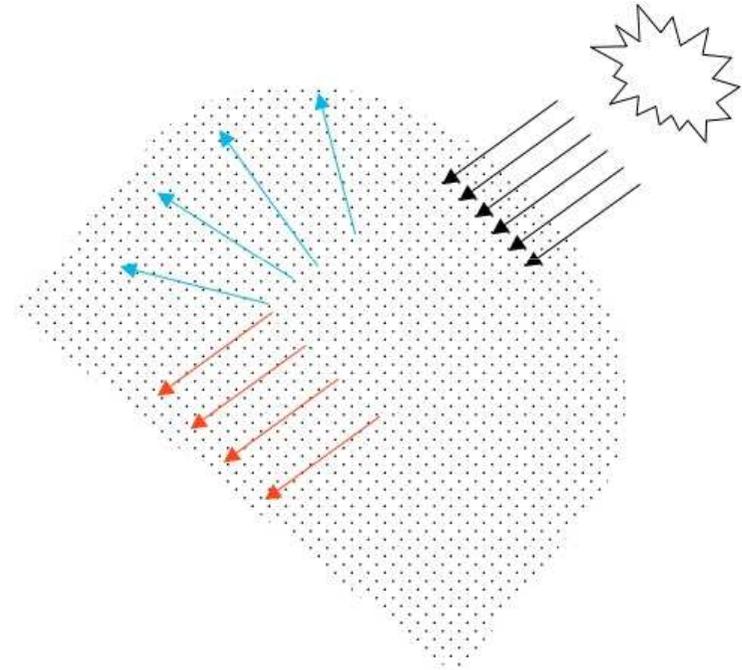


**l'albedo du rayonnement direct dépend de l'angle d'élévation  
solaire  
albedo moyen = 30%**

# Diffusion atmosphérique

**diffusion Rayleigh** : taille particule  $\ll \lambda$  : molécules de l'air  
Puissance rayonnée  $P$  proportionnelle à  $1/\lambda^4$

- couleur bleue du ciel sans nuages
- couleur rouge du soleil levant et couchant



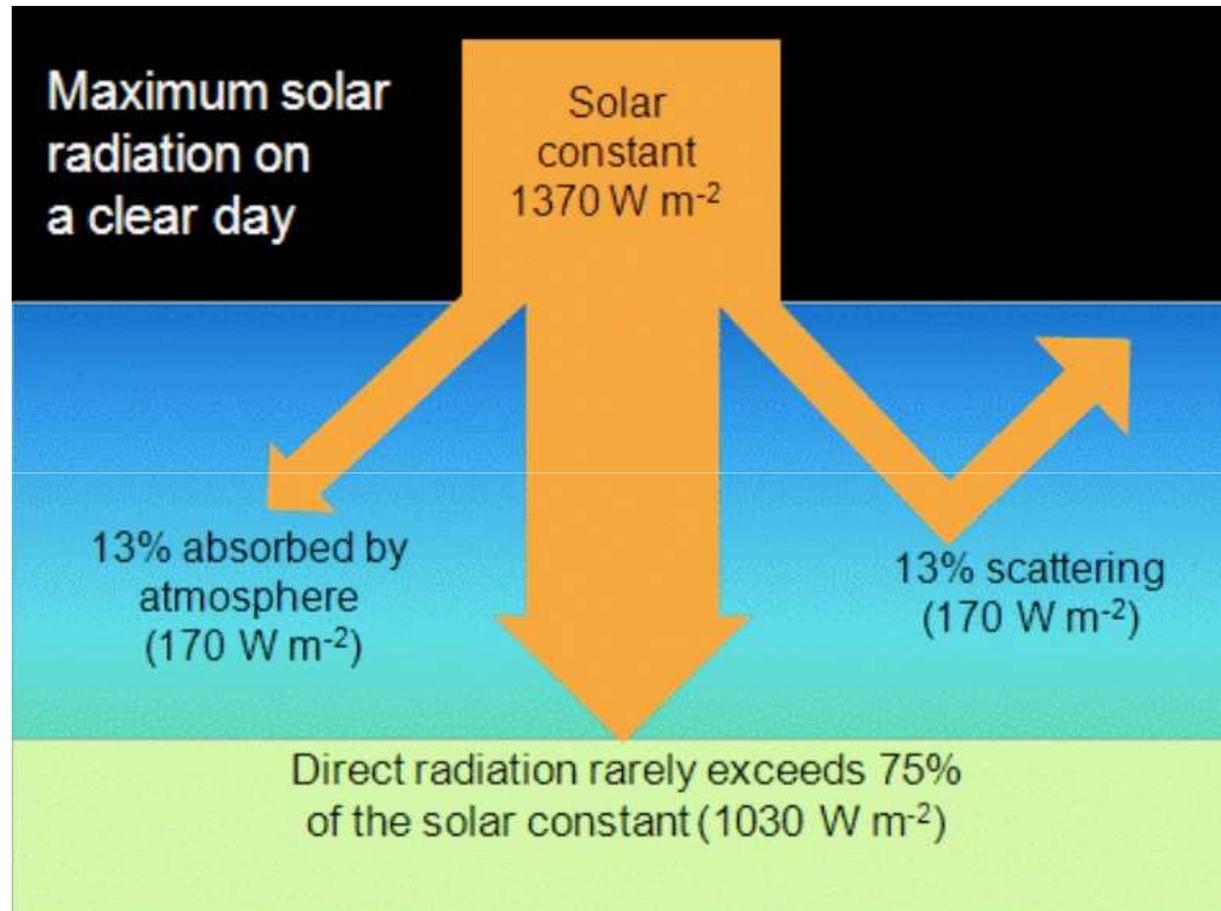
# Diffusion atmosphérique

**diffusion Mie** : taille particule  $\approx \lambda$  : poussières, aérosols ...  
Puissance rayonnée  $P$  dépend peu de  $\lambda$

- couleur blanche des nuages, brouillard
- nuages de pollution



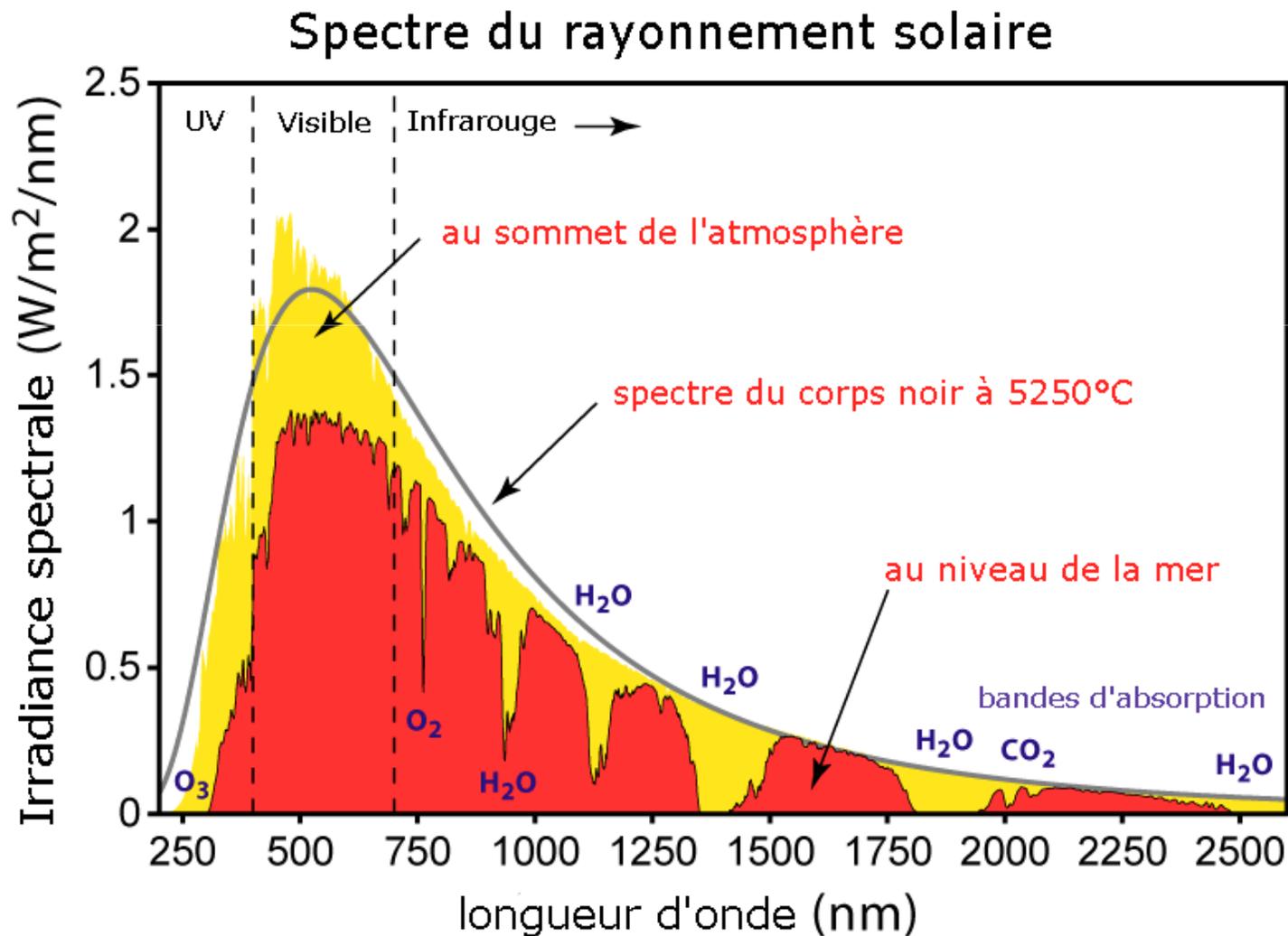
# Irradiance du rayonnement direct au niveau du sol



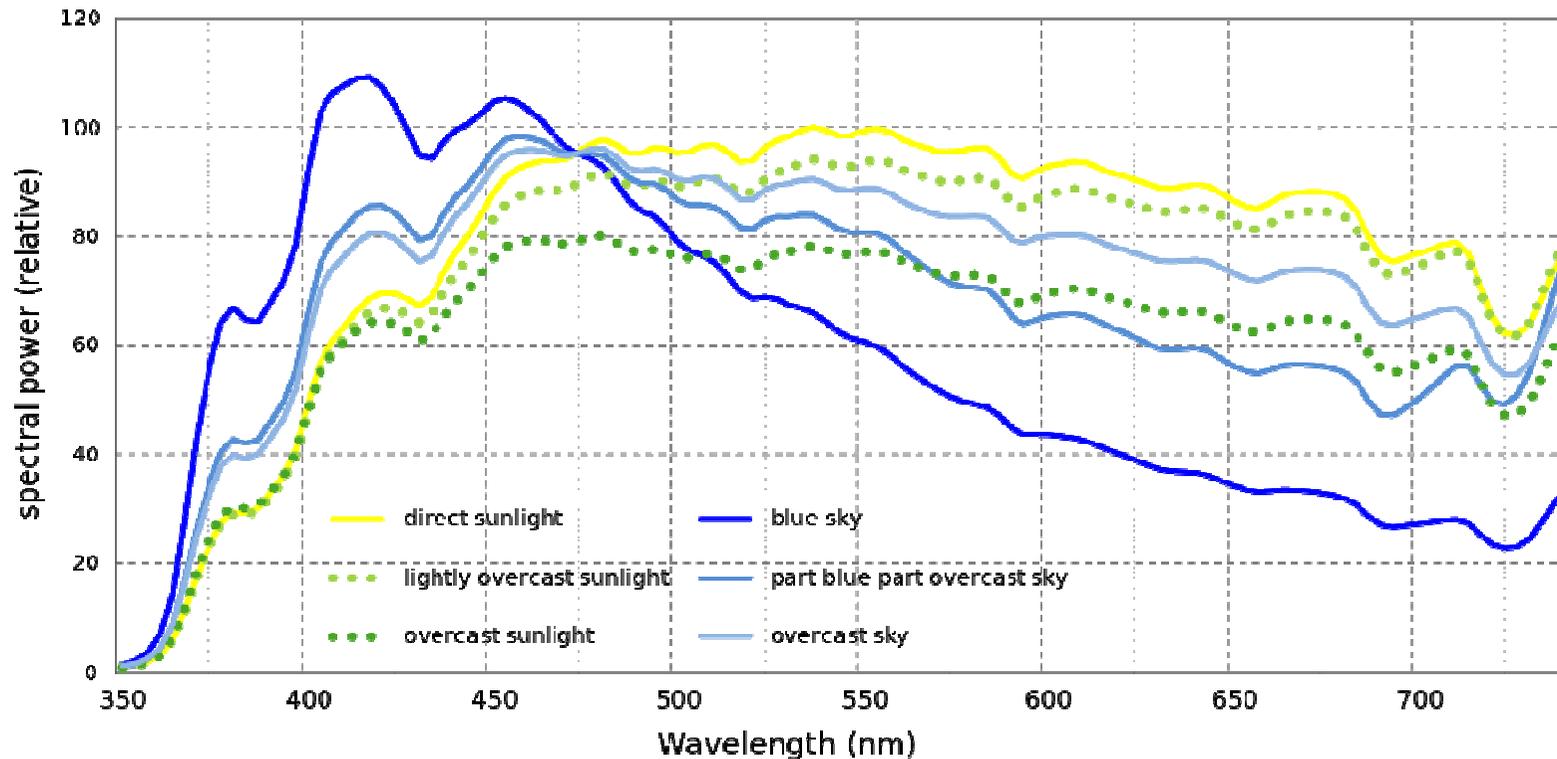
données à l'équateur au zénith par un jour sans nuages

Irradiance directe  $\approx 1000 \text{ Wm}^{-2}$  au mieux

# Spectre du rayonnement direct au niveau du sol

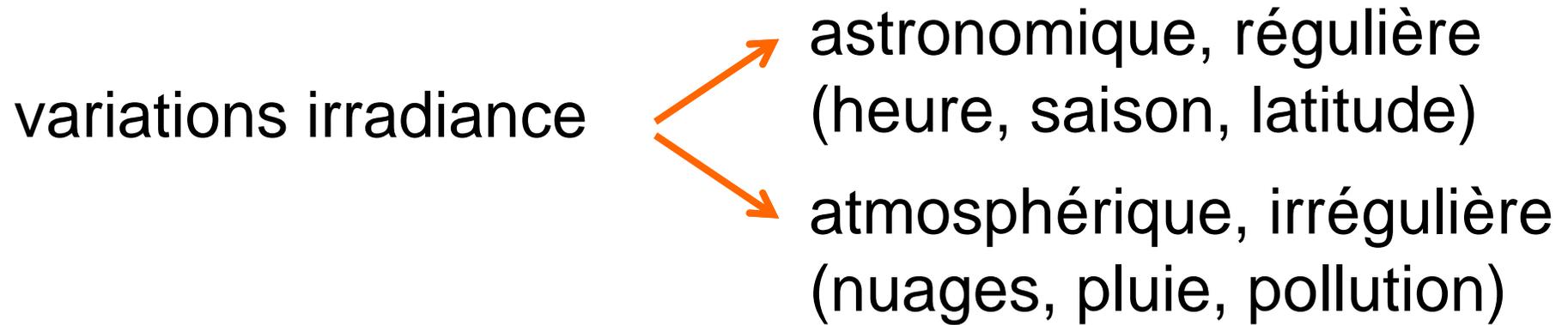


# Rayonnement global : direct et indirect



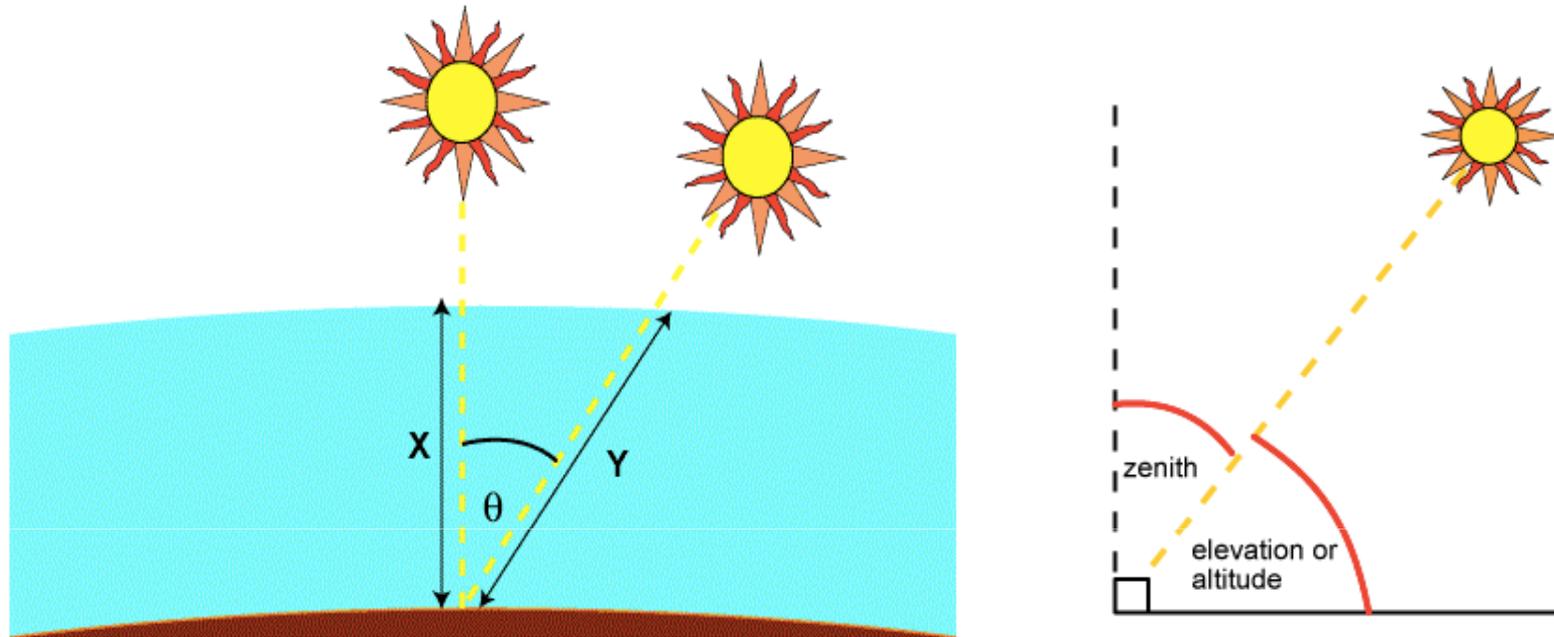
- le rayonnement qui tombe sur une surface est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus ou indirect
- la répartition spectrale du rayonnement indirect sans couverture nuageuse présente une composante bleue plus importante que celle du rayonnement direct (diffusion Rayleigh)

# Variabilité de l'irradiance solaire



# Variabilité régulière astronomique

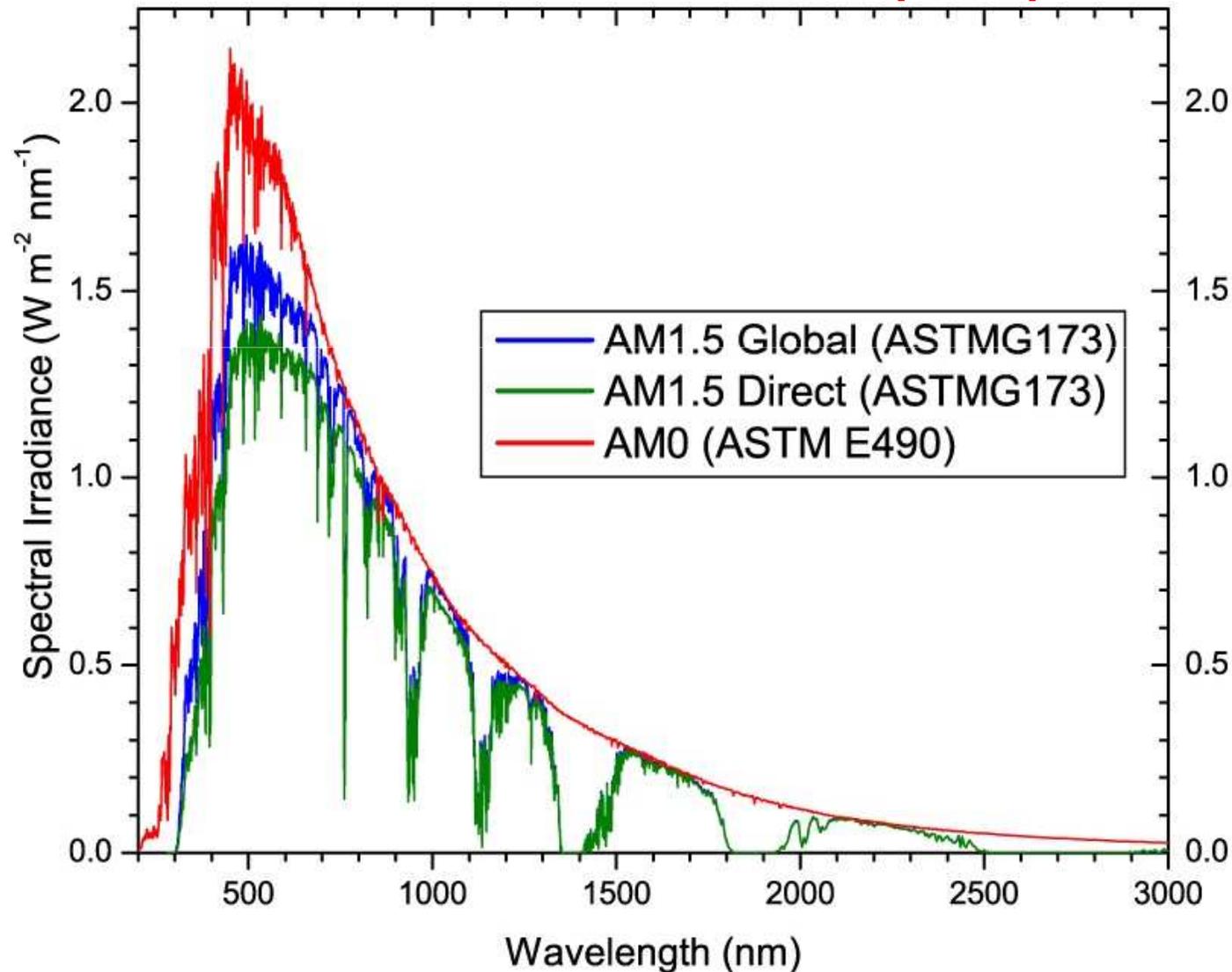
## Masse d'air (Air Mass)



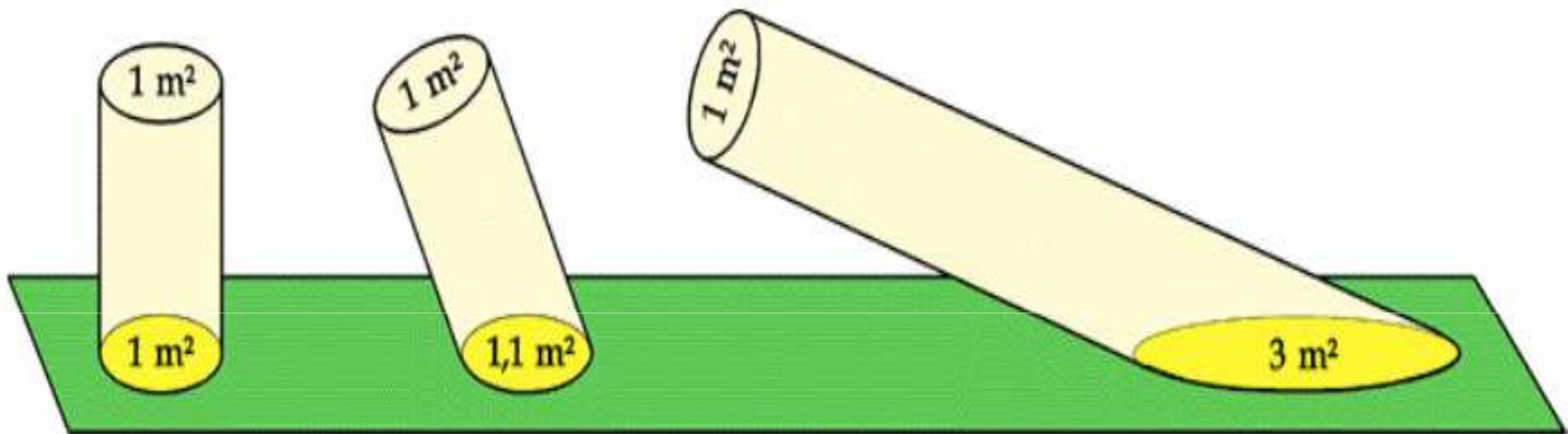
### Masse d'air

- distance traversée par le rayonnement solaire normalisée par rapport à la distance la plus courte (soleil au zénith) :  
 $AM = 1/\cos\theta$
- permet de quantifier la réduction de l'irradiance en fonction de la hauteur du soleil

# Composante directe et globale (directe + diffuse) de l'irradiance spectrale solaire en fonction de la masse d'air (AM) traversée

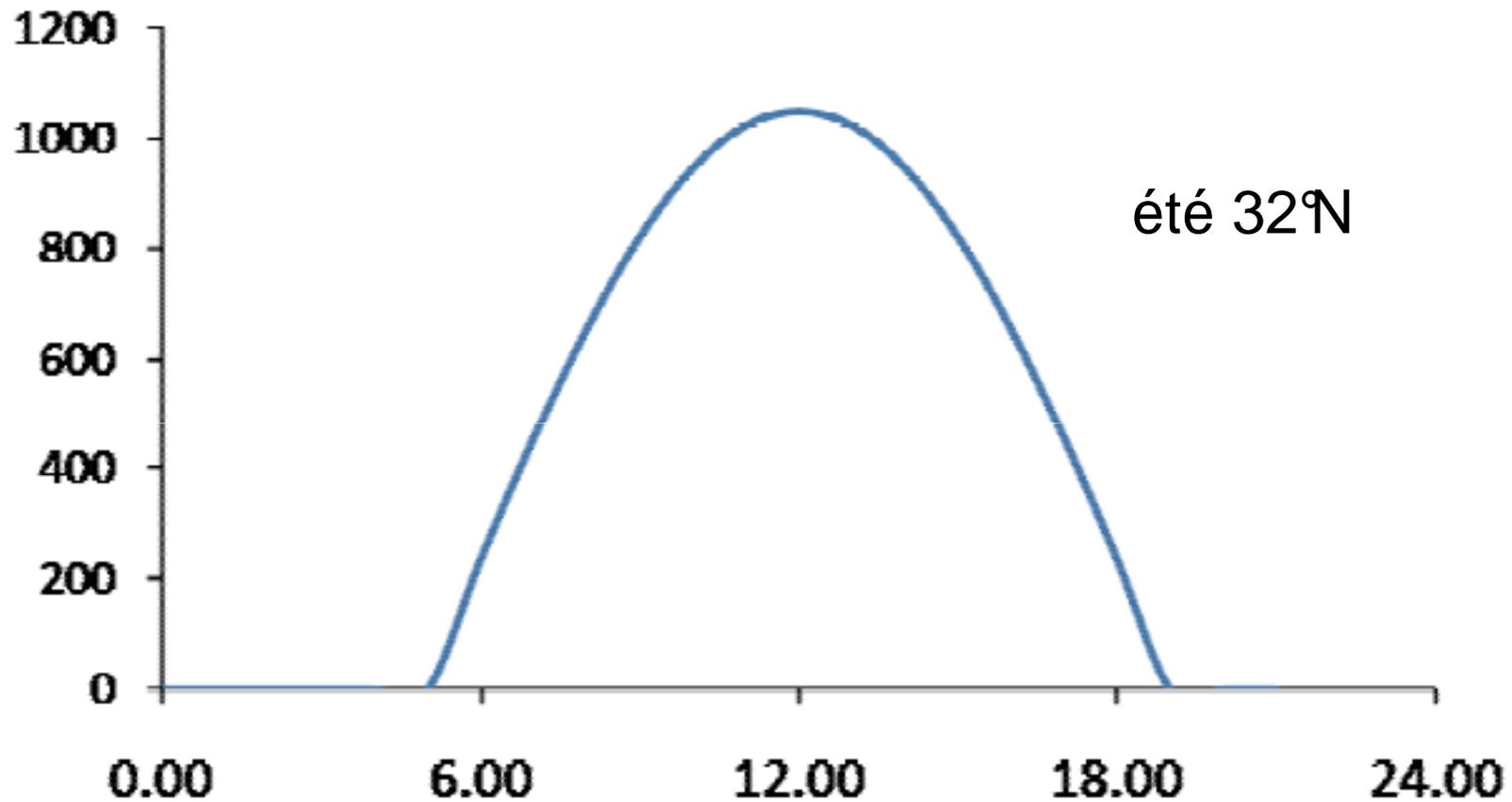


# Influence de la hauteur du soleil sur l'irradiance



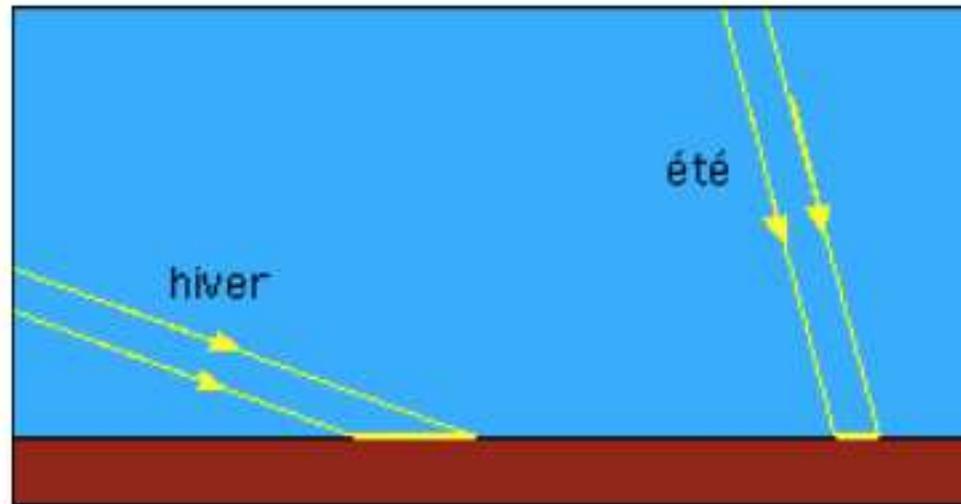
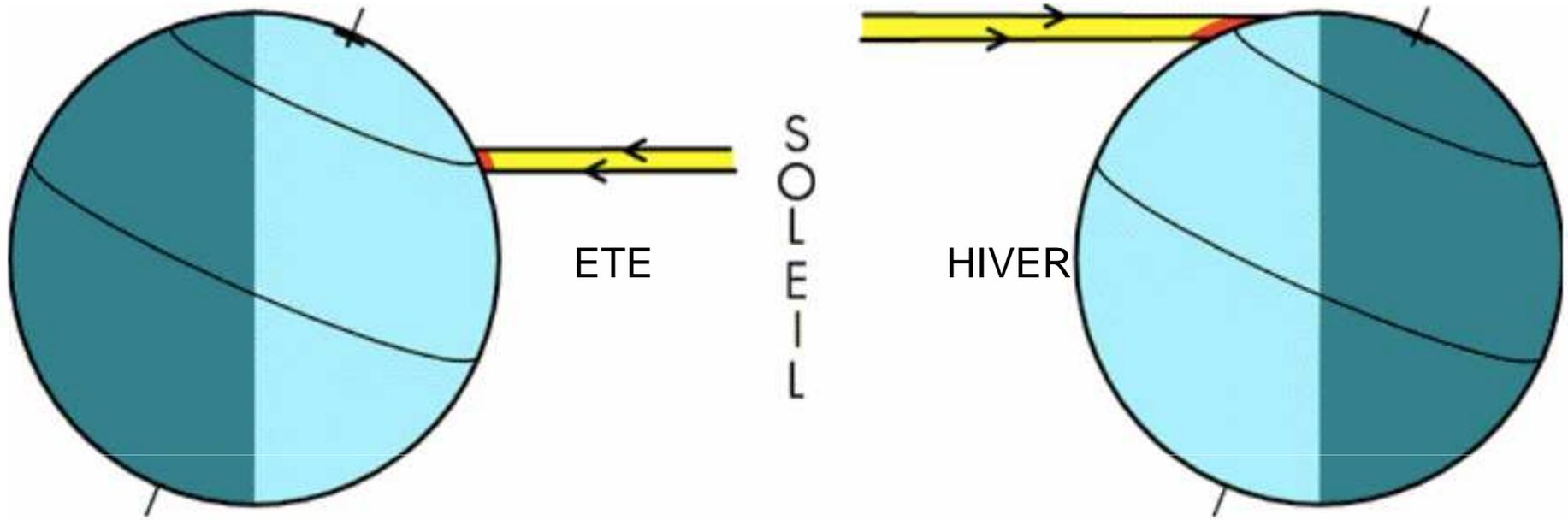
plus le soleil est bas sur l'horizon,  
plus la masse d'air est élevée, plus l'irradiance est faible

# Variation diurne de l'irradiance à une latitude donnée pour un jour d'été

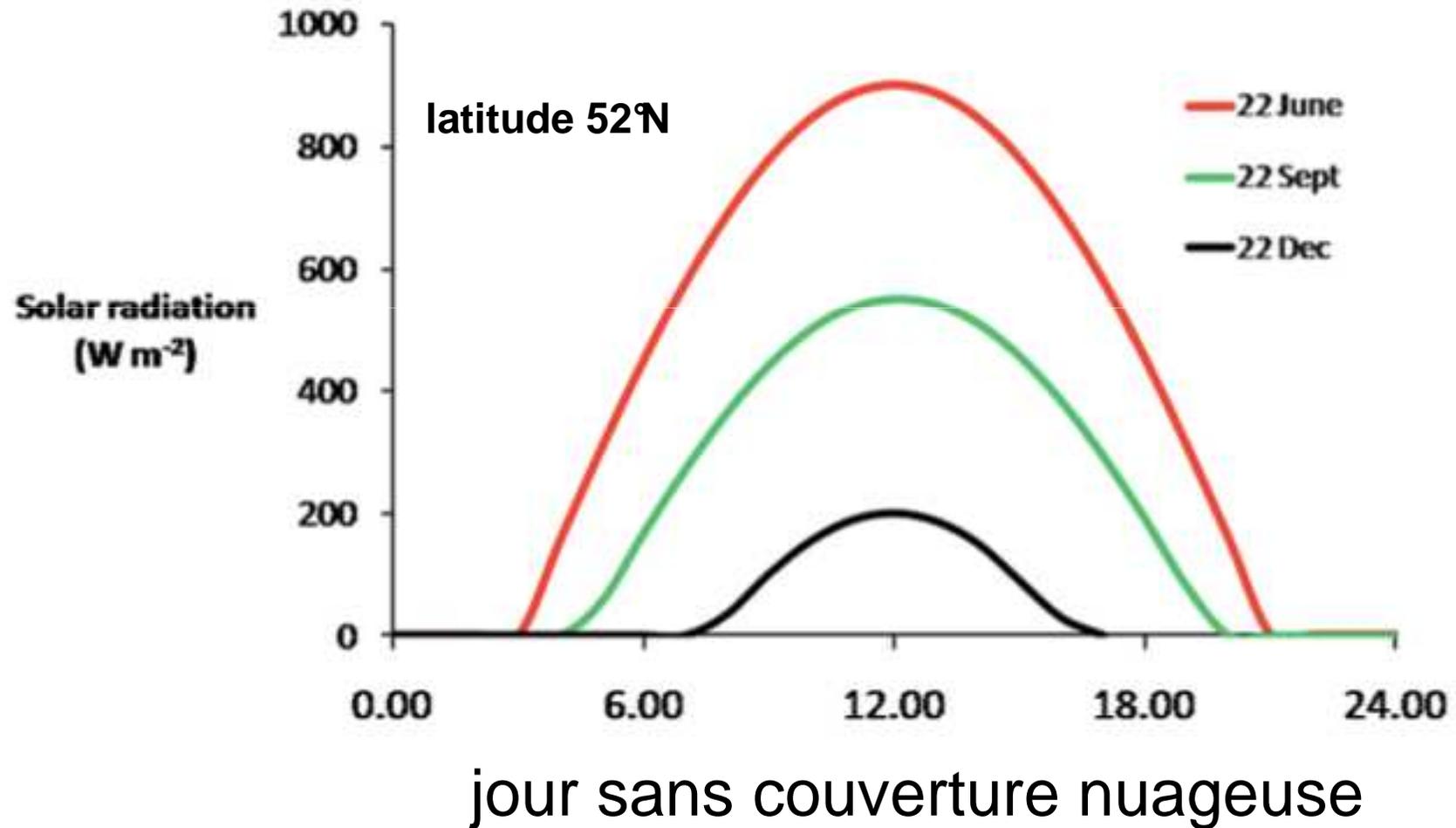


la variation suit une loi sinusoïdale

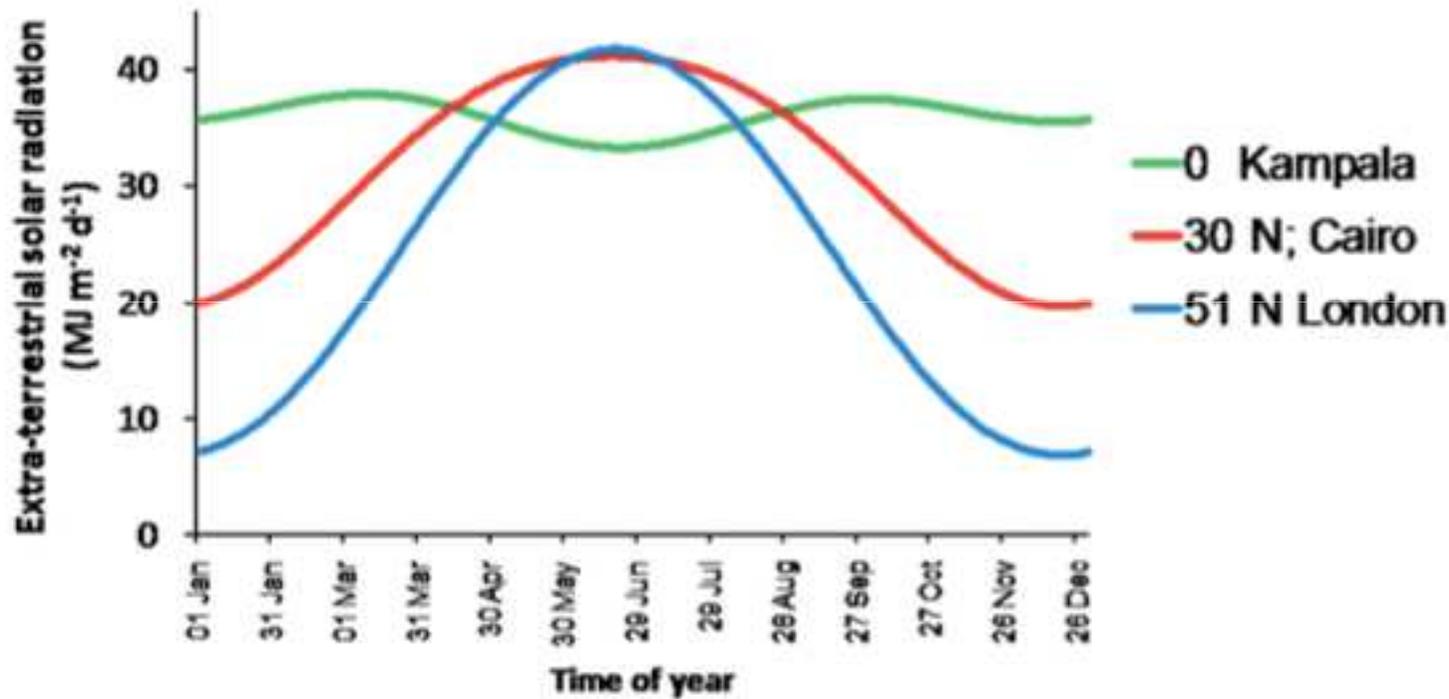
# EFFET DE LA SAISON



# Variation journalière de l'irradiance solaire en fonction de la saison à une latitude donnée

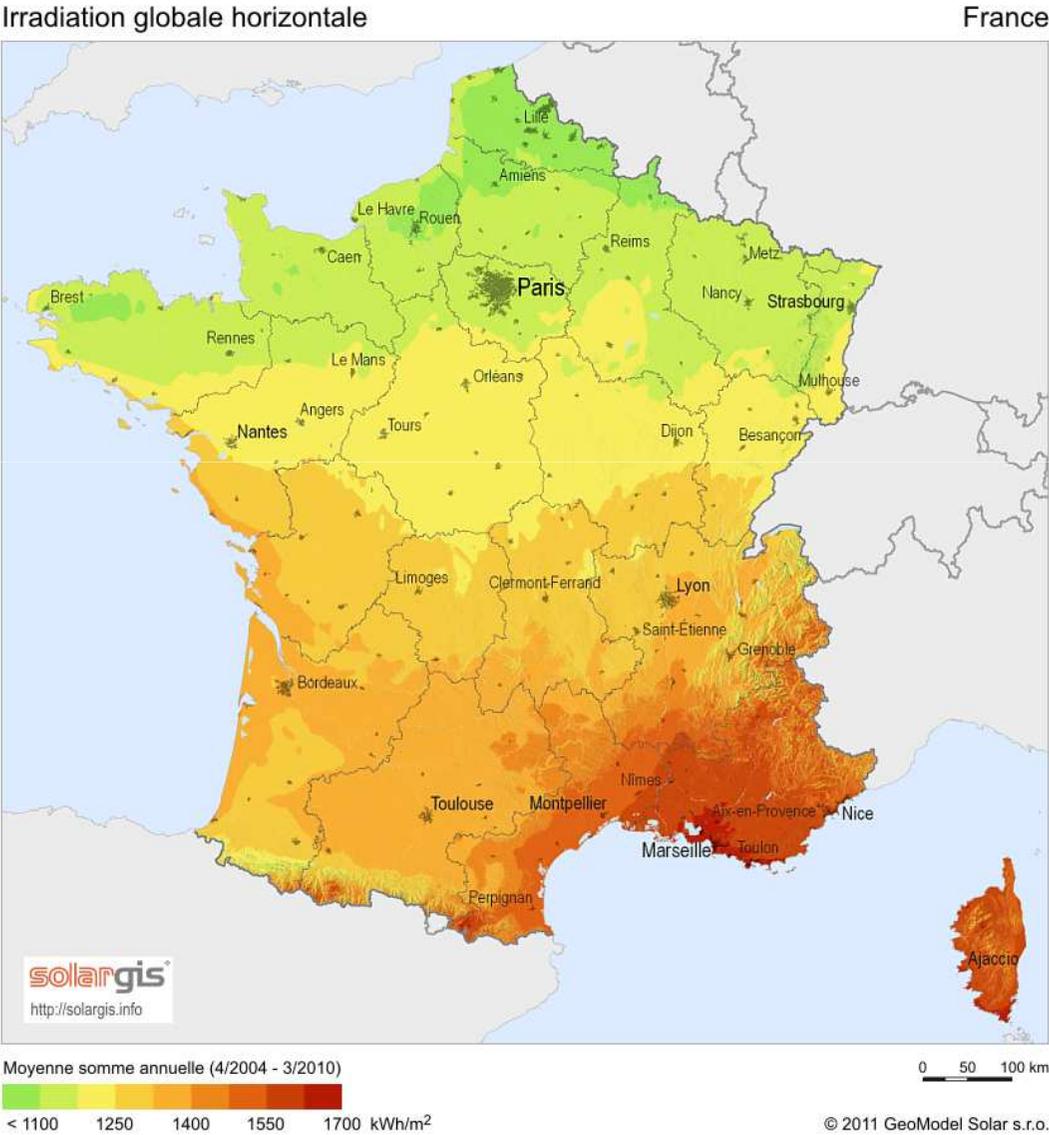


# Variation annuelle de la fluence solaire (MJoulesm<sup>-2</sup> par jour) en fonction de la latitude

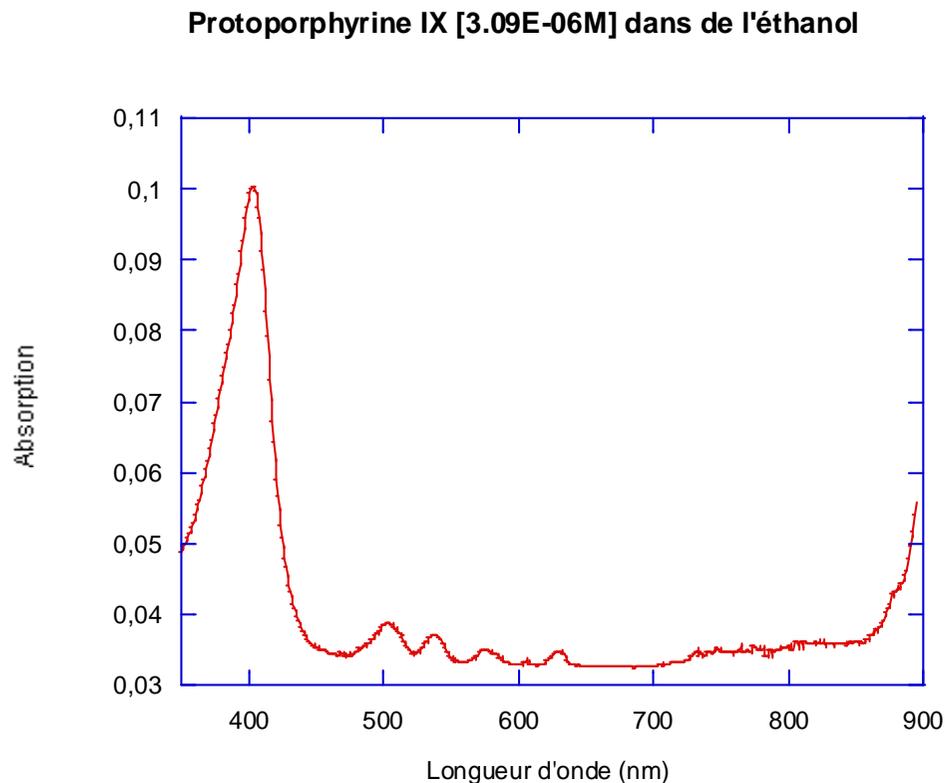


plus la latitude est élevée, plus la variation est forte au cours de l'année

# variation de la tience globale en France (kWhm<sup>-2</sup>)



# Daylight PDT Absorption de la Protoporphyrine IX



spectre d'absorption de la PpIX

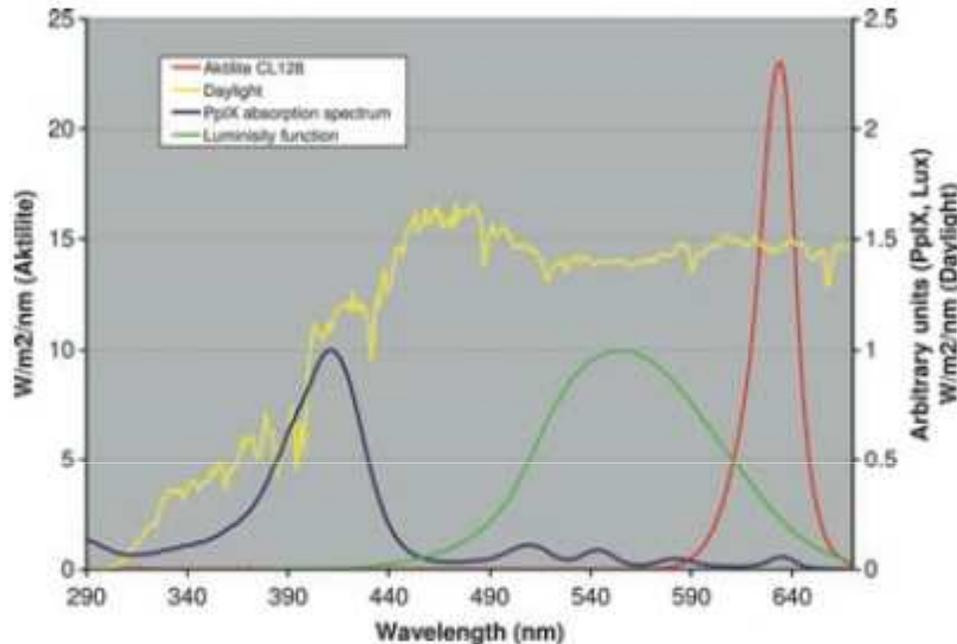
**Pics d'absorption :**  
**410nm, 505nm, 540nm,**  
**580nm, 635nm**

**Pourcentage de**  
**l'absorption totale**

- 87% 380nm – 495nm**
- 10% 495nm – 590nm**
- 3% 590nm – 750nm**

# Daylight PDT

## Dose lumineuse effective



### Aktlite CL 128

- $\lambda_{\max} = 634 \text{ nm}$
- FWHM = 22 nm
- fluence protocole :  $37 \text{ Jcm}^{-2}$   
soit une exposition de 9 mn à une distance de 8 cm)

le profil spectral de la lumière du jour recouvre totalement le spectre d'absorption de la PpIX



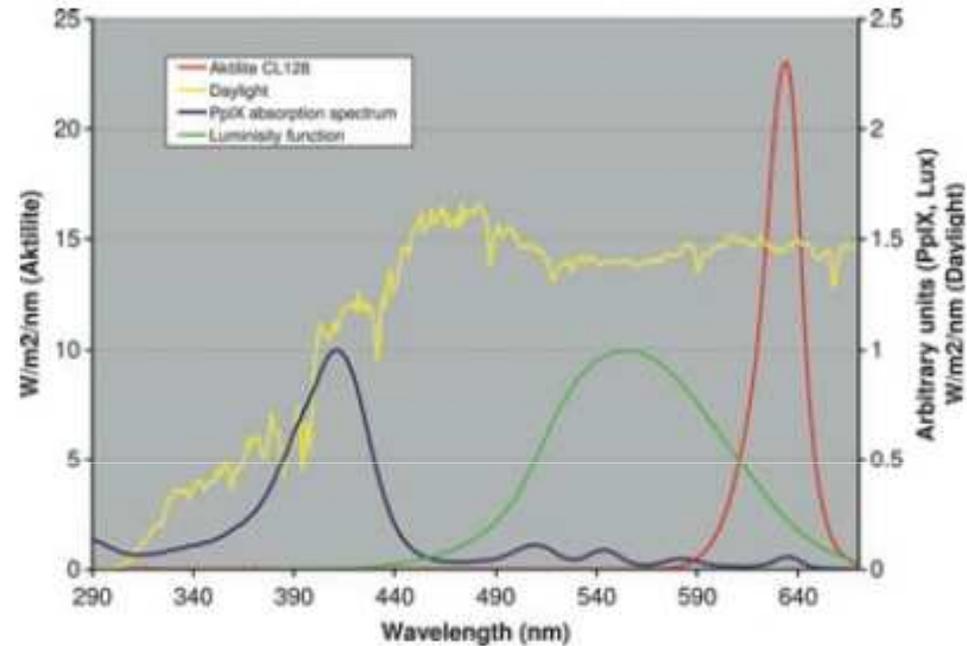
nécessité de définir une dose effective

Dose = Fluence = Irradiance x temps d'exposition

**Dose effective = Dose pondérée par spectre absorption PpIX**

# Daylight PDT

## Dose lumineuse effective



**Dose effective correspondant à Aktilite :  $1\text{Jcm}^{-2}$**

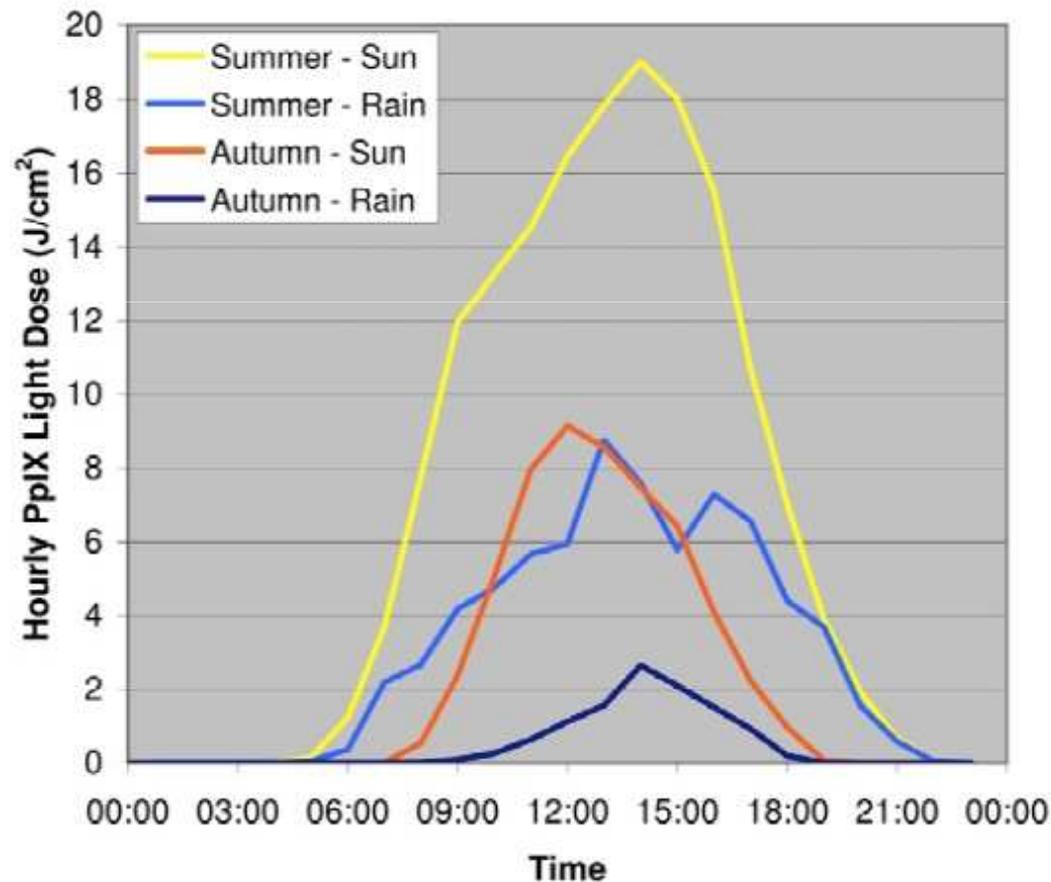
**Dose effective retenue pour traitement daylight :  $8\text{Jcm}^{-2}$**

# Dose effective lumineuse ( $\text{Jcm}^{-2}$ ) pour 2 heures d'exposition en fonction du mois pour différentes latitudes

| Latitude | Effective light dose for 2 h of clear sky daylight exposure $\text{J}/\text{cm}^2$ |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|          | Jan  | Feb | Mar | Apr | May | Jun | Jul | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec |
| 70 N     | 0  | 4   | 12  | 23  | 31  | 33  | 31  | 27  | 17  | 7   | 1   | 0   |
| 60 N     | 5  | 12  | 22  | 32  | 39  | 42  | 41  | 35  | 26  | 15  | 7   | 4   |
| 50 N     | 13   | 21  | 31  | 40  | 46  | 48  | 47  | 43  | 35  | 25  | 16  | 11  |
| 40 N     | 23   | 31  | 40  | 47  | 51  | 52  | 51  | 48  | 42  | 34  | 25  | 21  |
| 30 N     | 33   | 39  | 47  | 52  | 54  | 54  | 54  | 52  | 48  | 42  | 34  | 31  |
| 20 N     | 41   | 47  | 52  | 55  | 55  | 55  | 55  | 55  | 53  | 48  | 42  | 39  |

**seuil choisi pour assurer un traitement efficace :  $8\text{Jcm}^{-2}$**

# Dose effective PpIX par heure ( $\text{Jcm}^{-2}$ ) Norvège, été et automne, jour ensoleillé ou pluvieux



**la pluie réduit la dose disponible d'un facteur 2 à 4**

# Pourcentage de jours où la dose effective dépasse le seuil de 8 Jcm<sup>-2</sup>

| Days with PpIX light dose > 8 J/cm <sup>2</sup> in 2h from 9 a.m. – 4 p.m. |         |         |          |          |         |           |
|--|---------|---------|----------|----------|---------|-----------|
| Number of days (% of total days that month)                                |         |         |          |          |         |           |
|  | Iceland | Norway  | Denmark  | Germany  | Italy   | Israel    |
| <b>July</b>  |         | 30 (97) | 31 (100) |          |         |           |
| <b>August</b>  | 28 (90) | 29 (90) | 30 (97)  | 31 (100) |         | 31 (100)  |
| <b>September</b>   | 21 (67) | 24 (80) | 29 (97)  | 27 (90)  |         | 30 (100)  |
| <b>October</b>   | 8 (26)  | 9 (29)  | 21 (68)  | 18 (58)  | 27 (87) | 31 (100)  |
| <b>November</b>  | 0       | 0       | 0        | 10 (33)  | 20 (67) | 30 (100)  |
| <b>December (28<sup>th</sup>)</b>  | 0       | 0       | 0        | 0        | 19 (68) | 17* (100) |

# Conclusions

- **la Daylight PDT fondée sur une exposition de 2 heures est possible dans tous les pays européens au moins d'Avril à Octobre**
- **la mise en oeuvre est facile ... et économique**
- **la mesure de la dose effectuée par le patient grâce à un dosimètre calibré pour fournir la dose effective devrait assurer l'efficacité du traitement**