

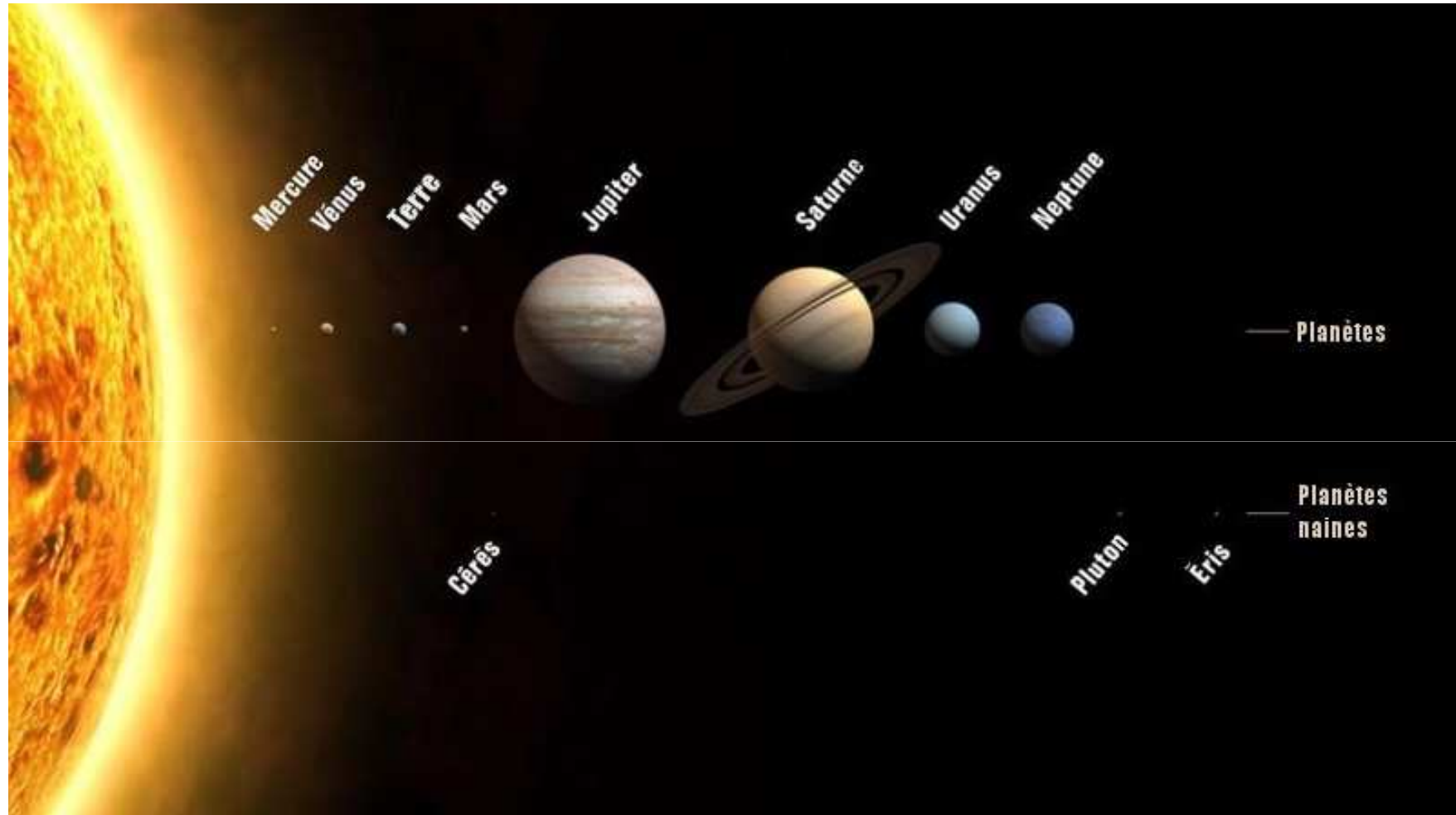
DOSIMÉTRIE SOLAIRE :
SPECTRE,
INFLUENCE DE LA SAISON, DE LA LATITUDE ET
DE LA MÉTÉO
SUR LA DOSE LUMINEUSE DISPONIBLE

Geneviève Bourg-Heckly

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

SFLM congrès 2015

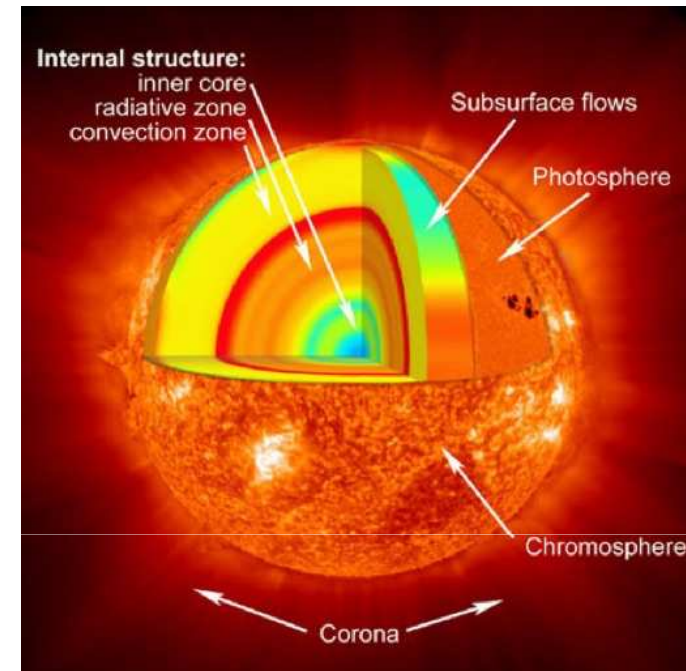
Le système solaire



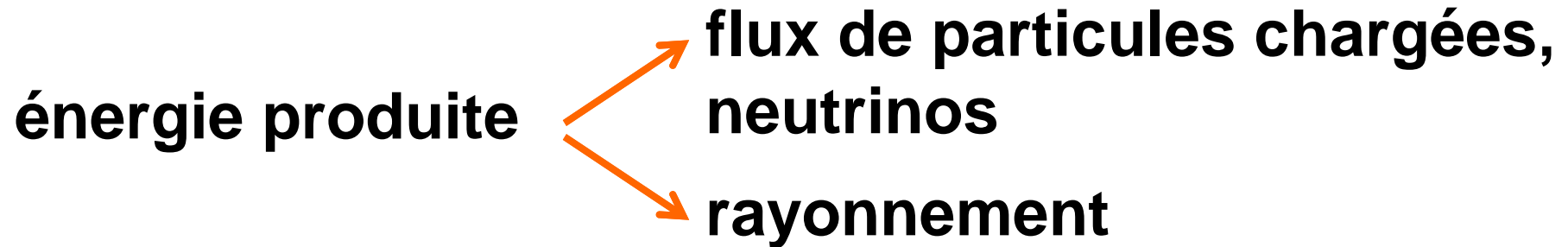
Soleil : 99% masse du système solaire
distance Terre – Soleil : 150 millions kms

Le soleil, une étoile banale de taille moyenne

- étoile de type G2V
- rayon : 700 000 kms (100 X R_{Terre})
- masse : 330 000 X M_{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

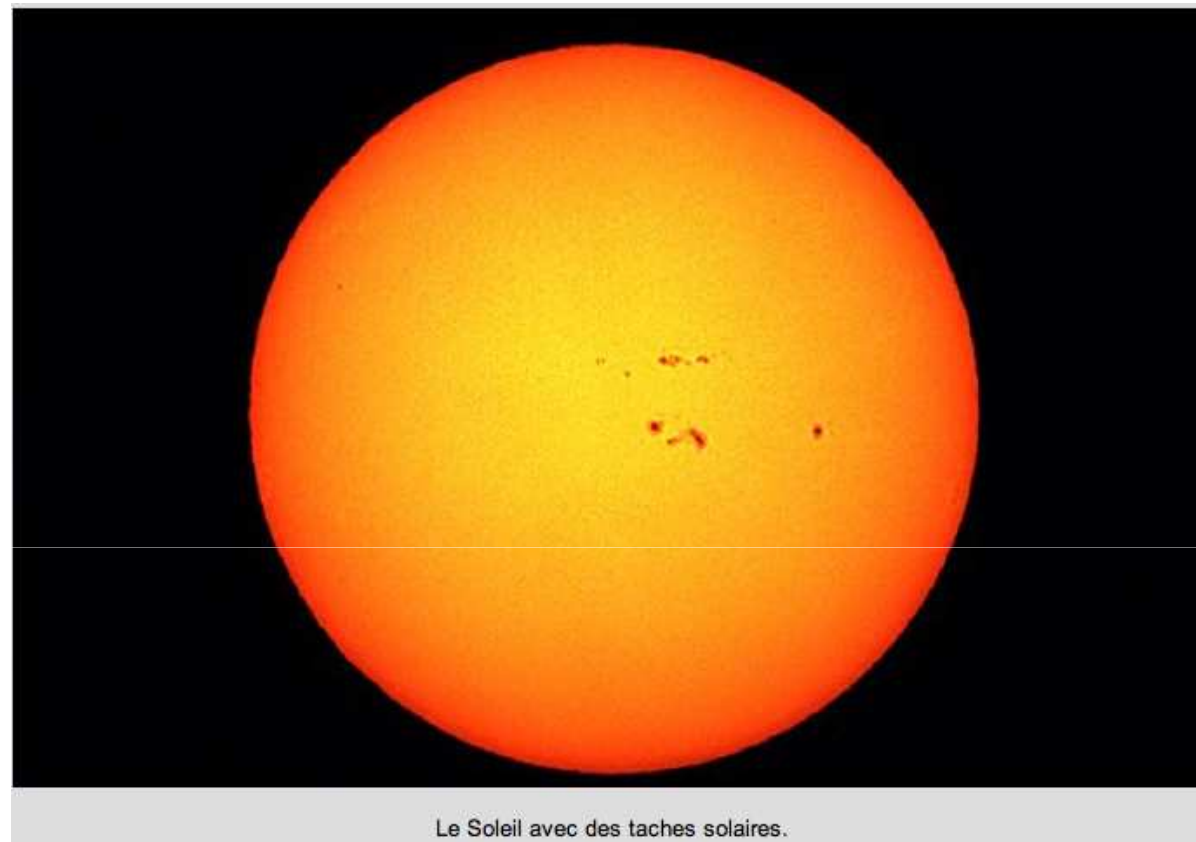


**Energie solaire émise dans tout l'espace : 4×10^{26} W
($6 \cdot 10^{12}$ bombe d'Hiroshima)**

... 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



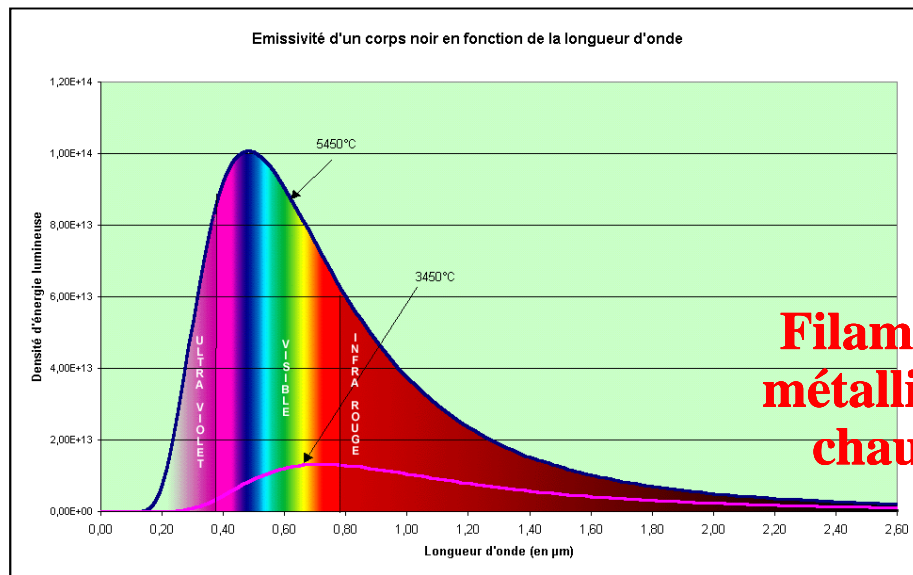
- fine couche gazeuse de 400 kms d'épaisseur
- produit la lumière visible
- corps noir à une température de 5777 °K

Rayonnement émis par une source « chaude »

ou émissivité du corps noir

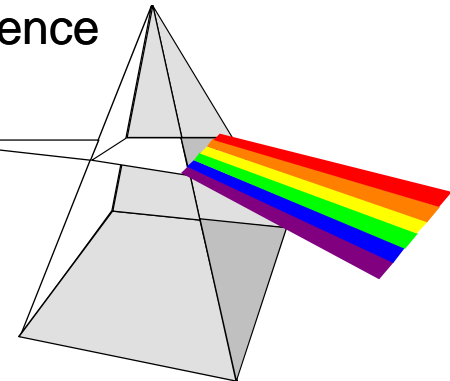
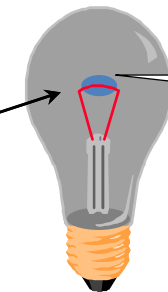
un corps noir est un corps qui absorbe toutes les radiations et réémet un rayonnement

- 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



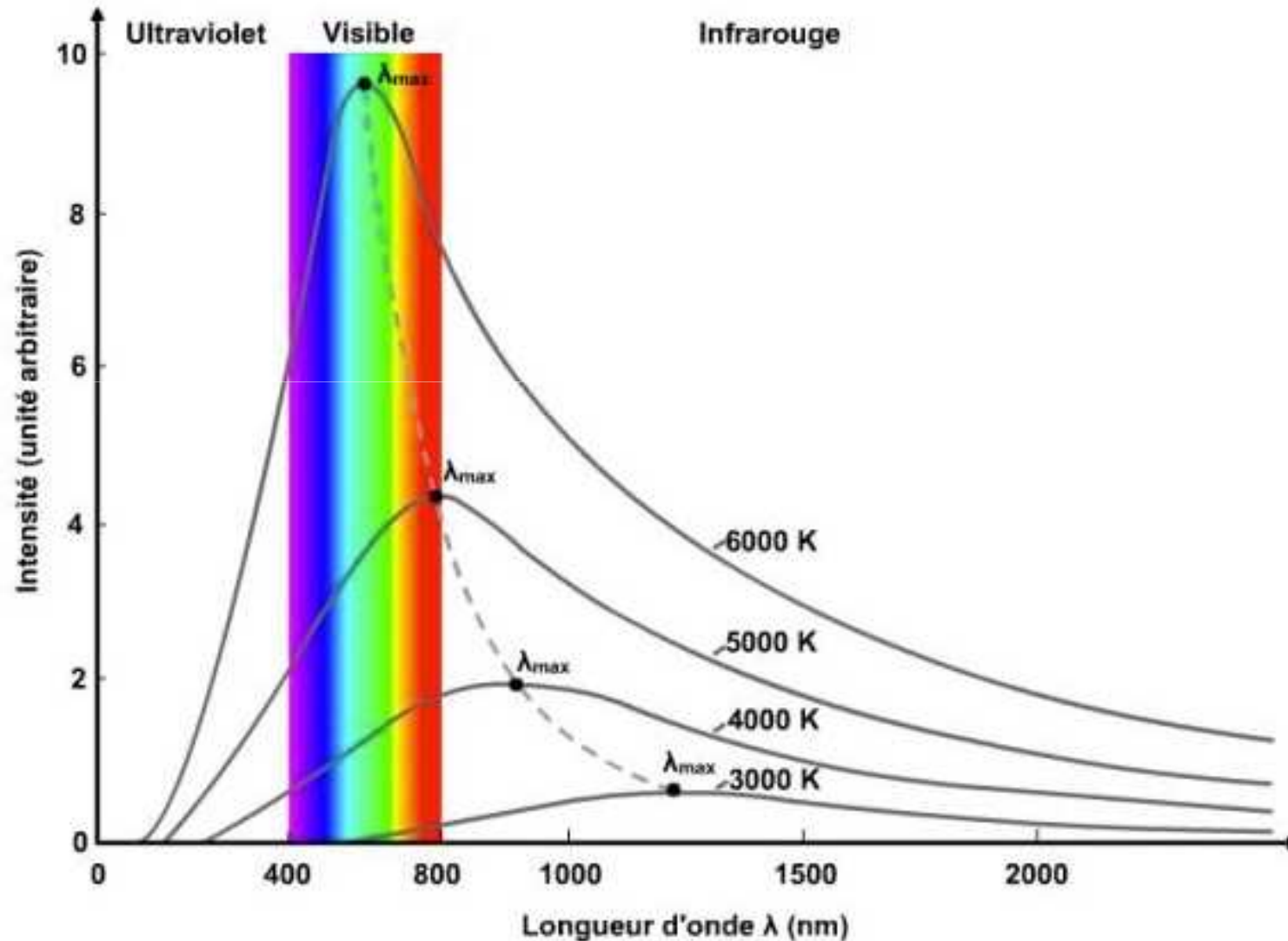
Filament métallique chaud

température filament

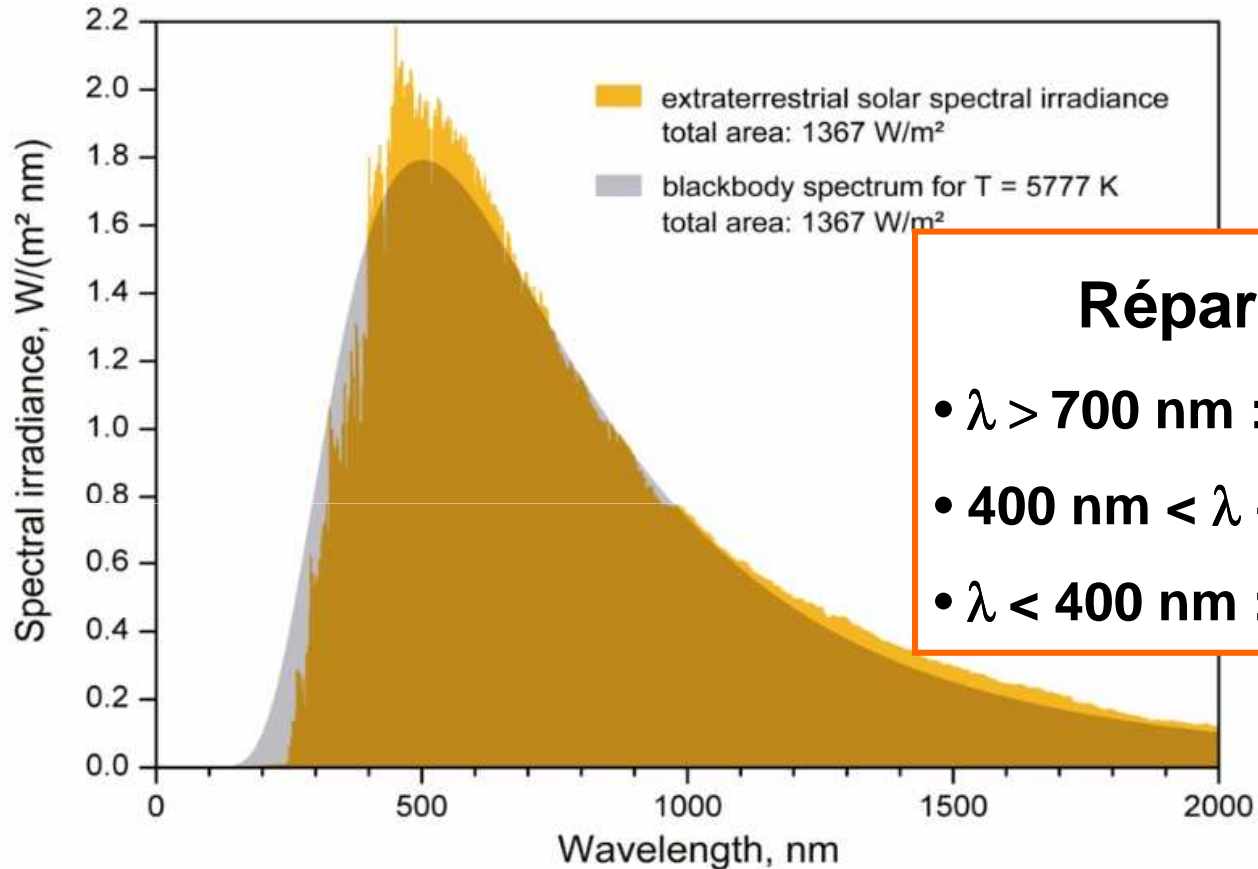
!!ampe incandescence : 2200°C

!!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



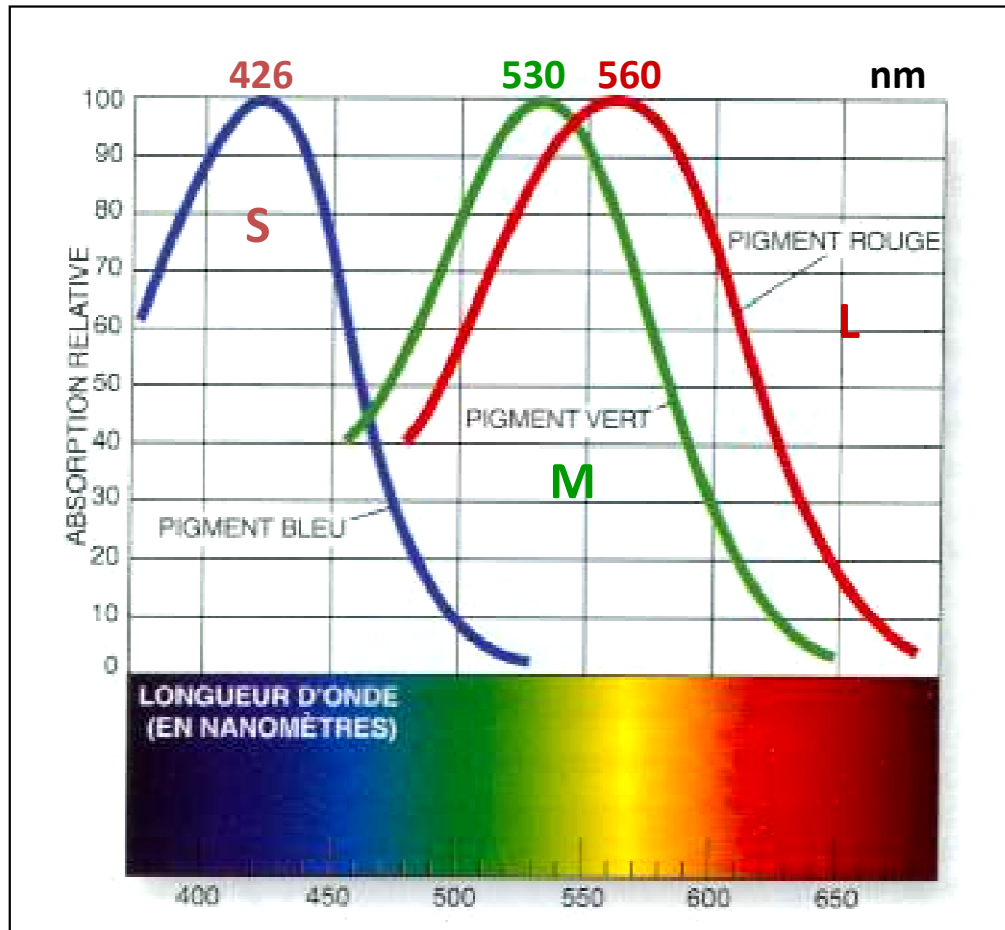
Répartition spectrale

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

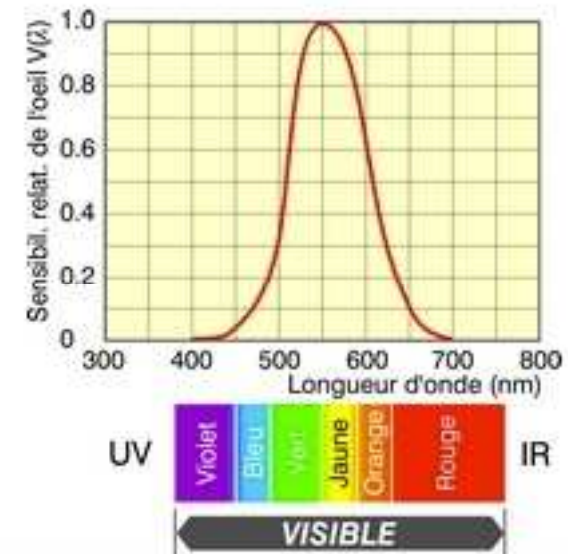
constante solaire =
irradiance sur une surface perpendiculaire aux rayons
solaires en haut de l'atmosphère
 $1366,1 \text{ Wm}^{-2} = 136,61 \text{ mWcm}^{-2}$

Vision de la couleur

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



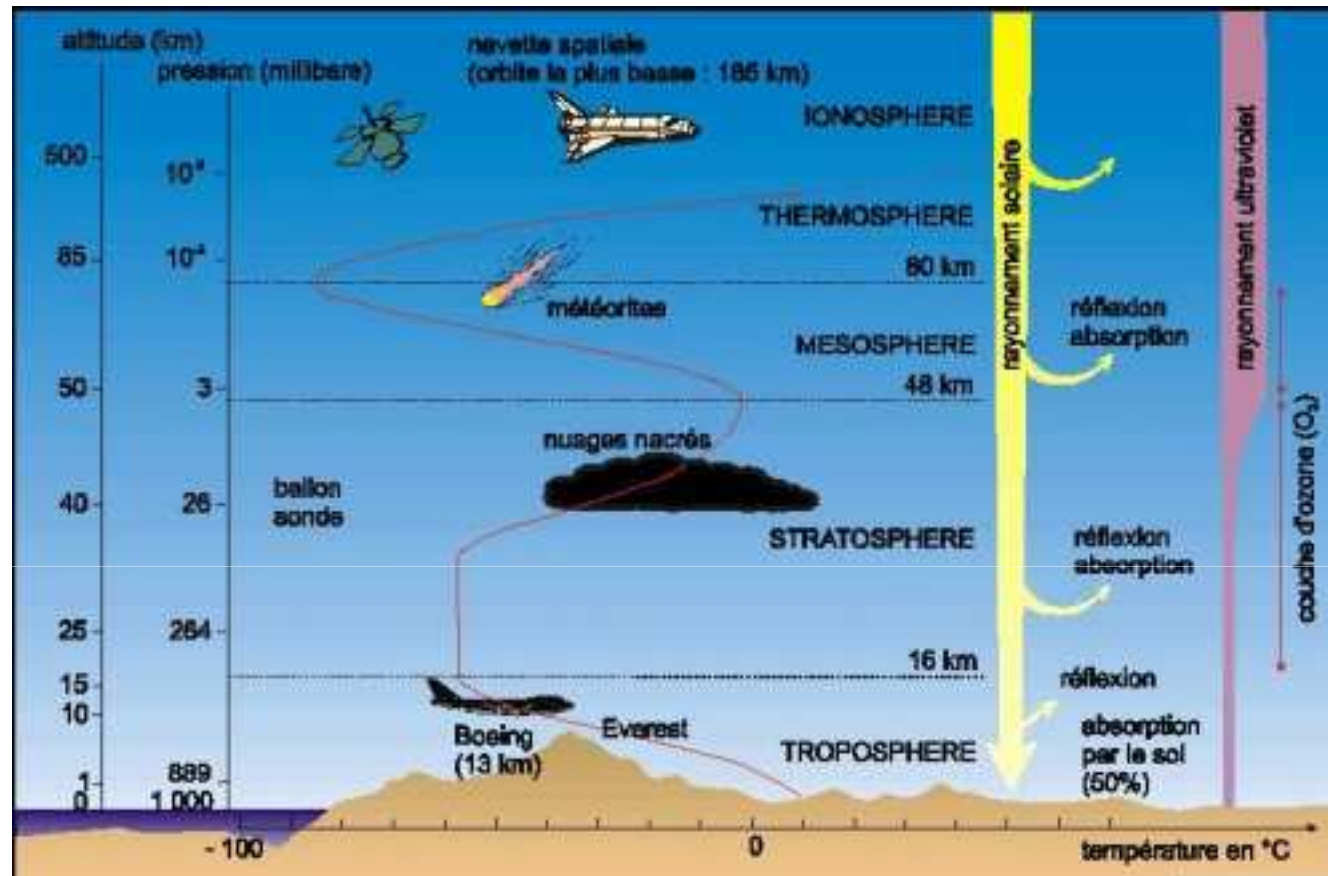
Vision trichromatique



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

Sensibilité spectrale de l'œil
en vision diurne
maximum ≈ 555 nm

L'atmosphère terrestre



- épaisseur \approx 800 kms
- 78% N₂, 21% O₂ + gaz résiduels dont CO₂ (\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

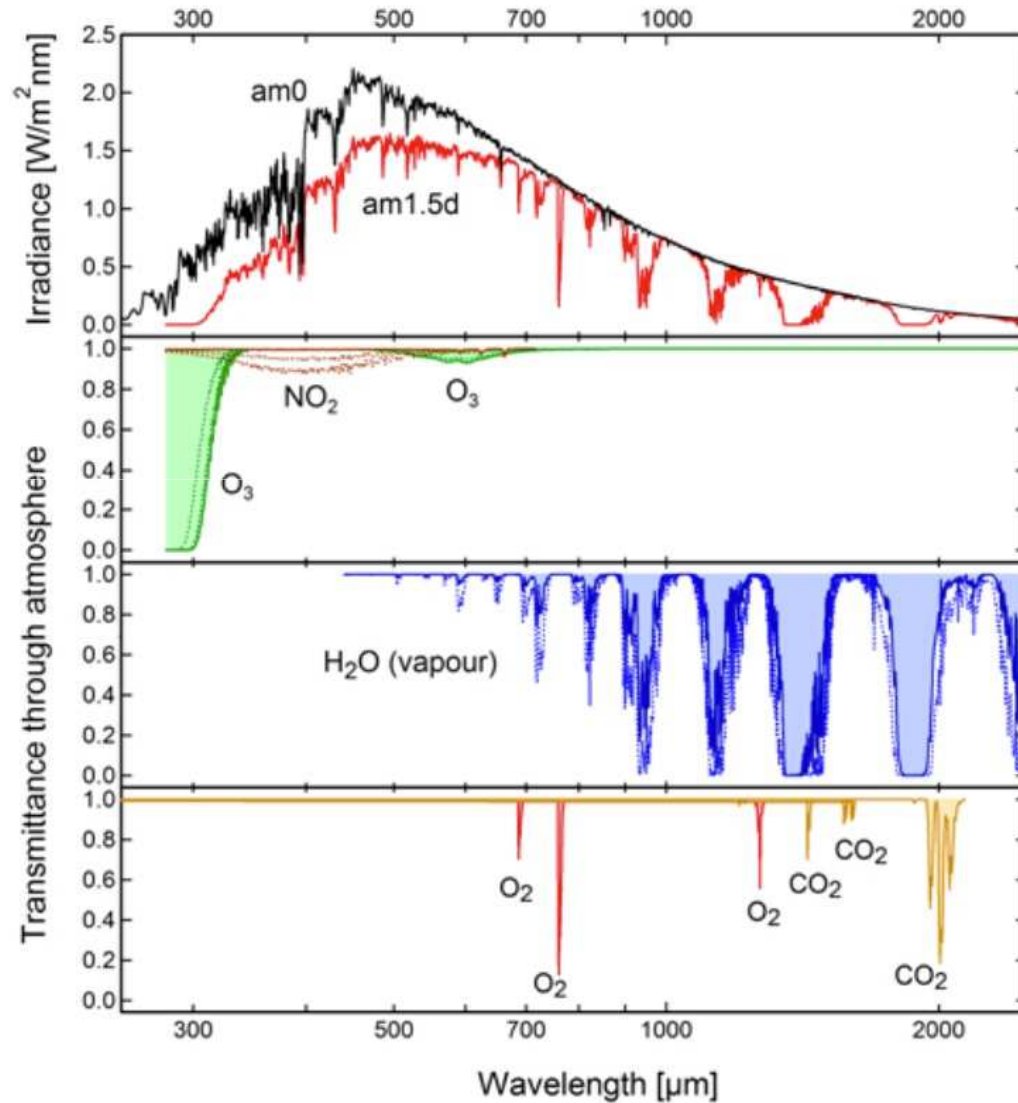
rétrodiffusion vers l'espace



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



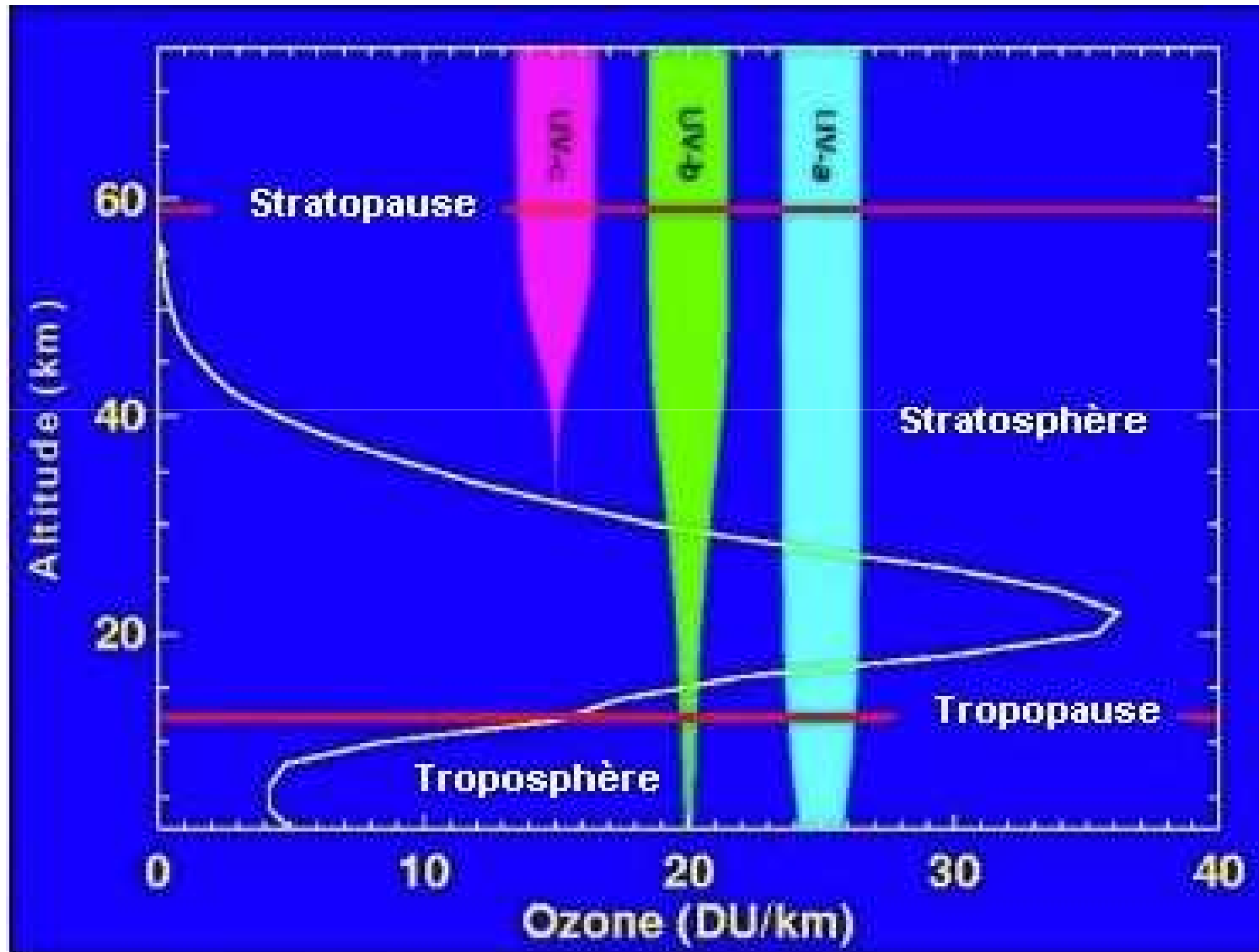
Oxygène

Ozone stratosphérique, **UV**

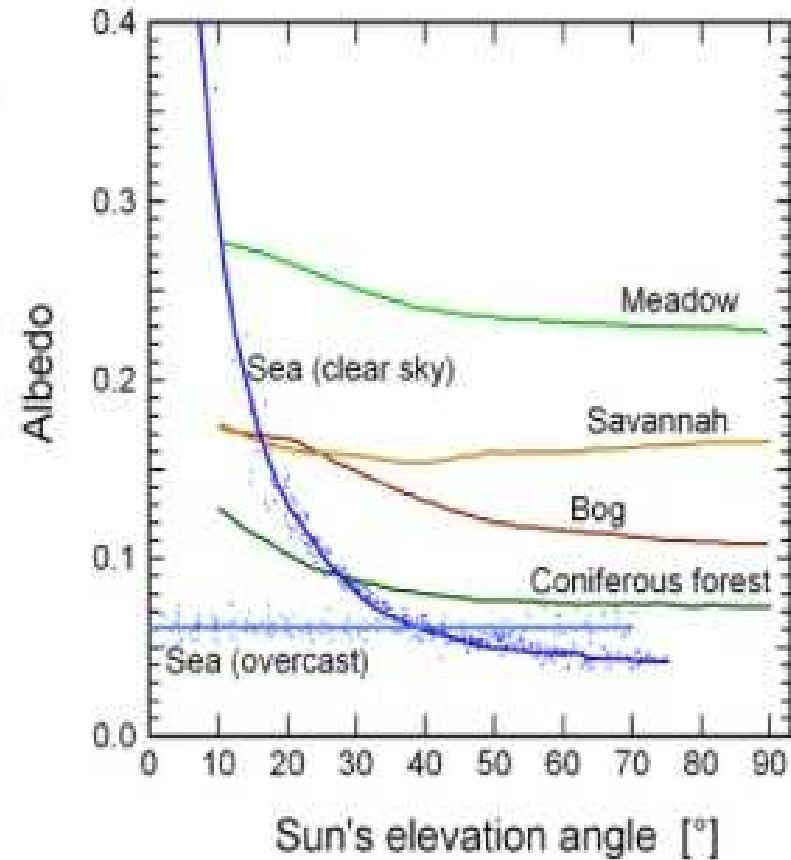
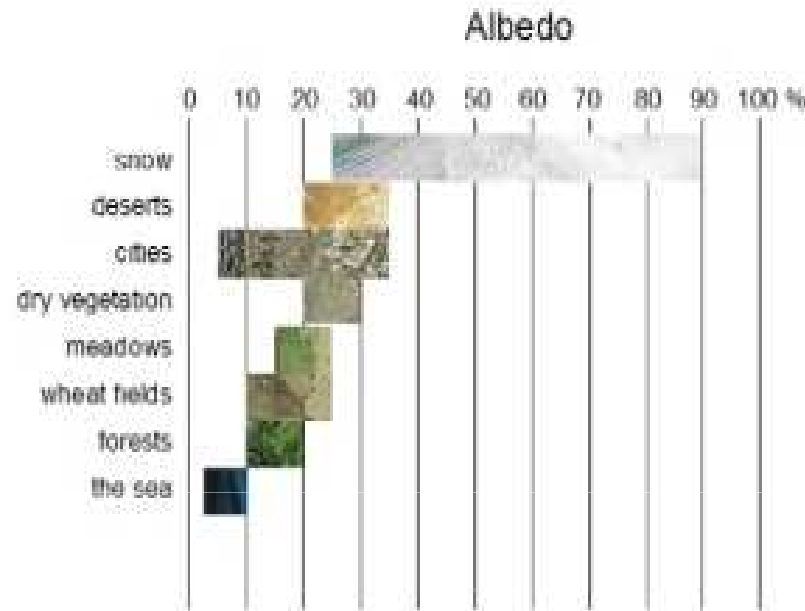
Vapeur d'eau troposphérique

Gaz carbonique CO₂, **IR**

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



Albedo = fraction de l'irradiance réfléchi

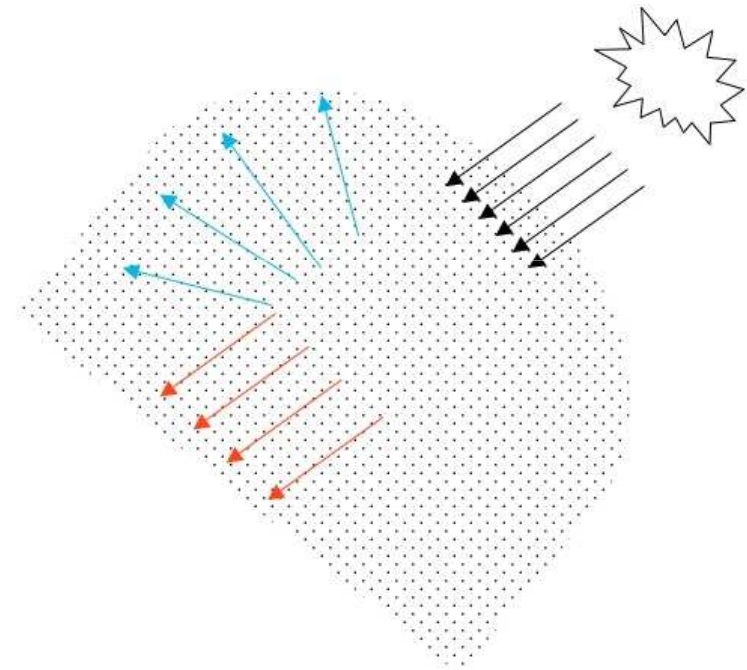


**l'albedo du rayonnement direct dépend de l'angle d'élévation
solaire
albedo moyen = 30%**

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



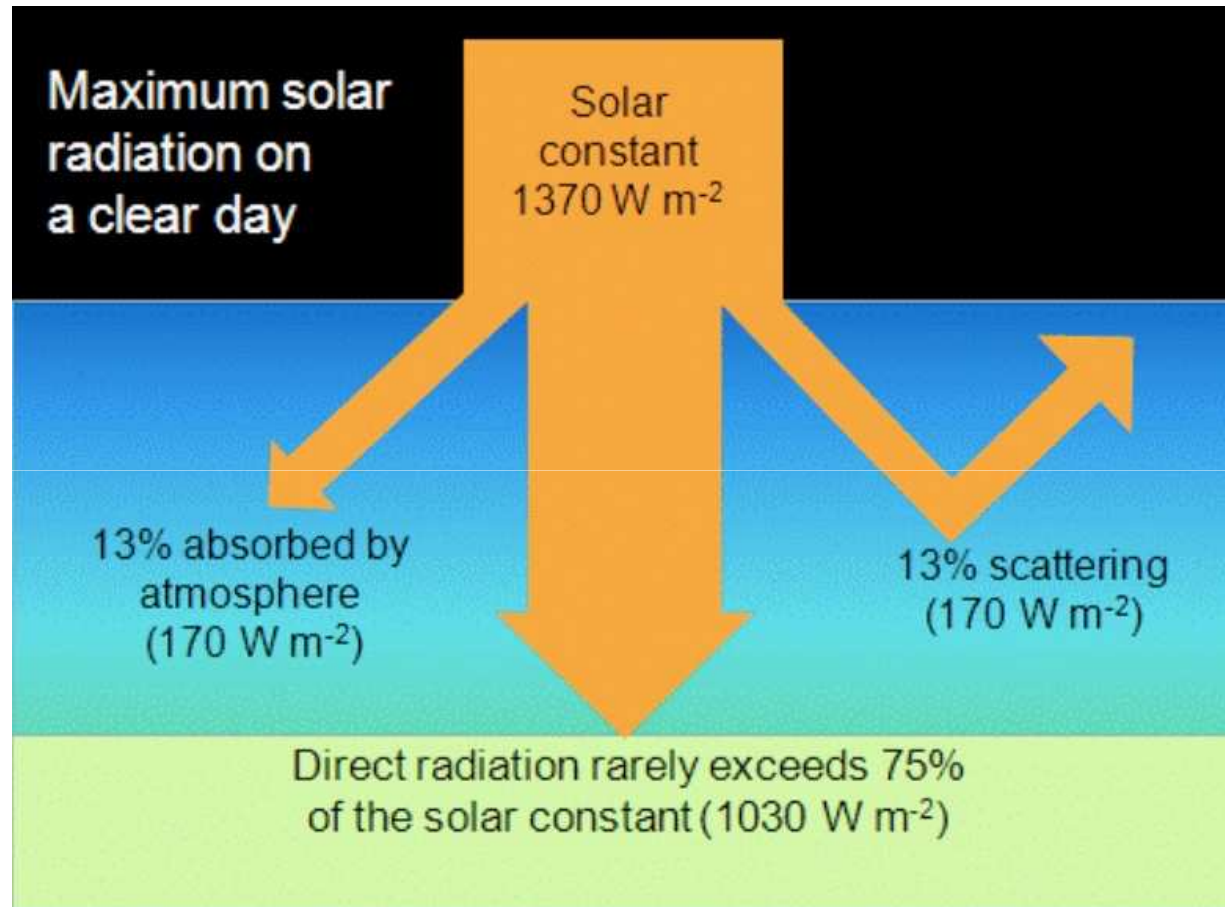
Diffusion atmosphérique

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

- couleur blanche des nuages, brouillard
- nuages de pollution



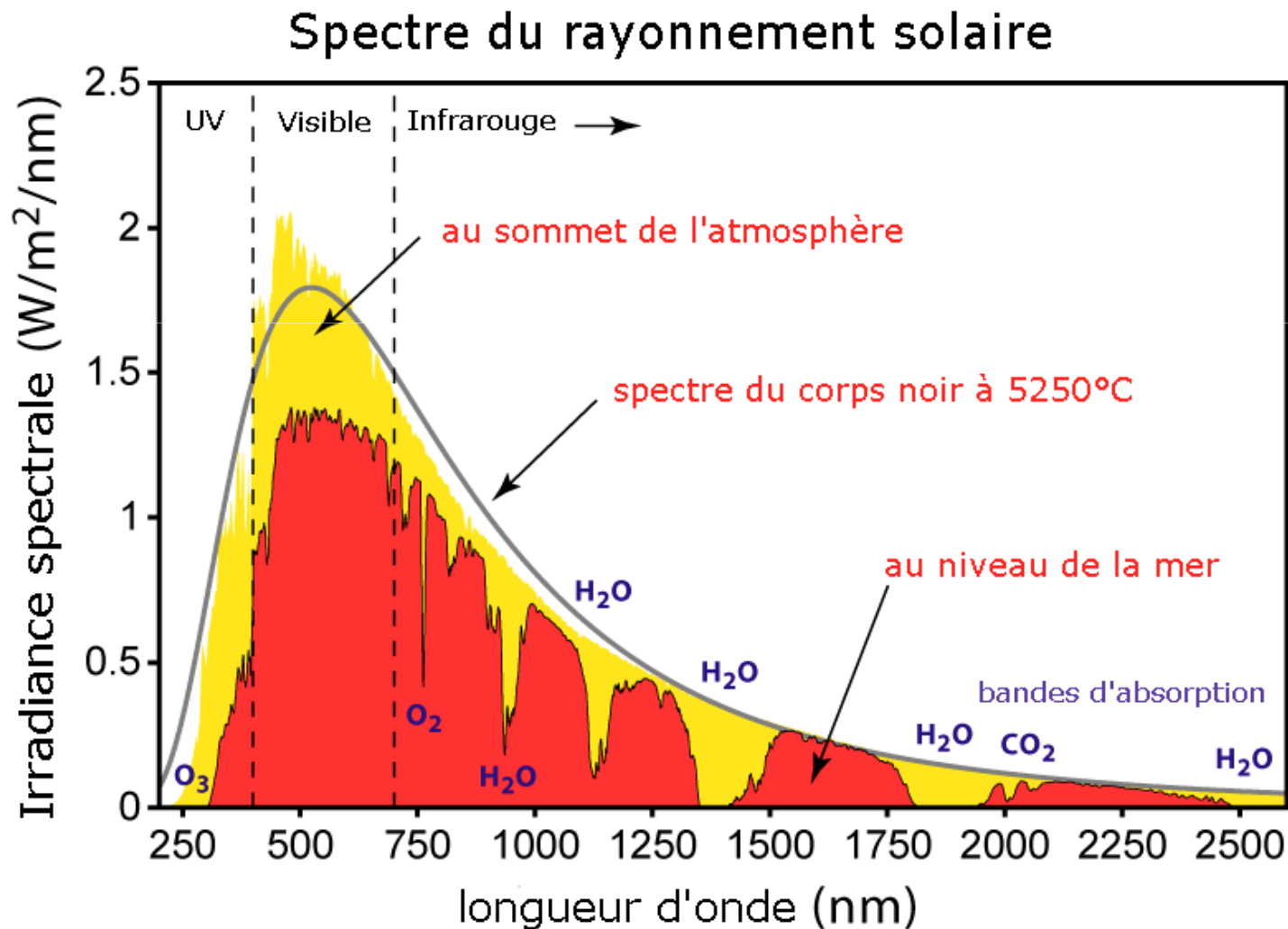
Irradiance du rayonnement direct au niveau du sol



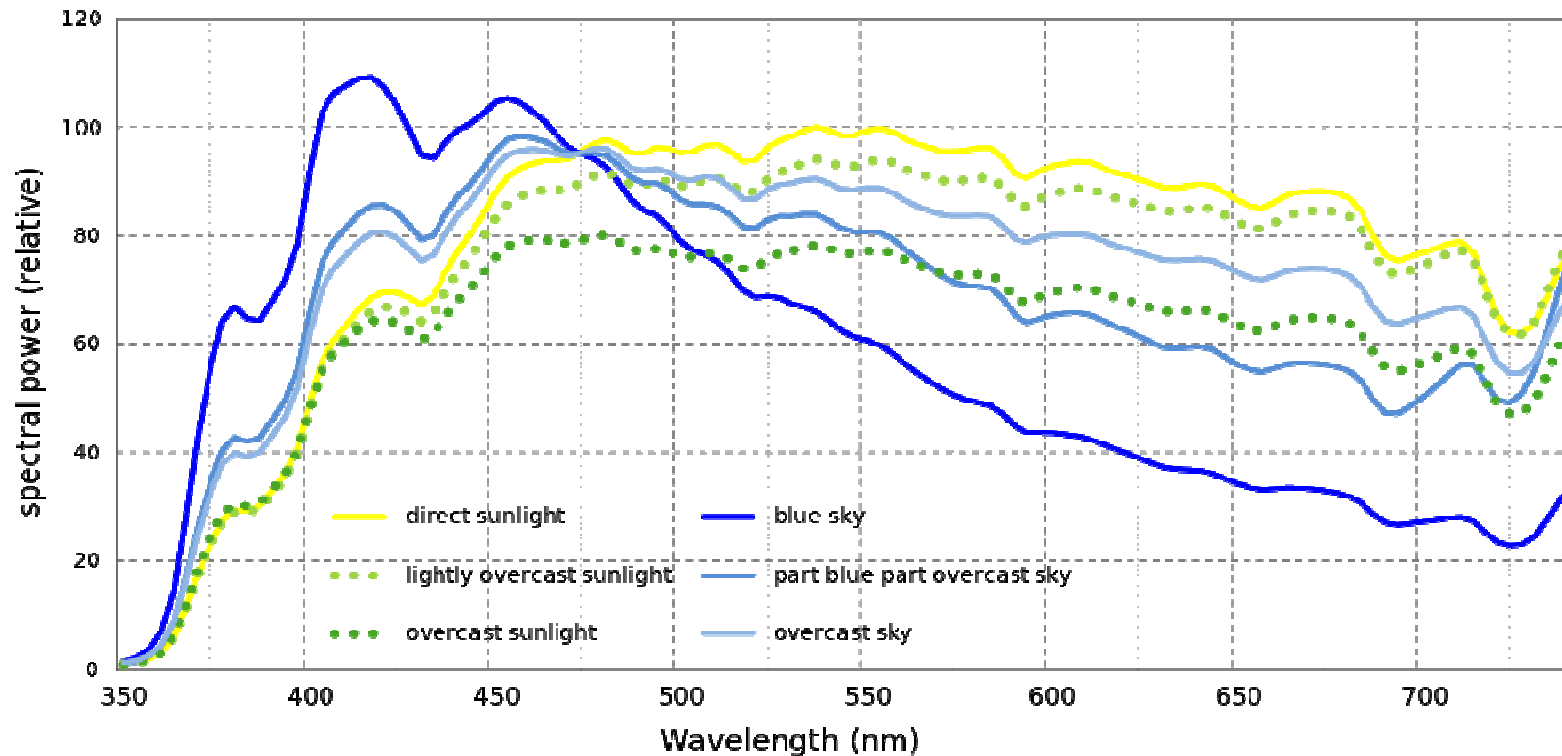
données à l'équateur au zénith par un jour sans nuages

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

Spectre du rayonnement direct au niveau du sol

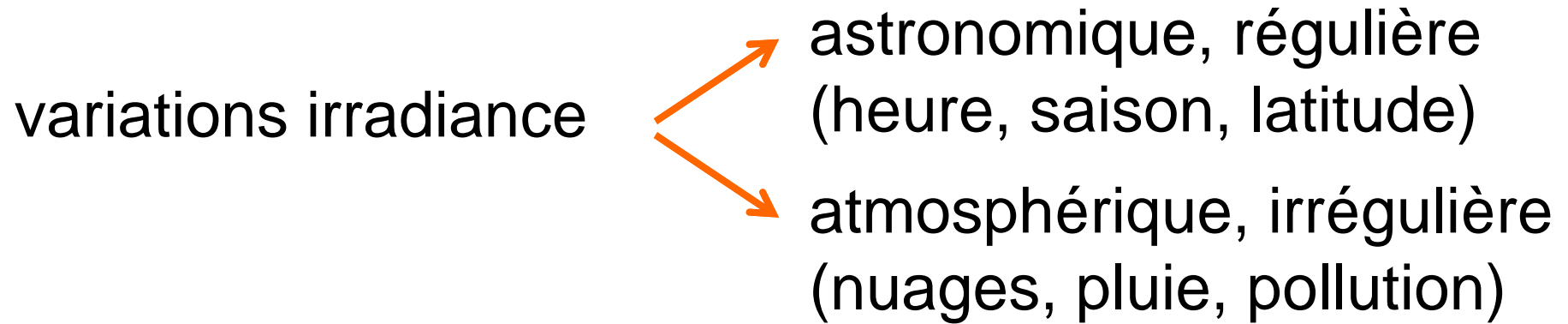


Rayonnement global : direct et indirect



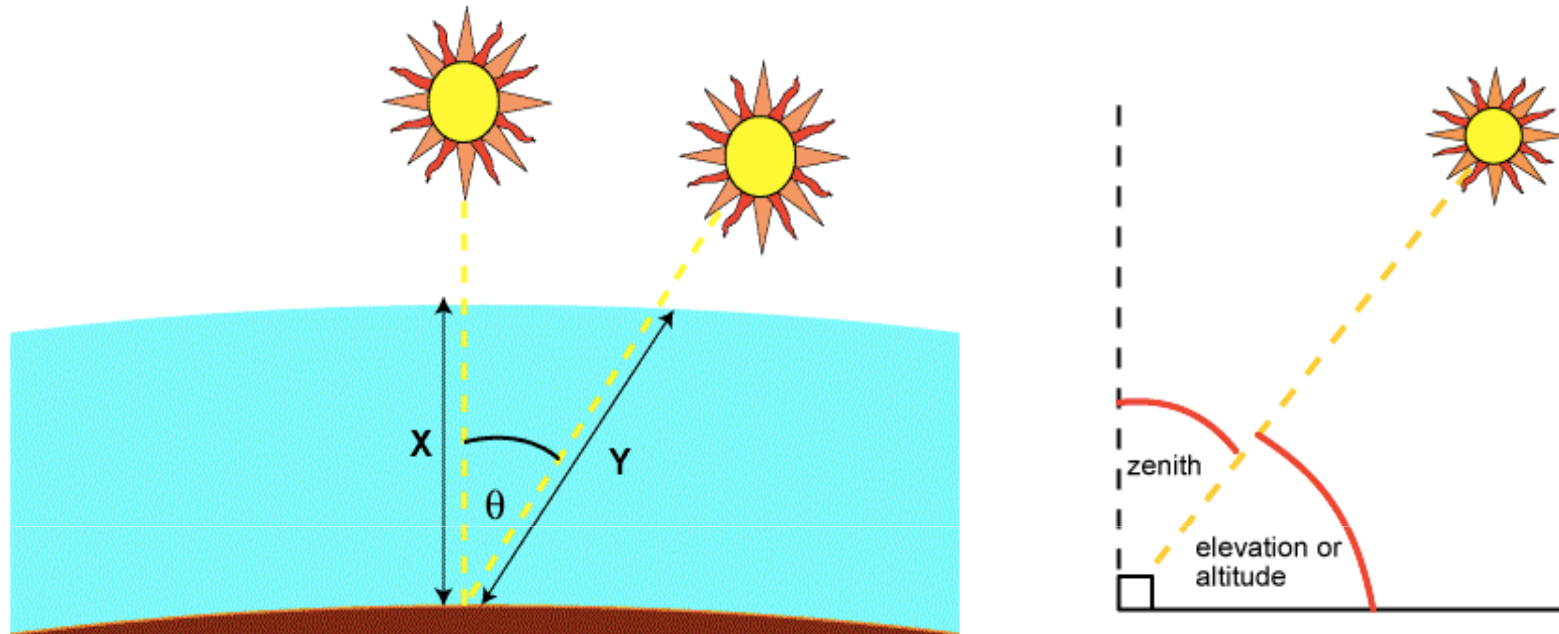
- le rayonnement qui tombe sur une surface est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus ou indirect
- la répartition spectrale du rayonnement indirect sans couverture nuageuse présente une composante bleue plus importante que celle du rayonnement direct (diffusion Rayleigh)

Variabilité de l'irradiance solaire



Variabilité régulière astronomique

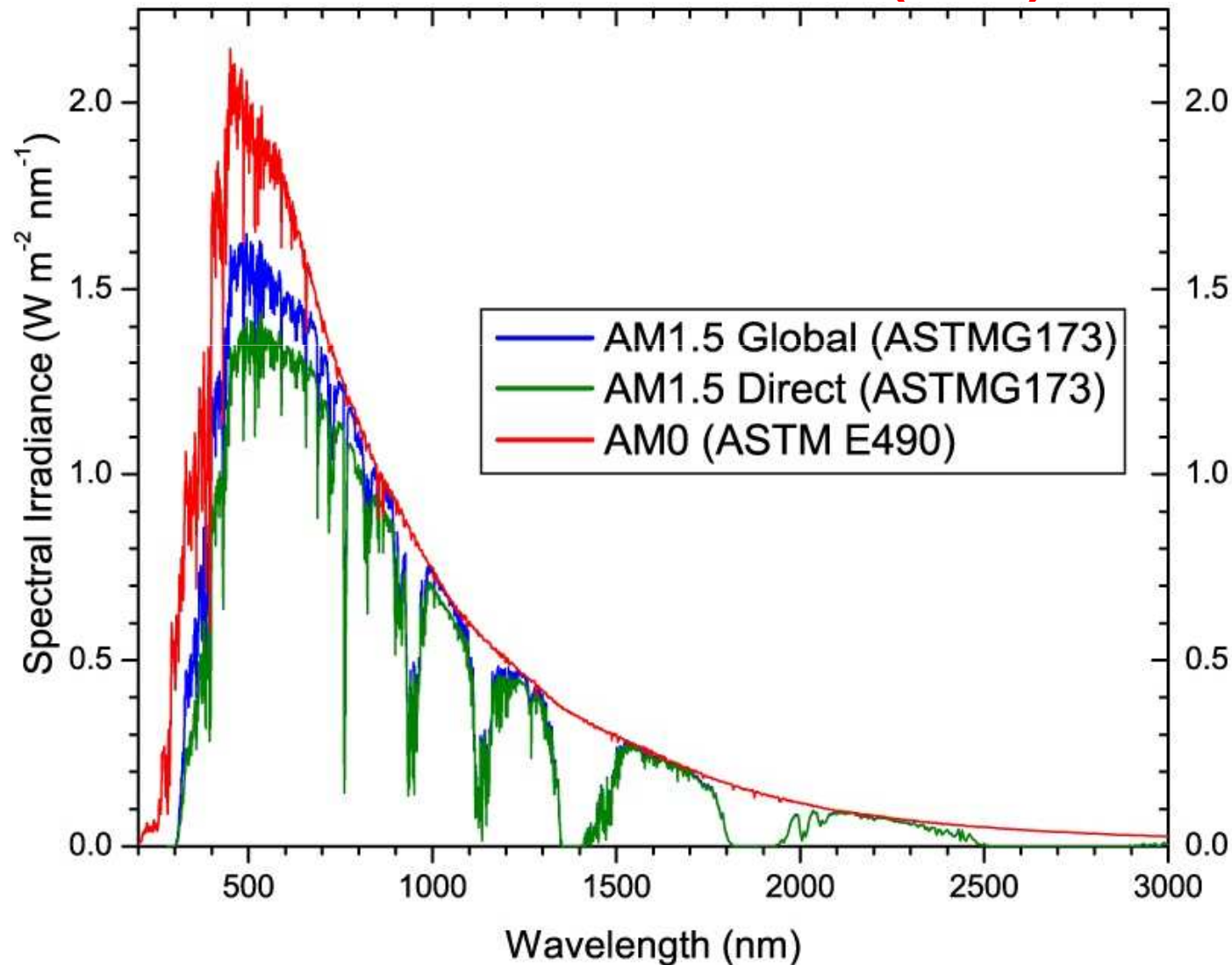
Masse d'air (Air Mass)



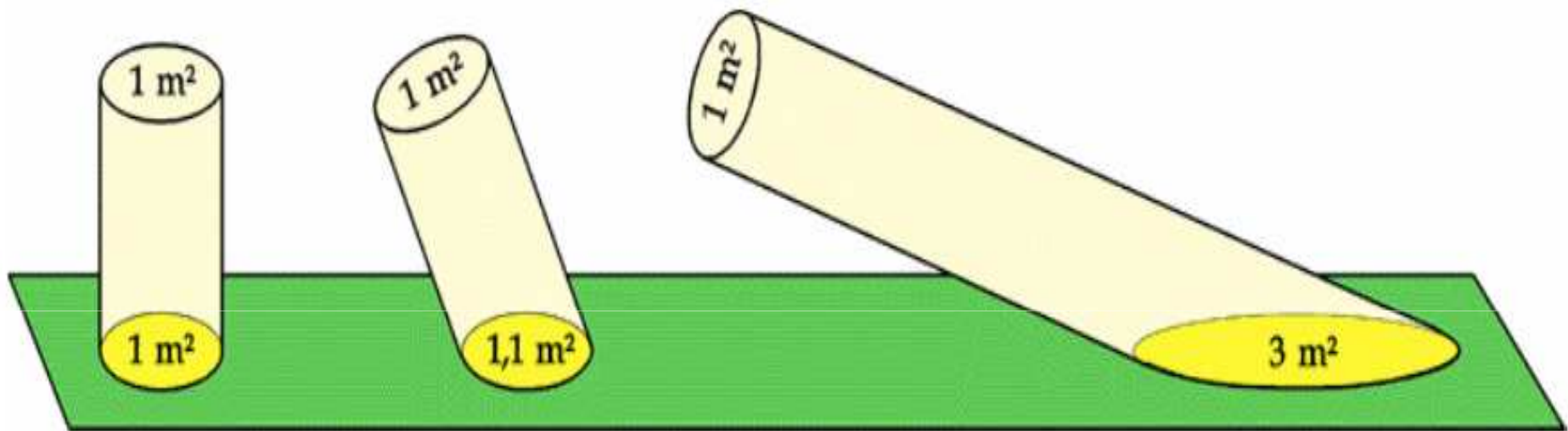
Masse d'air

- 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

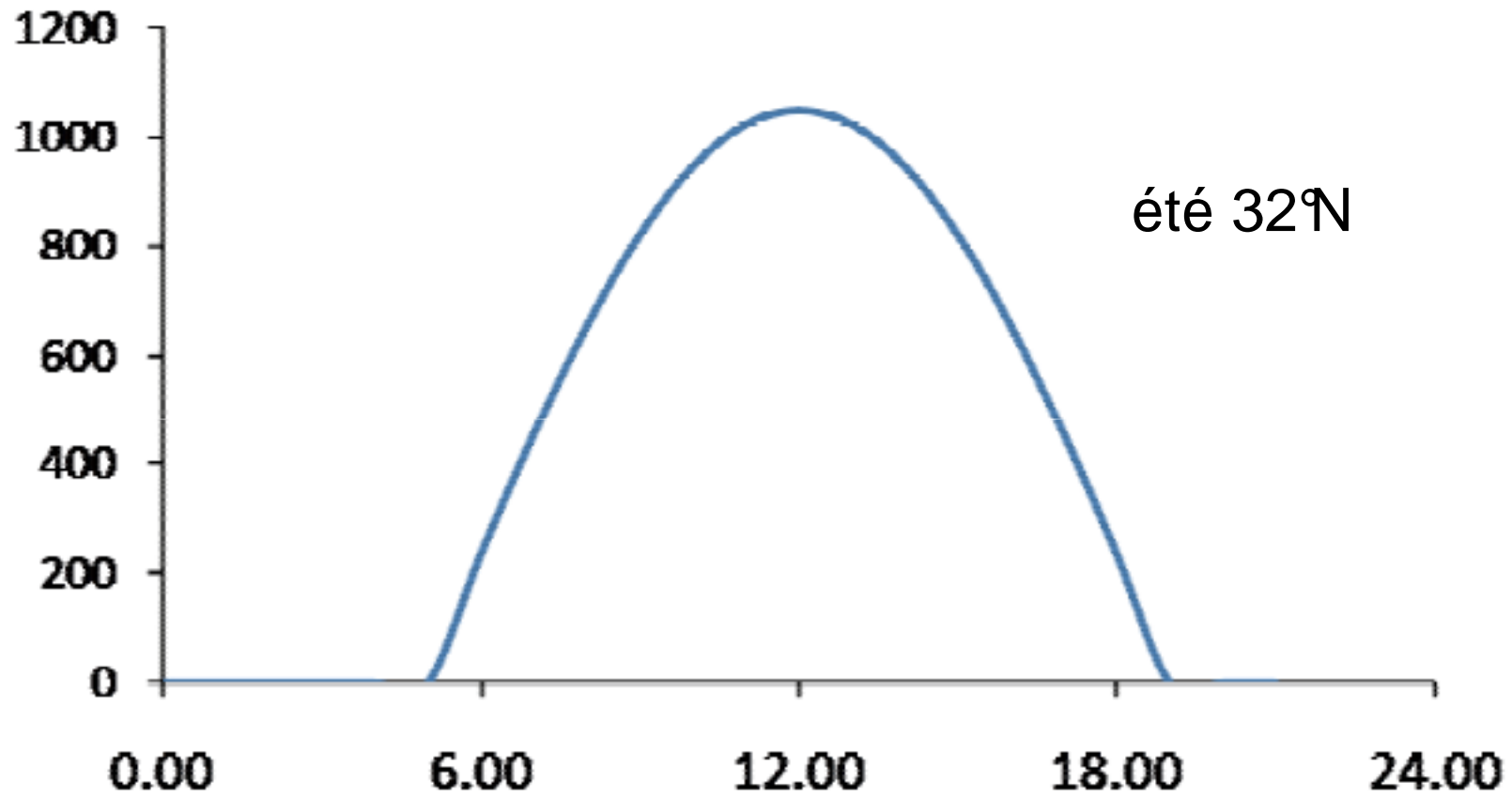


Influence de la hauteur du soleil sur l'irradiance



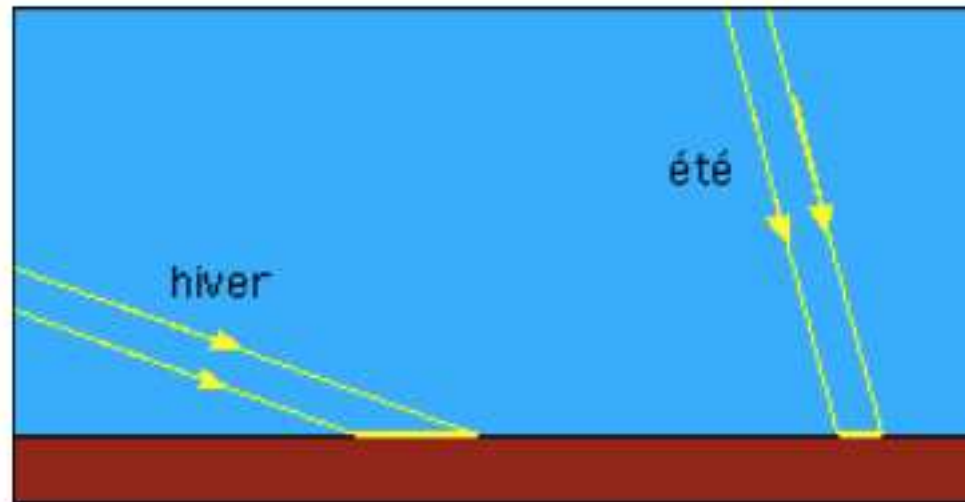
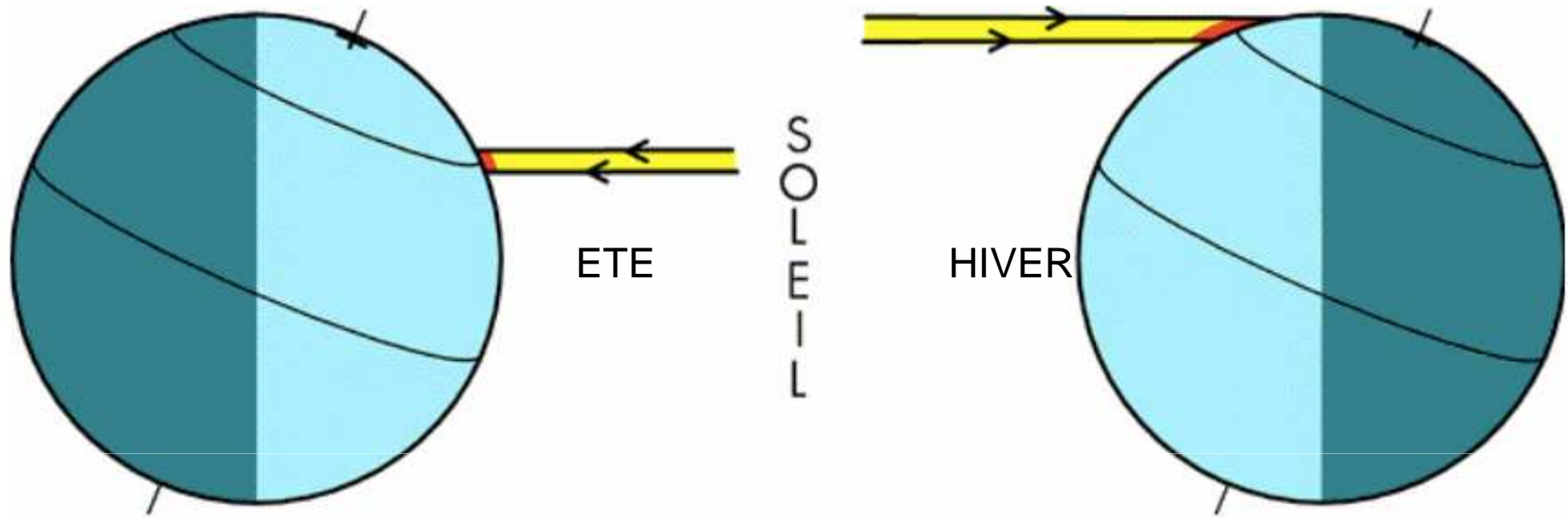
plus le soleil est bas sur l'horizon,
plus la masse d'air est élevée, plus l'irradiance est faible

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

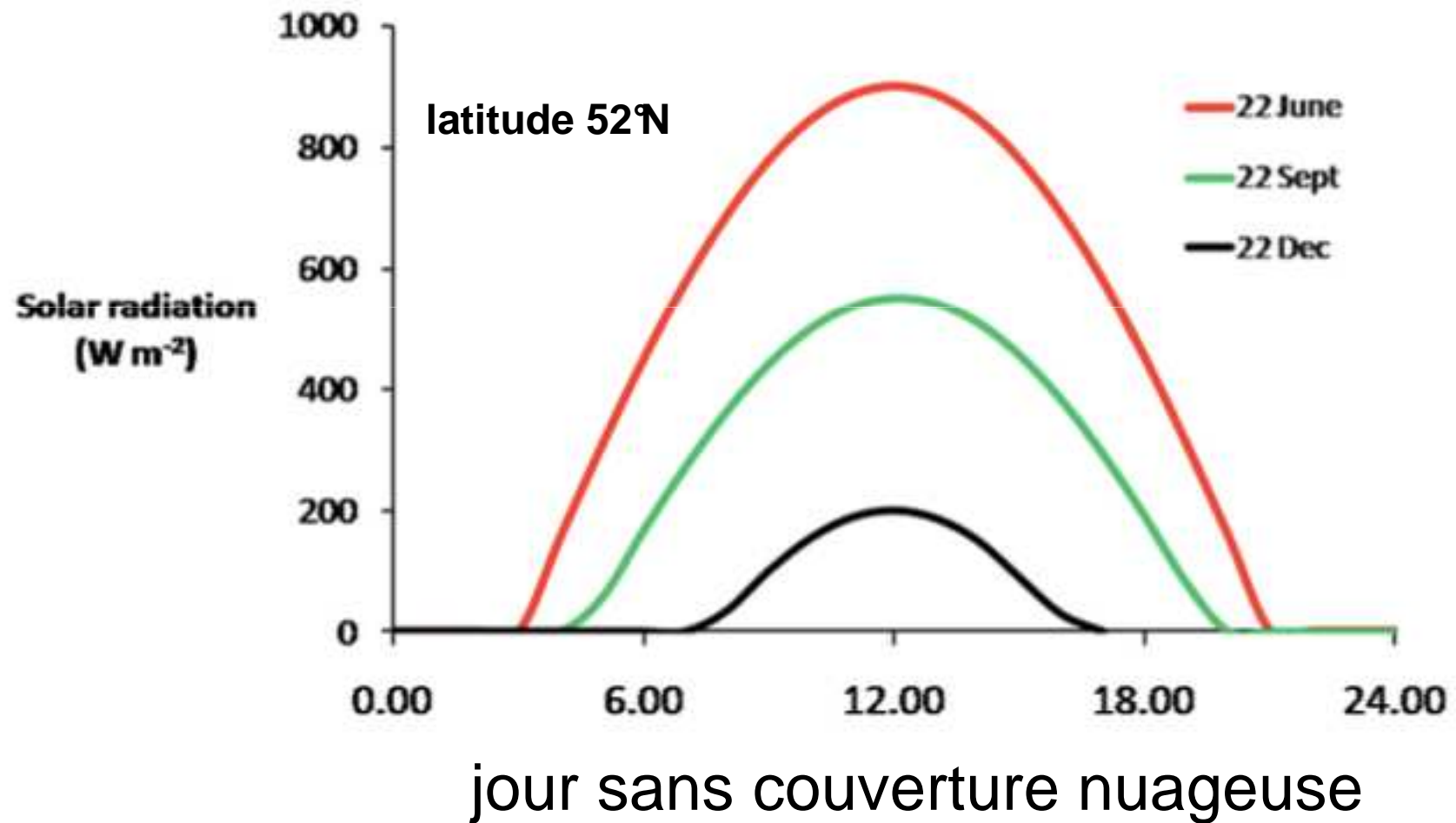


la variation suit une loi sinusoïdale

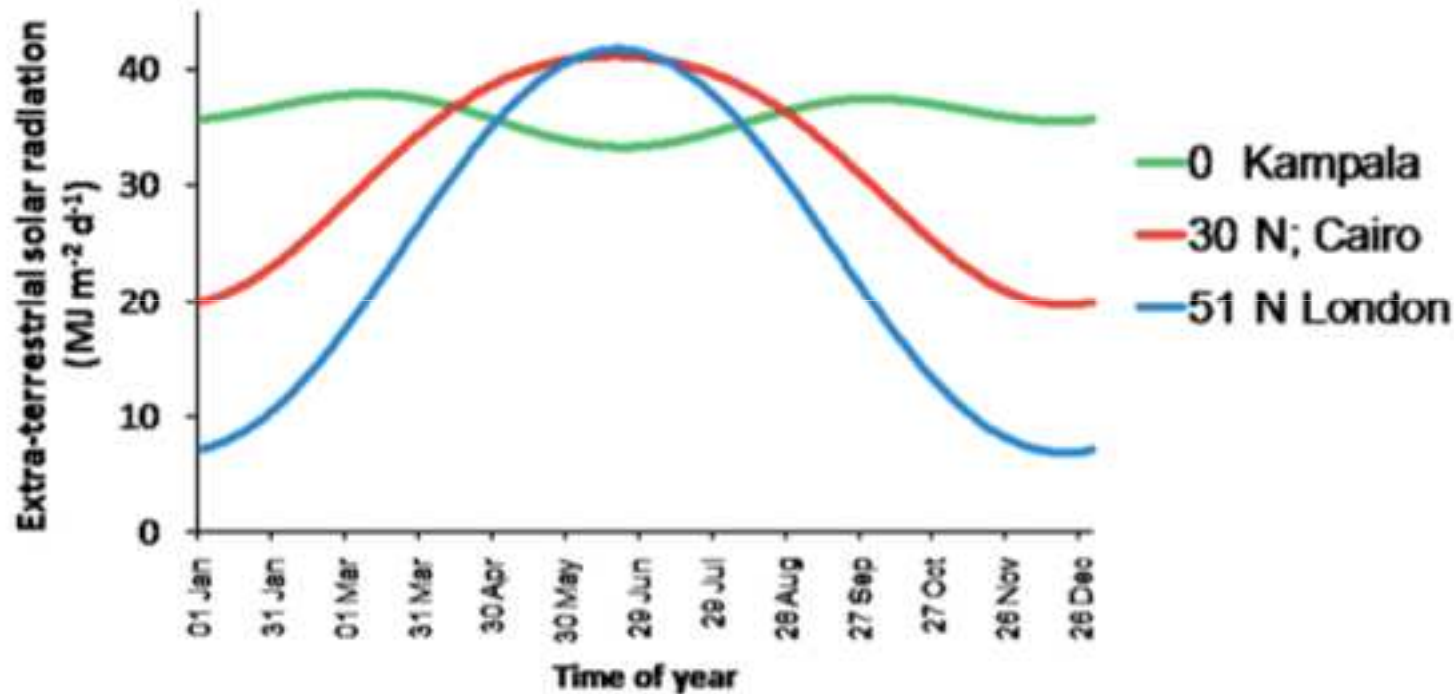
EFFET DE LA SAISON



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

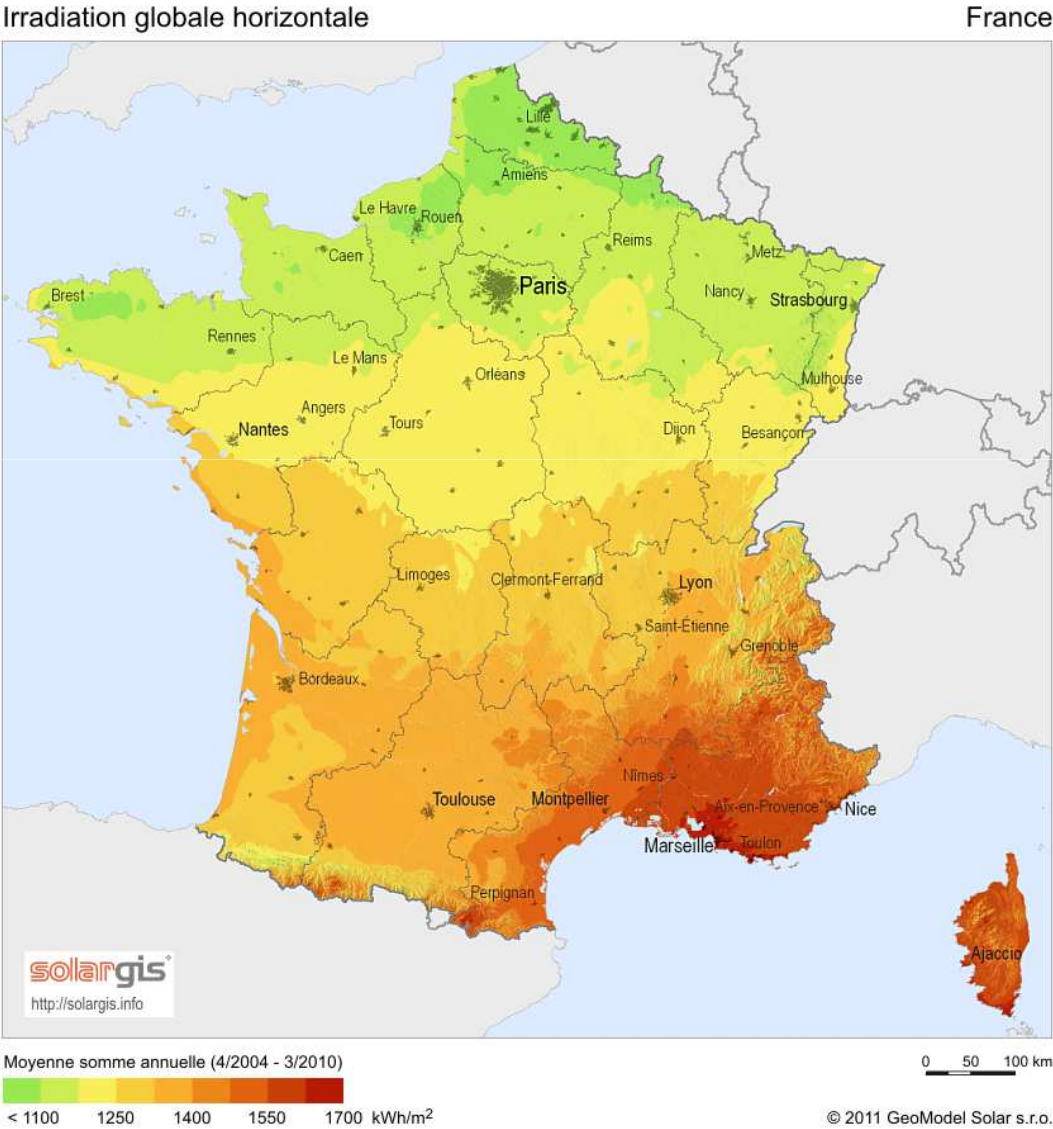


Variation annuelle de la fluence solaire (MJoulesm⁻² par jour) en fonction de la latitude

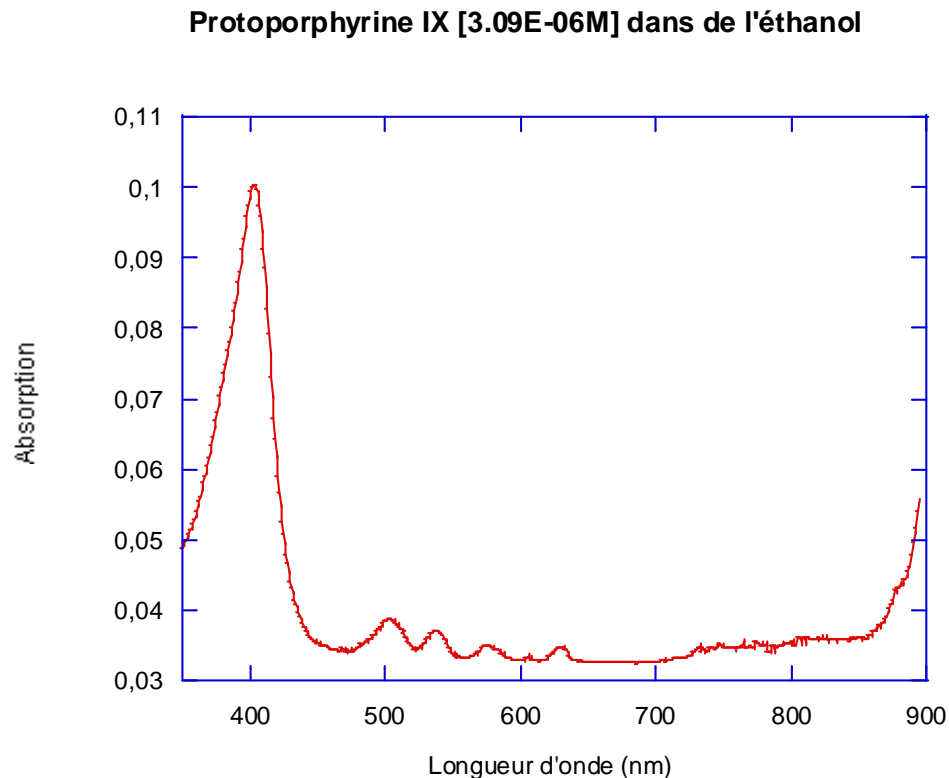


plus la latitude est élevée, plus la variation est forte au cours de l'année

variation de la tience globale en France (kWhm⁻²)



Daylight PDT Absorption de la Protoporphyrine IX



spectre d'absorption de la PpIX

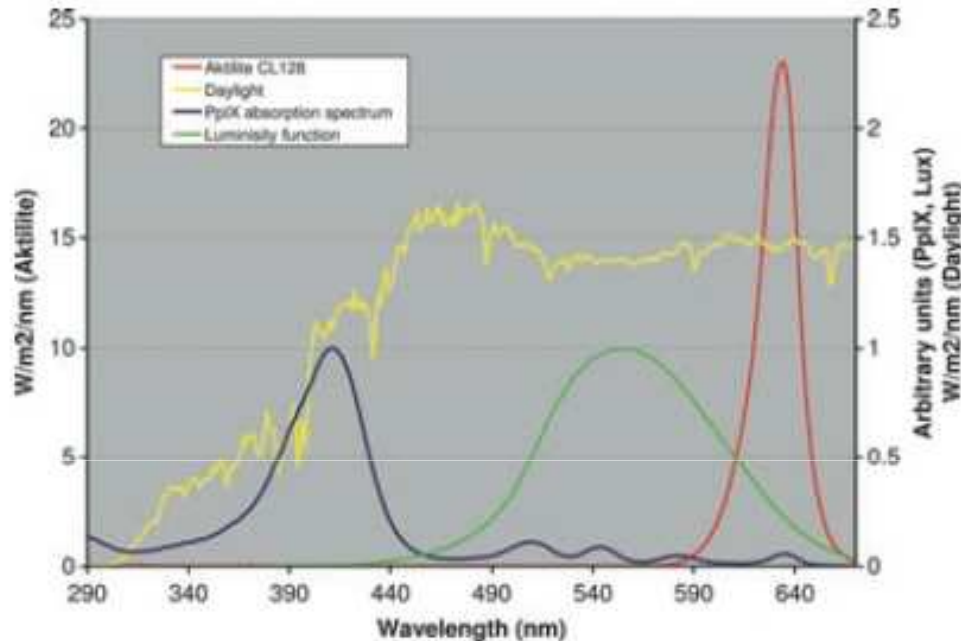
Pics d'absorption :
410nm, 505nm, 540nm,
580nm, 635nm

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 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



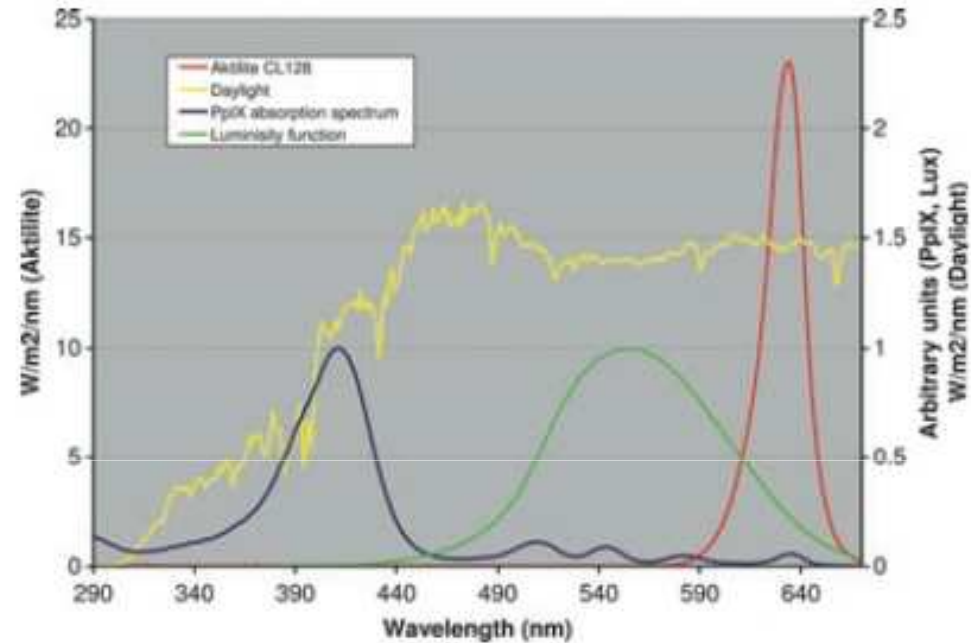
nécessité de définir une dose effective

Dose = Fluence = Irradiance x temps d'exposition

Dose effective = Dose pondérée par spectre absorption PpIX

Daylight PDT

Dose lumineuse effective



Dose effective correspondant à Aktlite : 1Jcm^{-2}

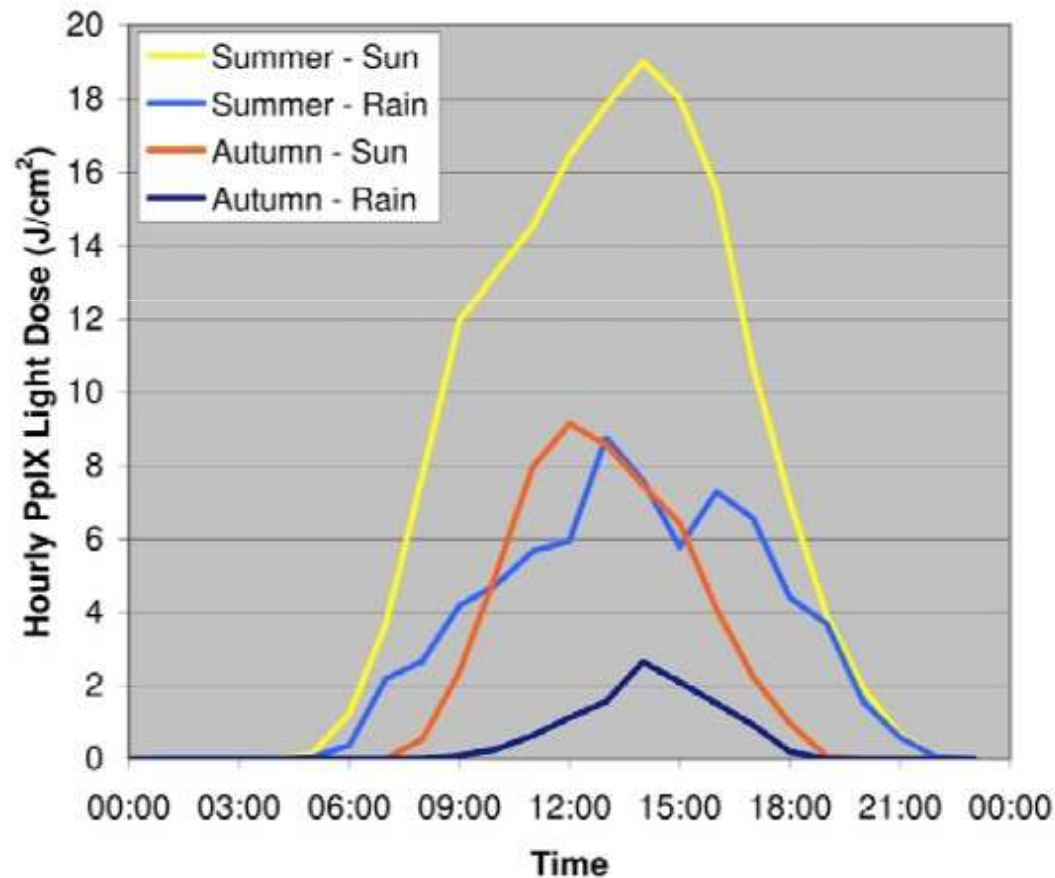
Dose effective retenue pour traitement daylight : 8Jcm^{-2}

Dose effective lumineuse (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 J/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 : 8Jcm^{-2}

Dose effective PpIX par heure (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⁻²

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