

## 11. L'énergie solaire

### *11.2 – Le soleil et le rayonnement solaire*

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

*Département de génie mécanique*

Ricardo Izquierdo, Ing., Ph.D.

Valery J. Bouchard

Thomas Lamalle



# Question

- En combien de temps arrive-t-il assez d'énergie solaire sur Terre pour répondre aux besoins énergétiques du monde d'une année entière ?
  - A. 1 seconde
  - B. 1 minute
  - C. 1 heure
  - D. 1 jour
  - E. 1 semaine

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- Le Soleil
- Le rayonnement solaire
- La ressource solaire
- Conclusion

# Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs***
- Le Soleil
- Le rayonnement solaire
- La ressource solaire
- Conclusion

# Introduction et objectifs

- Il existe une base commune pour effectuer des dimensionnements de collecteurs, qu'ils soient thermiques ou photovoltaïques.
- Il faut en premier lieu connaître quelque peu la source d'énergie et son rayonnement.
- Il faut déterminer ensuite quel est l'angle d'incidence du rayonnement sur une surface.

# Introduction et objectifs

- Une fois le rayonnement du soleil déterminé sur une surface, il est possible de considérer les applications.
  - Cours ENR 835 – Technologies des systèmes solaires, Louis Lamarche
  - Cours ENR889 – Systèmes d'énergie solaire photovoltaïque, Ricardo Izquierdo
  - Cours MEC 6214 – Énergie solaire et applications , Michaël Kummert, École Polytechnique de Montréal

# Introduction et objectifs

- Prendre conscience du potentiel solaire
- Comprendre en quoi consiste le rayonnement solaire
- Connaitre les différentes composantes du rayonnement
- Connaitre les lois qui régissent le rayonnement

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- ***Le Soleil***
- Le rayonnement solaire
- La ressource solaire
- Conclusion



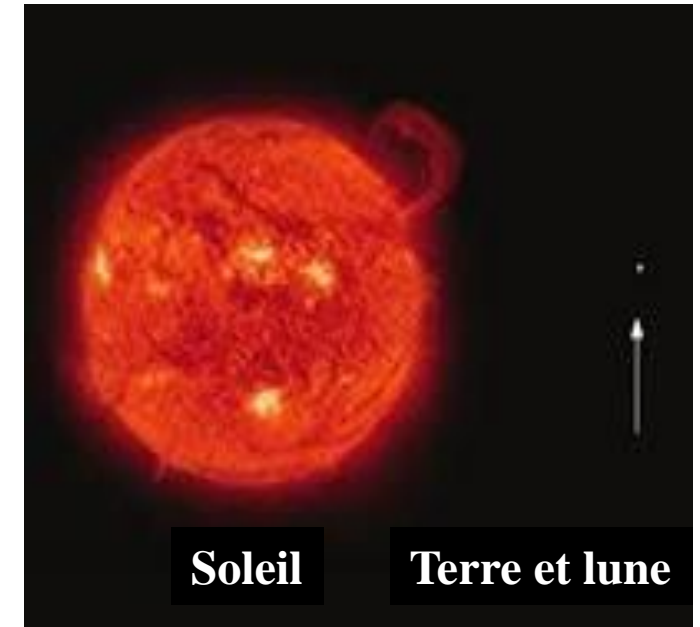
# Le Soleil

*“I'd put my money on the sun and solar energy. What a source of power! I hope we don't have to wait until oil and coal run out before we tackle that.”*

[Thomas Edison, conversations with Henry Ford, **1931**]

# Le Soleil

- Le soleil:
  - Étoile au centre du système solaire
    - Diamètre:  $1,391 \times 10^6 \text{ km} = >100 \times \text{Terre}$
    - Centre: Densité  $\cong 150 \times \text{eau}$ ,  $T > 10^6 \text{ K}$
    - Moteur : Fusion de l'hydrogène
    - T surfacique :  $5\,777 (5\,800) \text{ K}$  (corps noir)
  - Composition
    - 73% d'Hydrogène / 25% d'Hélium / 2% Oxygène, Carbone, ...
  - Distance
    - Distance :  $1,5 \times 10^{11} \text{ m}$
    - Variation de distance:  $\pm 1,7 \%$
    - Temps: 8 min 20 sec



Réf: Michaël Kummert, 2011

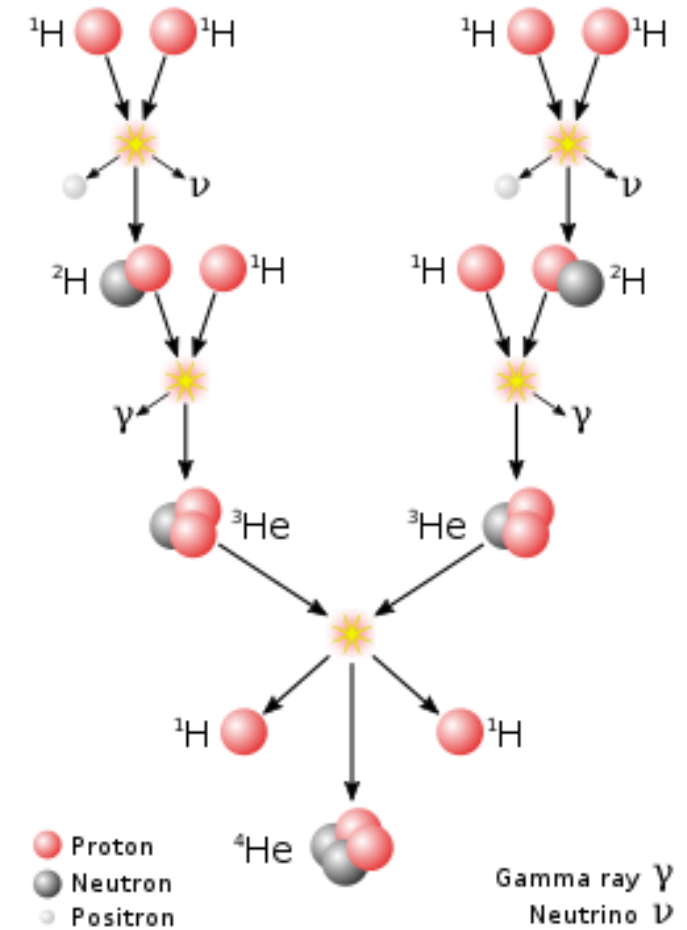
# Le Soleil

- Pourquoi brille-t-il?
  - Le cœur a une température de plusieurs millions de K, ce qui est suffisamment chaud pour fusionner l'hydrogène.
  - Les rayons gamma générés au cœur deviennent progressivement de la lumière visible en cheminant vers la surface (jusqu'à 100 000 ans).
  - L'énergie chemine vers la surface par radiation, puis par convection, puis de nouveau par radiation.

# Le Soleil

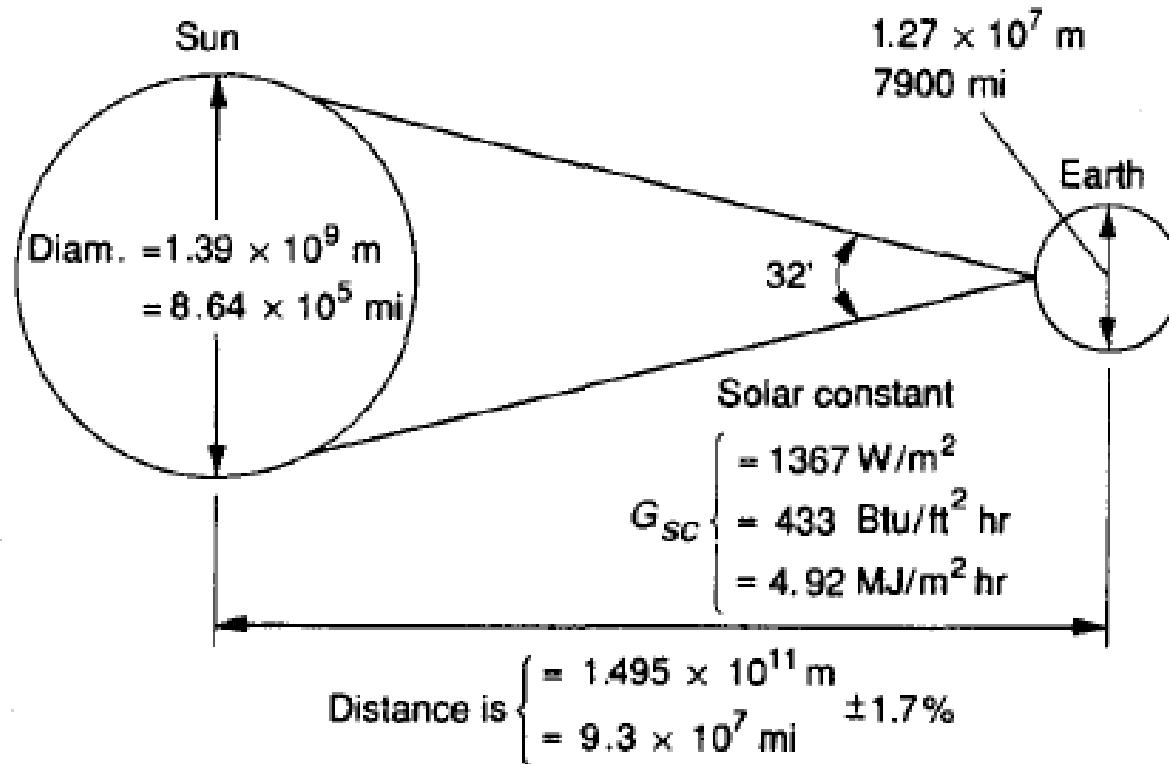
- Pourquoi brille-t-il?

- Quatre noyaux d'hydrogène (1 proton) sont fusionnés en un seul noyau d'hélium (2 neutrons + 2 protons)
- La masse de He est légèrement inférieure à celle des quatre H (0,7%)
- Relation masse-énergie:  $E=mc^2$
- 1g de matière contient l'équivalent en énergie de **15 000** barils de pétrole
- 500 millions tonnes d'hydrogène par seconde



# Le Soleil

- Constante solaire – valeur moyenne sur une année



$$G_{SC} \approx 1367 \text{ W/m}^2$$

Figure 1.2.1 Sun-earth relationships.

Réf : Duffie et Beckman, 2006

# Le Soleil

- Rayonnement solaire extraterrestre incident sur un plan normal à l'irradiation, variable en fonction de la distance Soleil-Terre

$$G_{on} = G_{SC} \left[ 1 + 0,0334 \cos \left( \frac{360(n - 3)}{365} \right) \right]$$

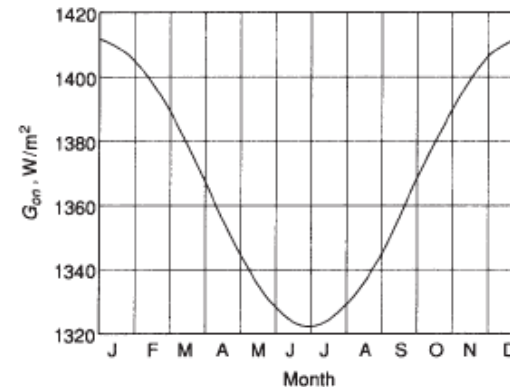
– Où  $n$  est le jour de l'année

– Indices :

- $o$  -> outside the atmosphere
- $n$  -> normal
- $G_{sc}$  -> solar constant

– Le maximum est atteint en janvier et décembre, alors que le Soleil est au plus près de la Terre.

– Veuillez vous assurer de calculer les fonctions trigonométriques adéquatement (RAD vs DEG)

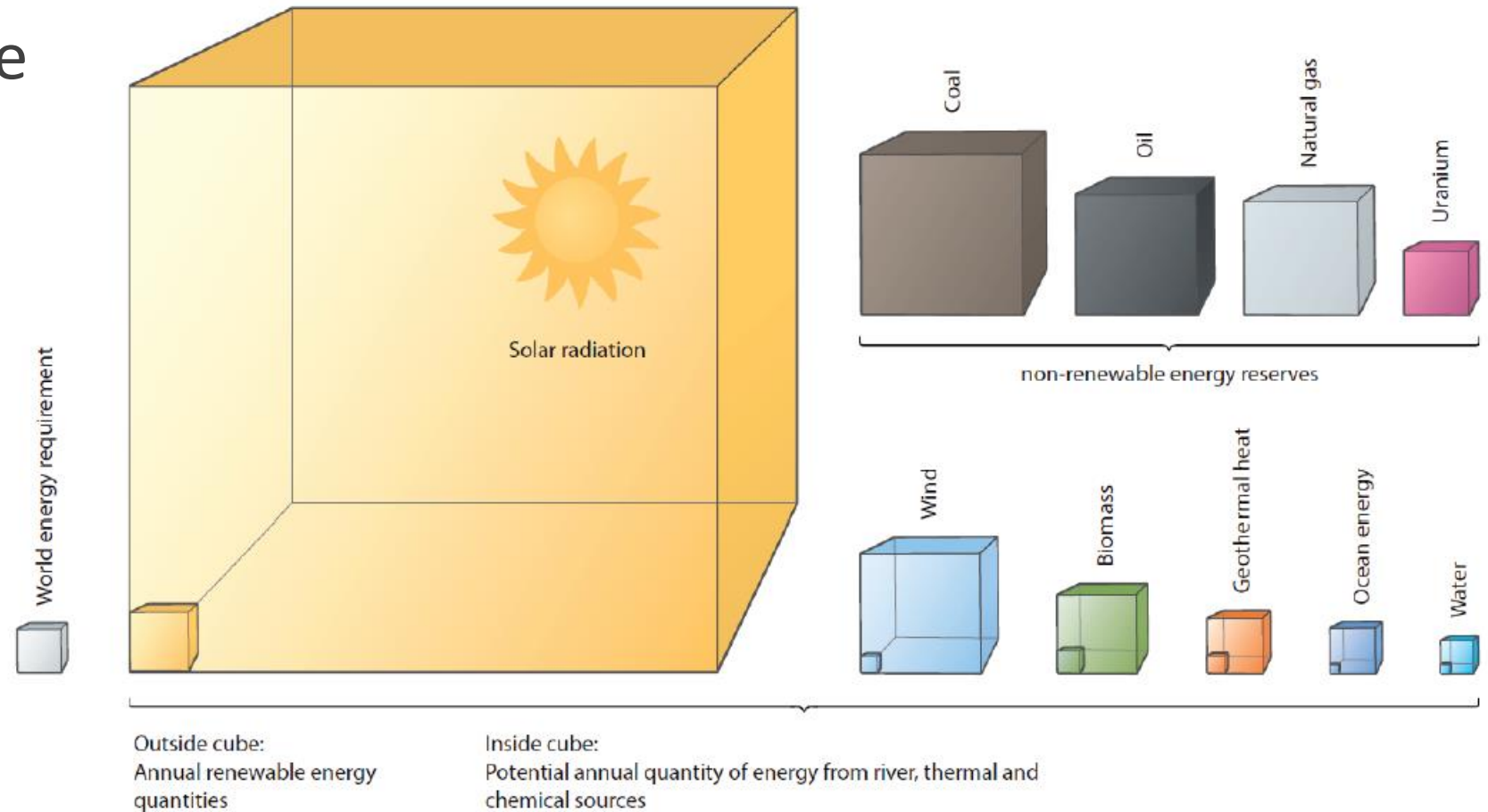


# Le Soleil

## Le potentiel du solaire

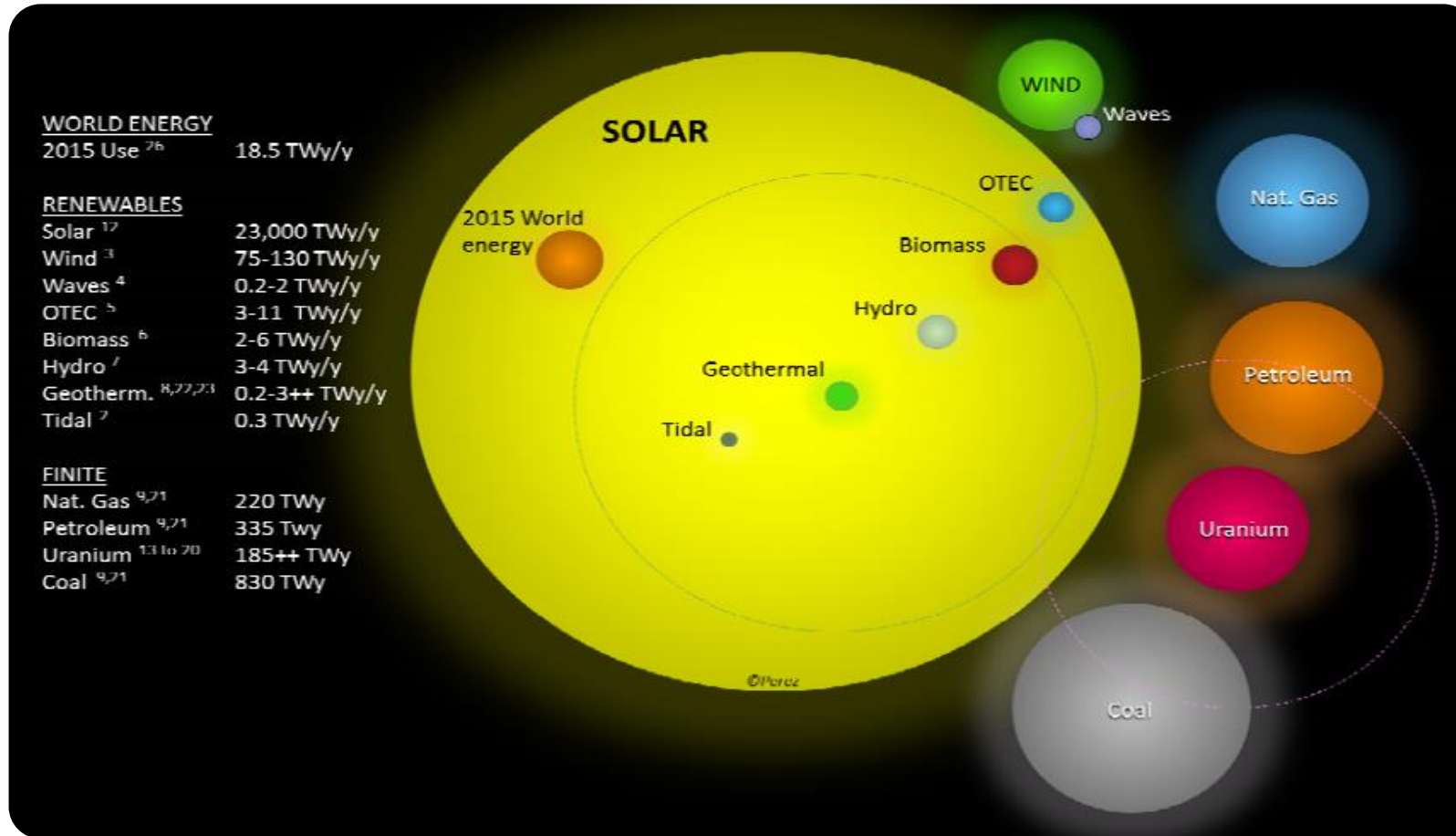
En dehors de l'atmosphère :  
1 m<sup>2</sup> perpendiculaire au  
rayonnement reçoit environ  
**1 367W.**

$$G_{SC} = 1367 \text{ W/m}^2$$



Réf: Michaël Kummert, 2011

# Le Soleil



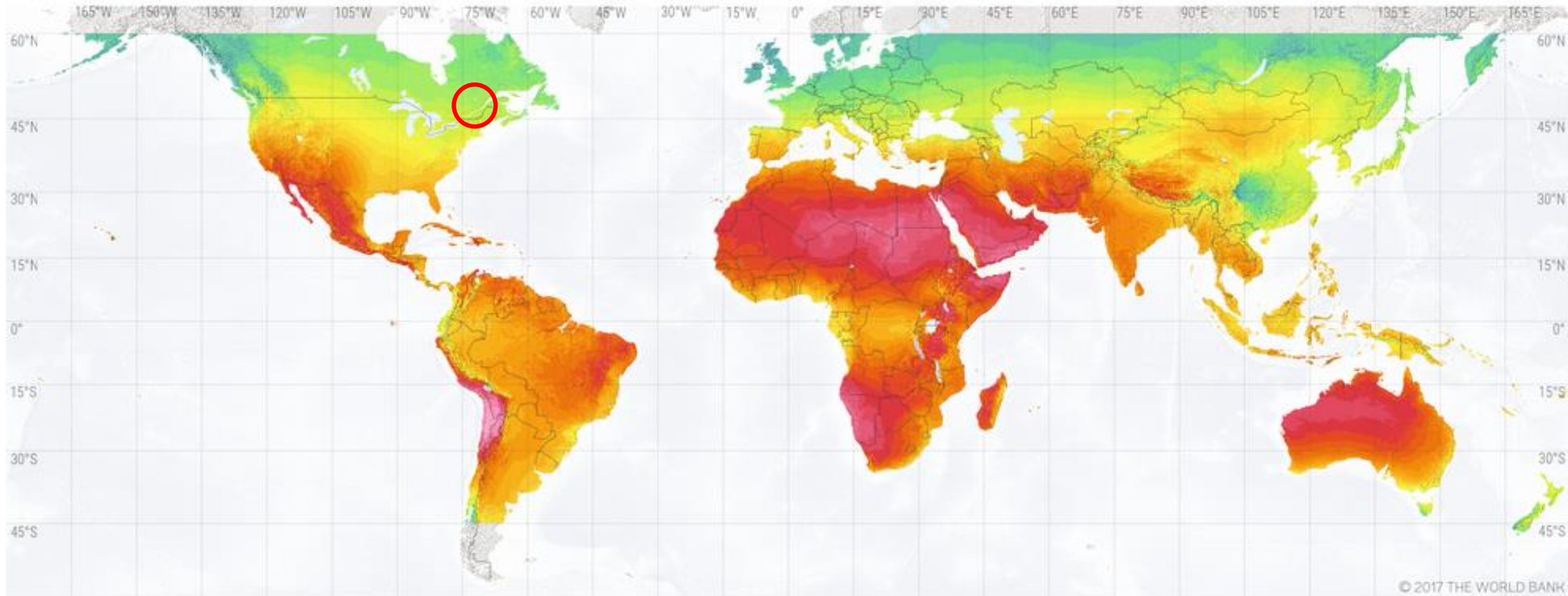
2015 estimated finite and renewable planetary energy reserves (Terawatt-years). Total recoverable reserves are shown for the finite resources. Yearly potential is shown for the renewables

Réf: A FUNDAMENTAL LOOK AT SUPPLY SIDE ENERGY RESERVES FOR THE PLANET  
 Marc Perez & Richard Perez



# Le Soleil

## SOLAR RESOURCE MAP GLOBAL HORIZONTAL IRRADIATION

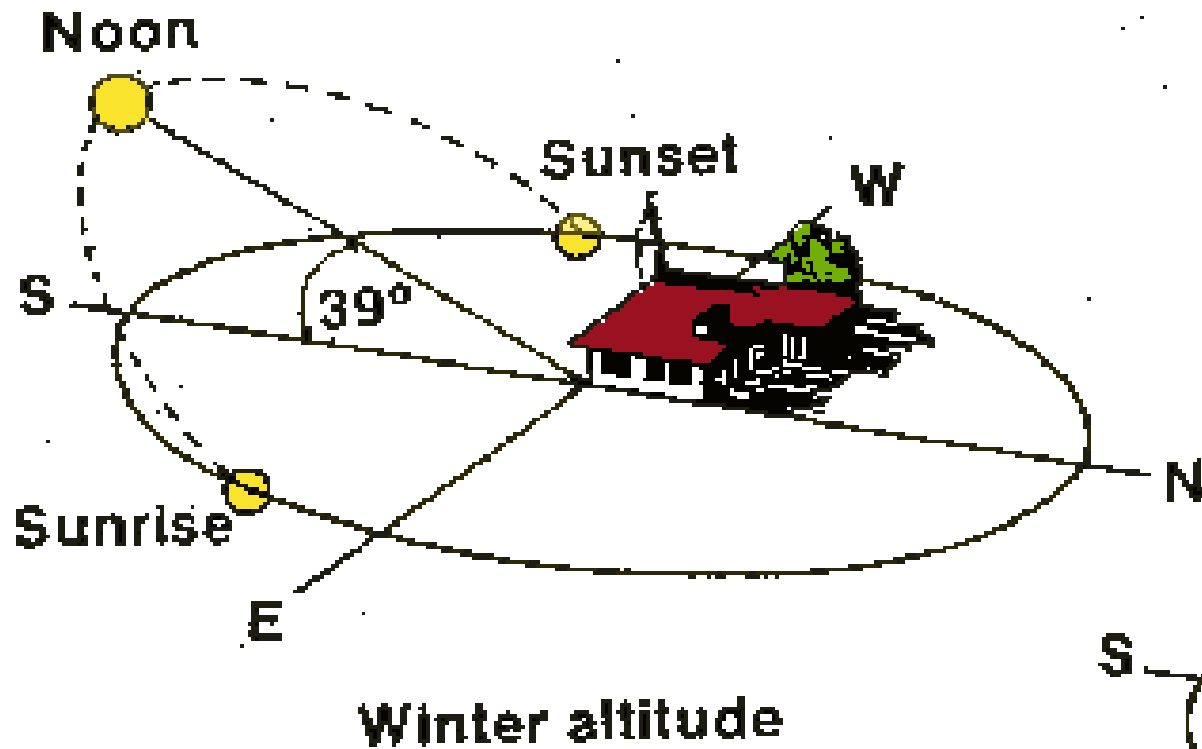


This map is published by the World Bank Group, funded by ESMAP, and prepared by Solargis. For more information and terms of use, please visit <http://globalsolaratlas.info>.

# Plan de la présentation

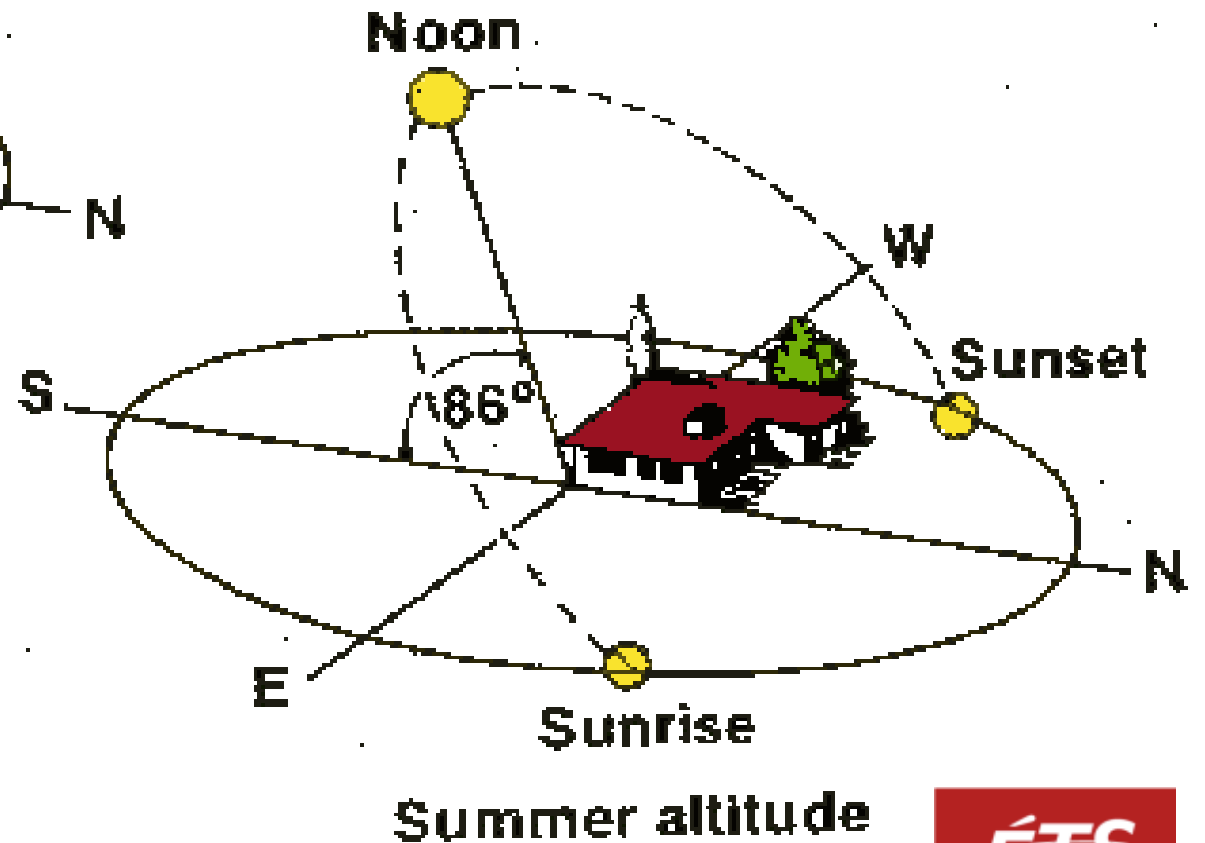
- Introduction et objectifs
- Le Soleil
- ***Le rayonnement solaire***
- La ressource solaire
- Conclusion

# Rayonnement solaire

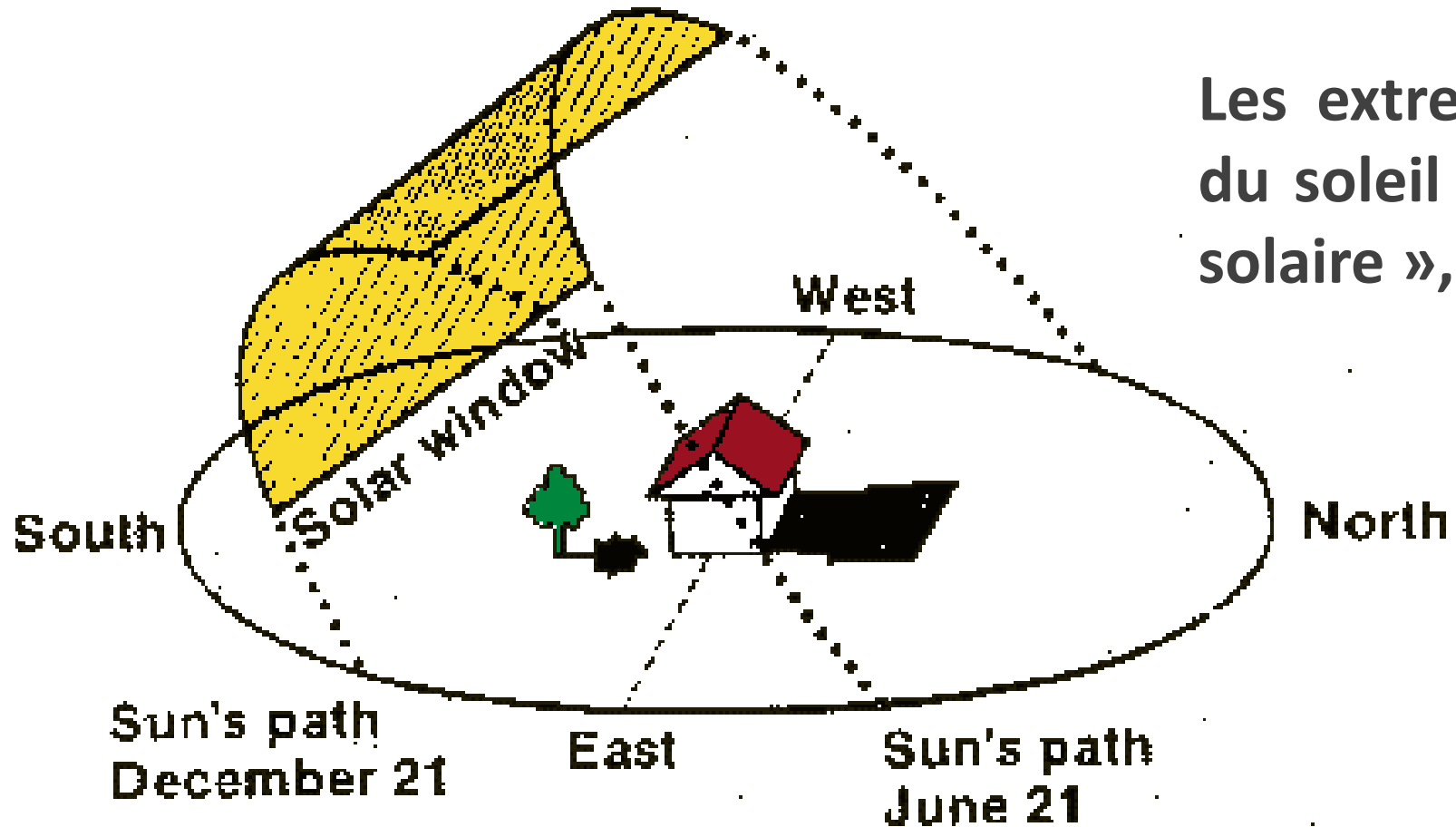


En hiver, le soleil est plus bas et pendant moins longtemps.

En été, le soleil est plus haut et sur une plus longue période.



# Rayonnement solaire

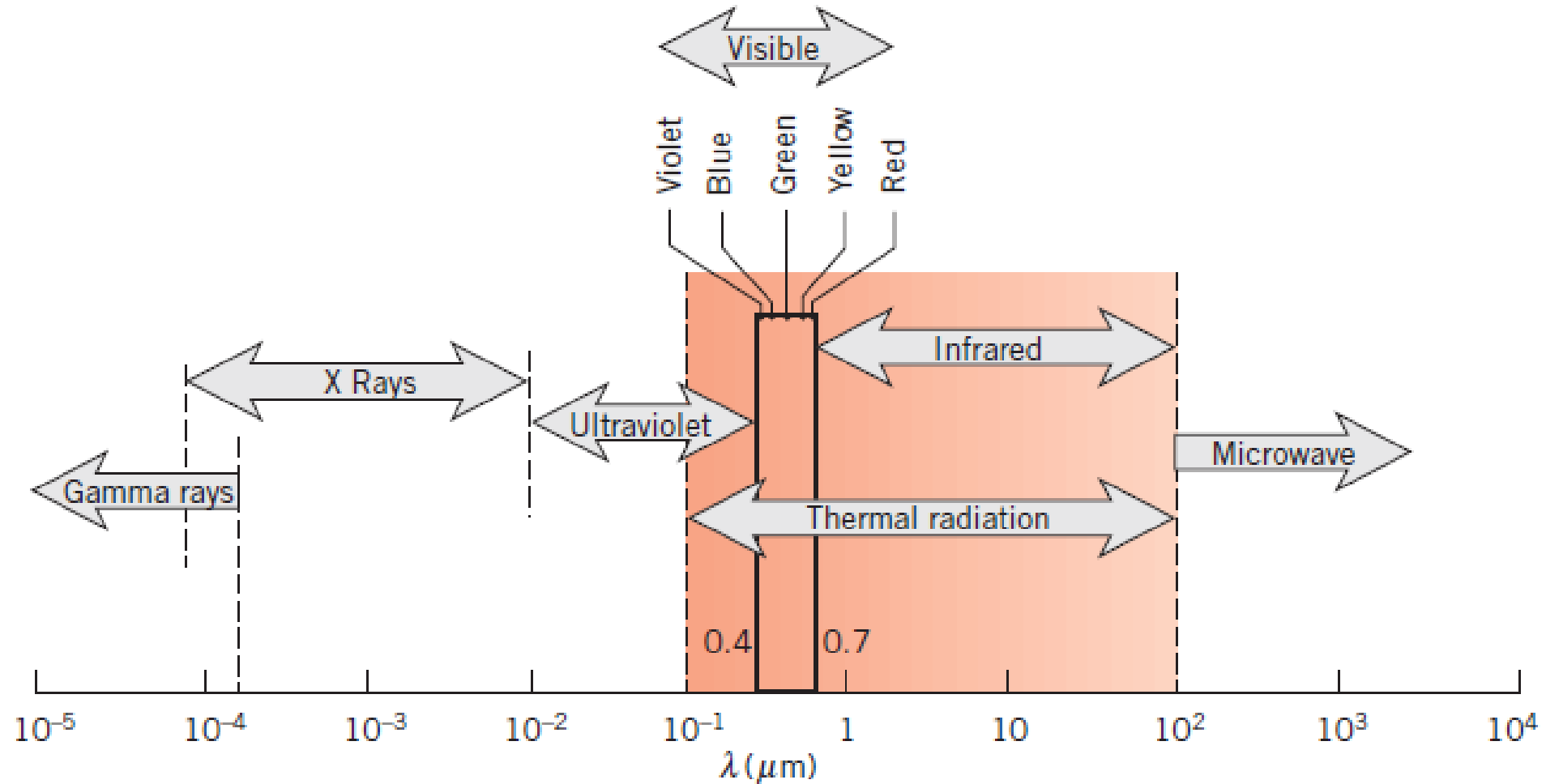


Les extremums de la trajectoire du soleil définissent la « fenêtre solaire », à exposition maximum

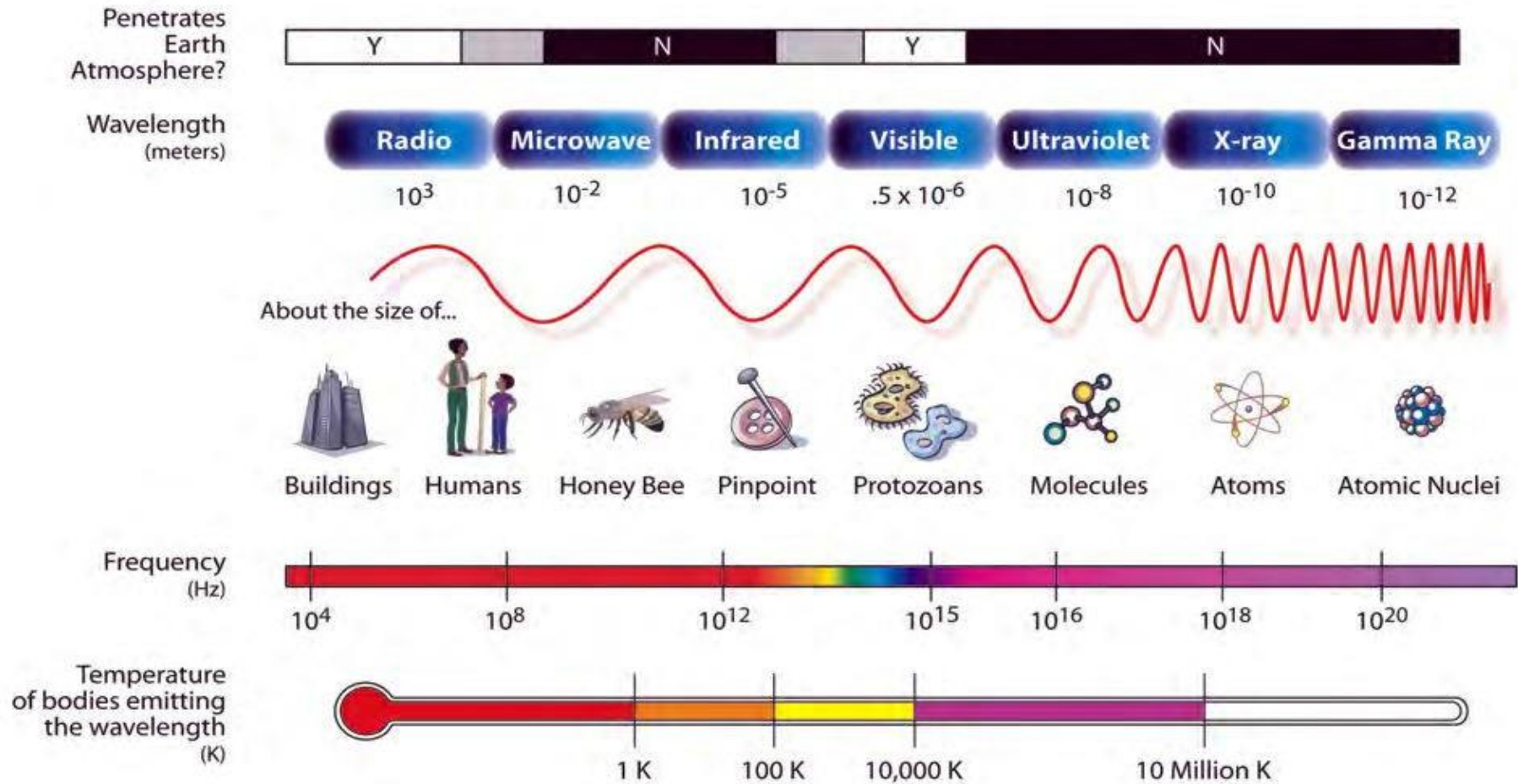
# Rayonnement solaire

- L'aspect spectral est caractérisé par une fréquence et une longueur d'onde
- $\lambda = \frac{c}{\nu}$
- $\lambda$  : Longueur d'onde
- $c$  : La vitesse de la lumière dans le milieu
- $\nu$  : La fréquence
- $c_0$  : La vitesse de la lumière dans le vide  $2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$

# Rayonnement solaire



# Rayonnement solaire



<http://myasadata.larc.nasa.gov/ElectroMag.htm>

# Rayonnement solaire

- Corps noir
  - Corps idéal qui
    - Absorbe toute la radiation incidente;
    - Émet davantage de rayonnement que tout autre corps à la même température;
    - Émet le rayonnement de façon diffuse.



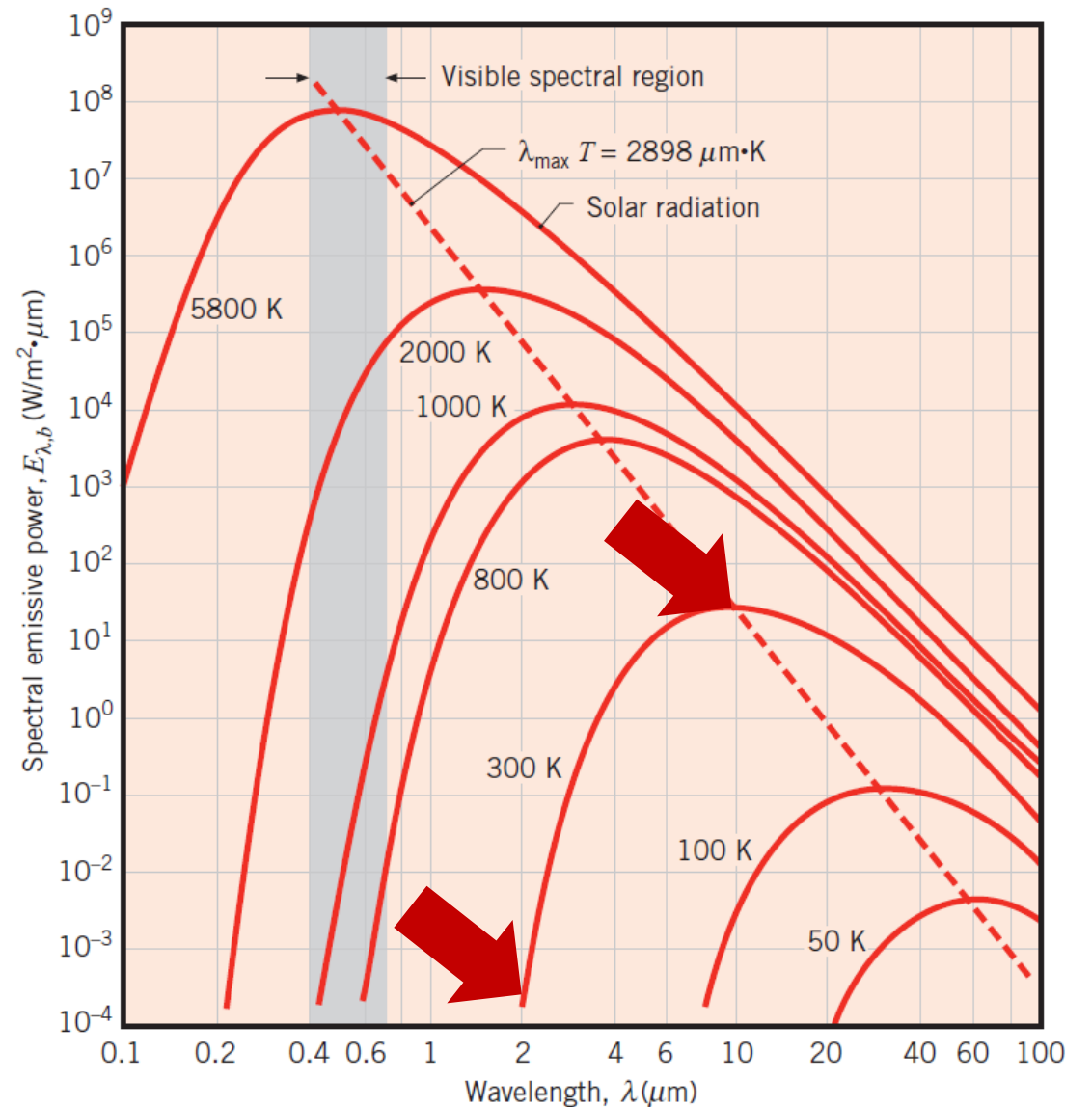
# Rayonnement solaire

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

$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}$$
$$C_1 = 3.742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2}$$
$$C_2 = 1.439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

# Rayonnement solaire

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



# Rayonnement solaire

- **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:

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

- Cas du soleil à  $\lambda_{max}=0.5 \mu m$
- **Attention**,  $T$  est exprimée en Kelvin!

# Rayonnement solaire

- **Loi de Stefan-Boltzmann**

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

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

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

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

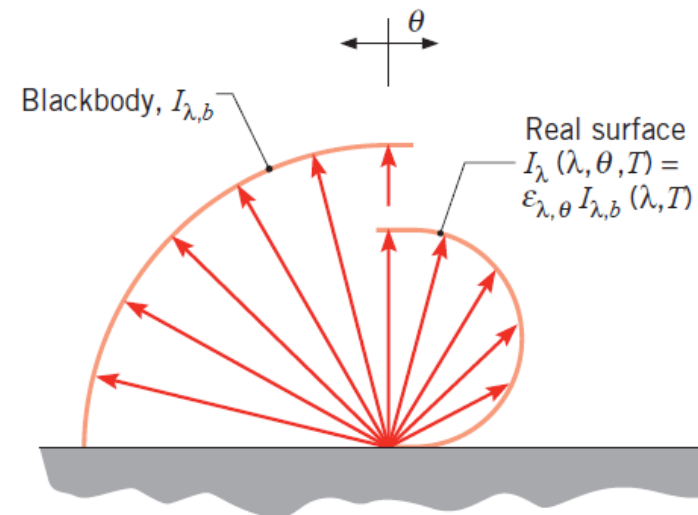
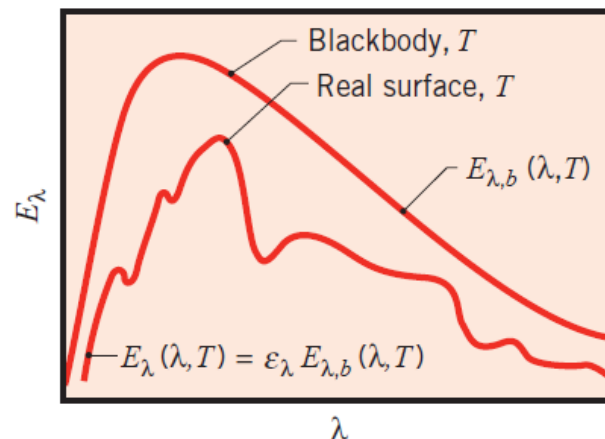
# Rayonnement solaire

- Corps gris

- Corps réel

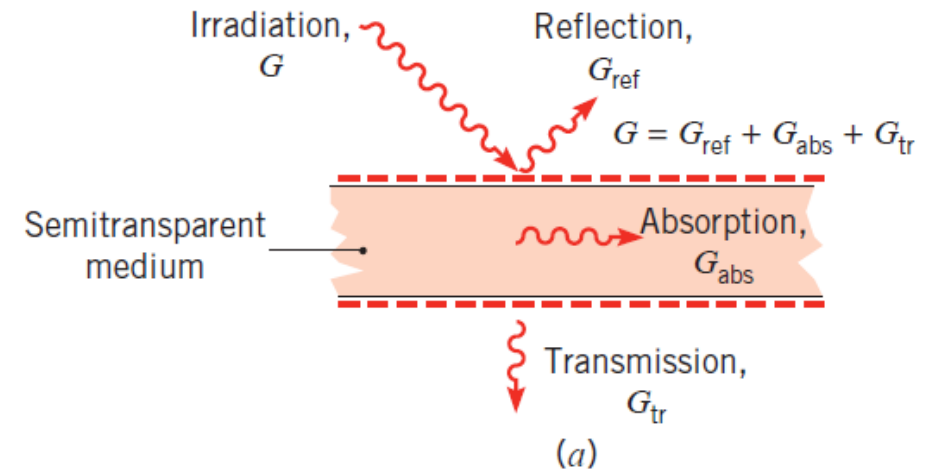
- On le caractérise à l'aide de l'émissivité,  $\varepsilon = \frac{E(T)}{E_b(T)} = \frac{E(T)}{\sigma T^4}$

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



# Rayonnement solaire

- Matériau transparent
  - L'irradiation (*irradiance*) ( $G_s$ ) peut être :
    - Absorbée
    - Réfléchie
    - Transmise



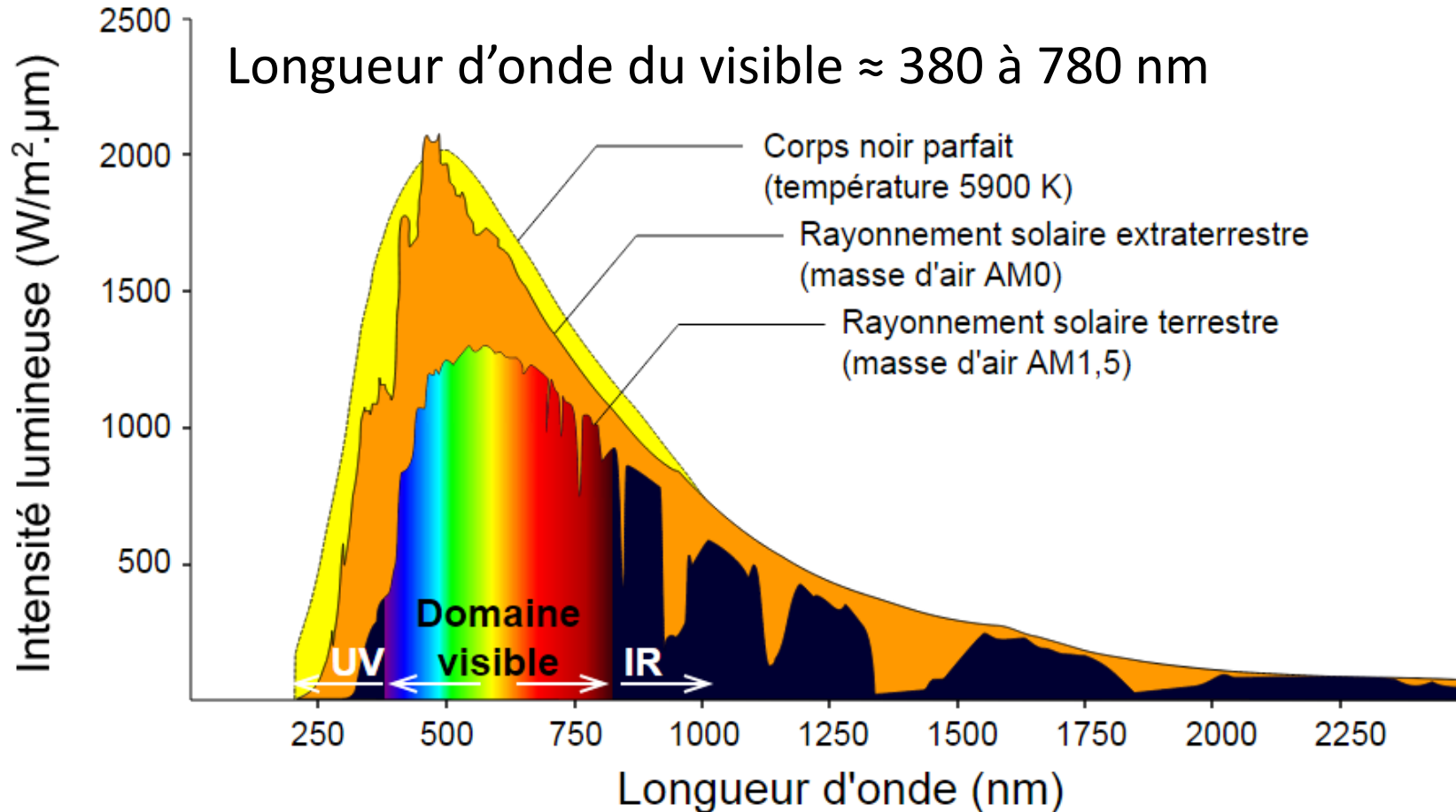
$$G_s = \alpha_s G_s + \rho_s G_s + \tau_s G_s = (\alpha + \rho + \tau)_s G$$

$$\alpha_s + \rho_s + \tau_s = 1$$

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

# Rayonnement solaire

- Spectre solaire



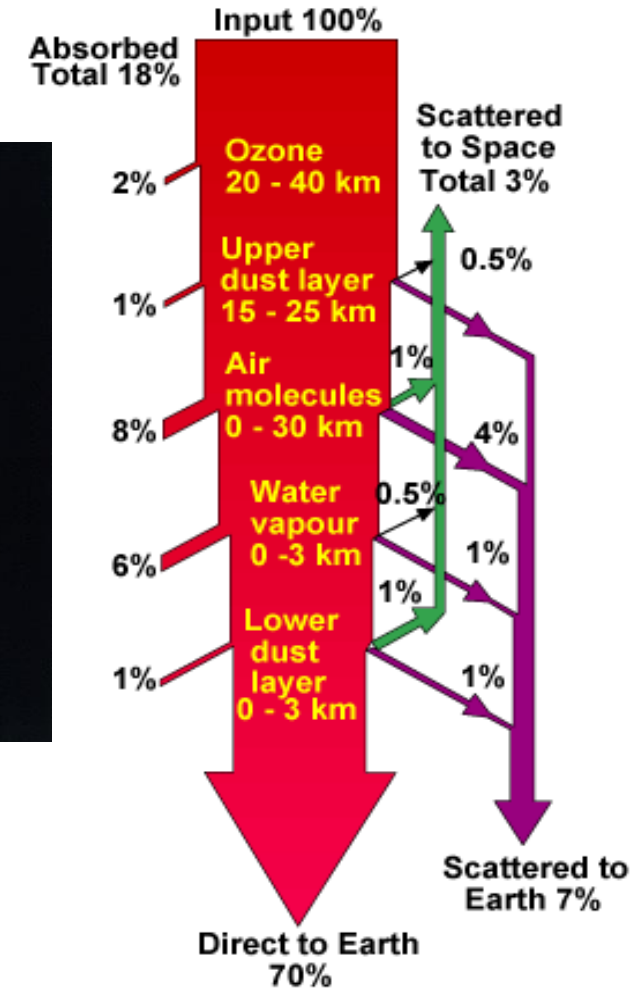
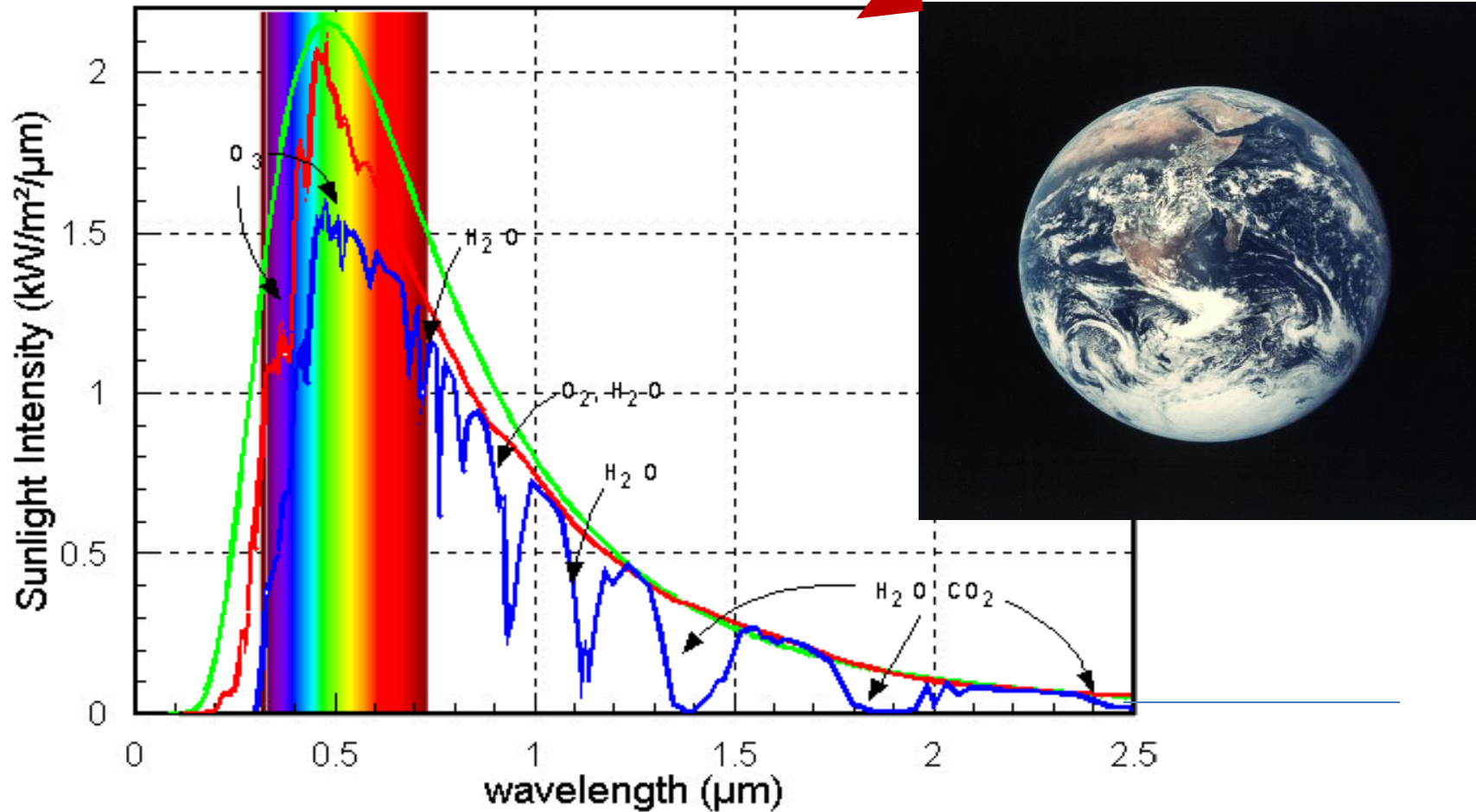
Air mass (AM) :  
Rapport de la masse de l'atmosphère à travers laquelle passe le rayonnement à la masse de cette atmosphère si le soleil était au zénith.

AM = 1 au niveau de la mer lorsque le soleil est au zénith

AM = 2 lorsque  $\theta_z = 60^\circ$

# Rayonnement solaire

- Spectre solaire





# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- Le Soleil
- Le rayonnement solaire
- ***La ressource solaire***
- Conclusion

# La ressource solaire

- Grand potentiel pour les processus de conversion directe

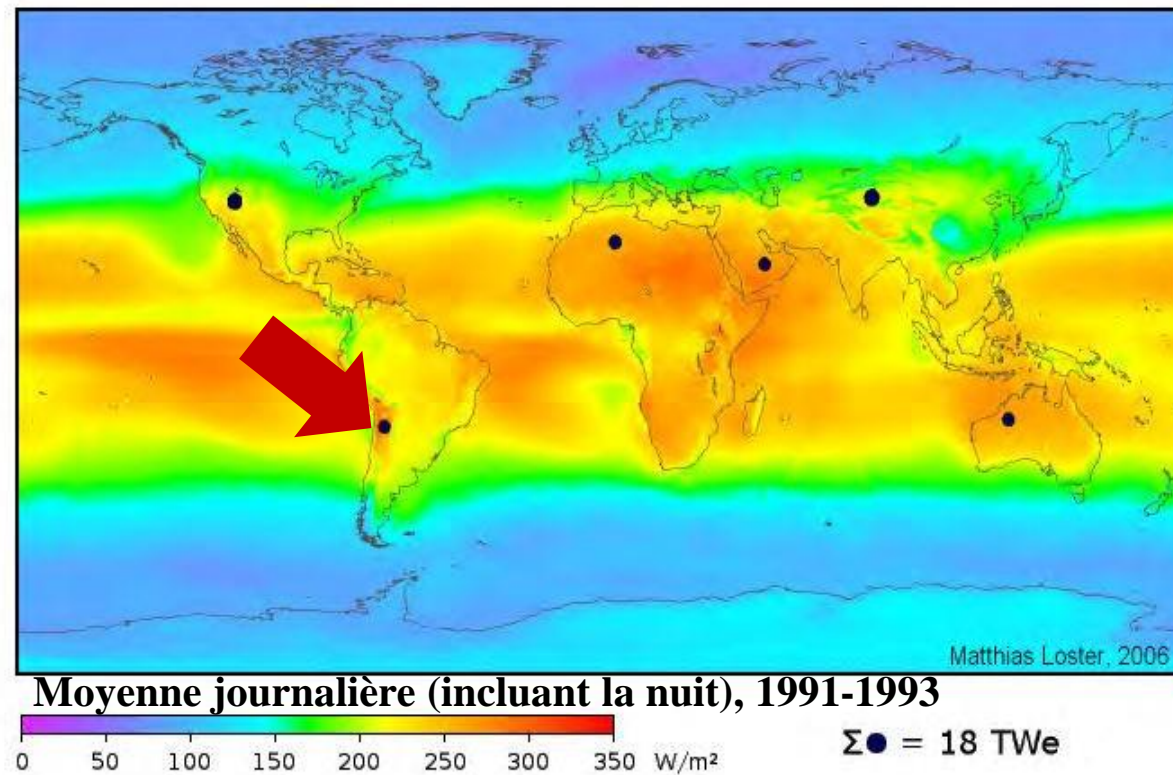
Type	Potentiel théorique (kWh/année)
Hydro	$4.1 \times 10^{14}$
Biomasse	$8.1 \times 10^{14}$
Éolien	$1.7 \times 10^{15}$
Océan	$2.1 \times 10^{15}$
<b>Solaire</b>	<b><math>1.1 \times 10^{18}</math></b>

Source: *United Nations World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability*

[www.undp.org/energy/activities/wea/drans--frame.html](http://www.undp.org/energy/activities/wea/drans--frame.html)

# La ressource solaire

- Assez d'énergie solaire arrive sur terre chaque heure pour répondre aux besoins énergétiques du monde pour une année entière.




[http://www.ez2c.de/ml/solar\\_land\\_area/](http://www.ez2c.de/ml/solar_land_area/), via Wikimedia Commons

# La ressource solaire

- Façons de convertir l'énergie solaire

Approche de conversion	Énergie (in)	Énergie (out)	Quantité convertie (2017)	Quantité convertie (2018)
Photosynthèse	Rayonnement	Chimique	100 500 TW	100 500 TW
Solaire thermique	Rayonnement	Thermique	472 GW	480 GW
Solaire thermodynamique	Rayonnement	Électrique	4,9 GW	5,5 GW
Solaire photovoltaïque	Rayonnement	Électrique	402 GW	505 GW



**A partir de 2018, davantage de solaire photovoltaïque est désormais installé**

# La ressource solaire

## Où trouver les données d'irradiance ?

- Données déjà incorporées dans des logiciels
  - RETscreen, incorpore les données du Canada
  - TRNSYS : dimensionnement de systèmes
  - Meteonorm (v7.3) : irradiance datas
  - PVSyst : dimensionnement de systèmes PV, utilise Meteonorm
  - T\*Sol de Valentin Software : dimensionnement de système solaire thermique
  - PV F-chart : dimensionnement et analyse de systèmes PV

# La ressource solaire

- **Calculateur solaire de la NOAA**
  - Earth System Research Laboratory (ESRL), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) - US Department of Commerce
  - <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/>
- **Calculateur de rayonnement PVWatts pour un système donné**
  - National Renewable Energy Laboratory (NREL) – US Department of Energy
  - <http://pvwatts.nrel.gov/>
  - Permet de récupérer un fichier météo pvwatts\_hourly.csv
    - Month, Day, Hour,
    - Beam Irradiance (W/m<sup>2</sup>), Diffuse Irradiance (W/m<sup>2</sup>),
    - Ambient Temperature (C), Wind Speed (m/s),
    - Plane of Array Irradiance (W/m<sup>2</sup>),
    - Cell Temperature (C),
    - DC Array Output (W),
    - AC System Output (W)

# La ressource solaire

- Calculateur de rayonnement PVGIS

<http://www.photovoltaique-energie.fr/pvgis-logiciel-en-ligne-de-simulation.html>

L'application en ligne gratuite PVGIS est un outil de simulation qui permet de calculer la production de systèmes photovoltaïques connectés au réseau en Europe et en Afrique (et également pour site isolés).

Une version 5.0 permet désormais un prolongement en Asie et en Amérique : [http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/fr/tools.html](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/fr/tools.html)

- Programme POWER (Prediction Of Worldwide Energy Resources) de la NASA

<https://power.larc.nasa.gov/>

Permet d'extraire des données météo pour n'importe quelles coordonnées géographiques sur la planète et n'importe quelle plage de temps. Les données sont téléchargeables en format ASCII (.txt).

- Rayonnement sur une surface inclinée

<https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/solar-radiation-on-a-tilted-surface>

# La ressource solaire

- Calculateur de rayonnement PVGIS
  - <http://www.photovoltaique-energie.fr/pvgis-logiciel-en-ligne-de-simulation.html>
  - L'application en ligne gratuite PVGIS est un outil de simulation qui permet de calculer la production de systèmes photovoltaïques connectés au réseau en Europe et en Afrique (et également pour sites isolés).
  - Une version 5.0 permet désormais un prolongement en Asie et en Amérique : [http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/fr/tools.html](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/fr/tools.html)



# La ressource solaire

- Environnement et Changement Climatique Canada (ECCC) fournit aussi des données de radiation

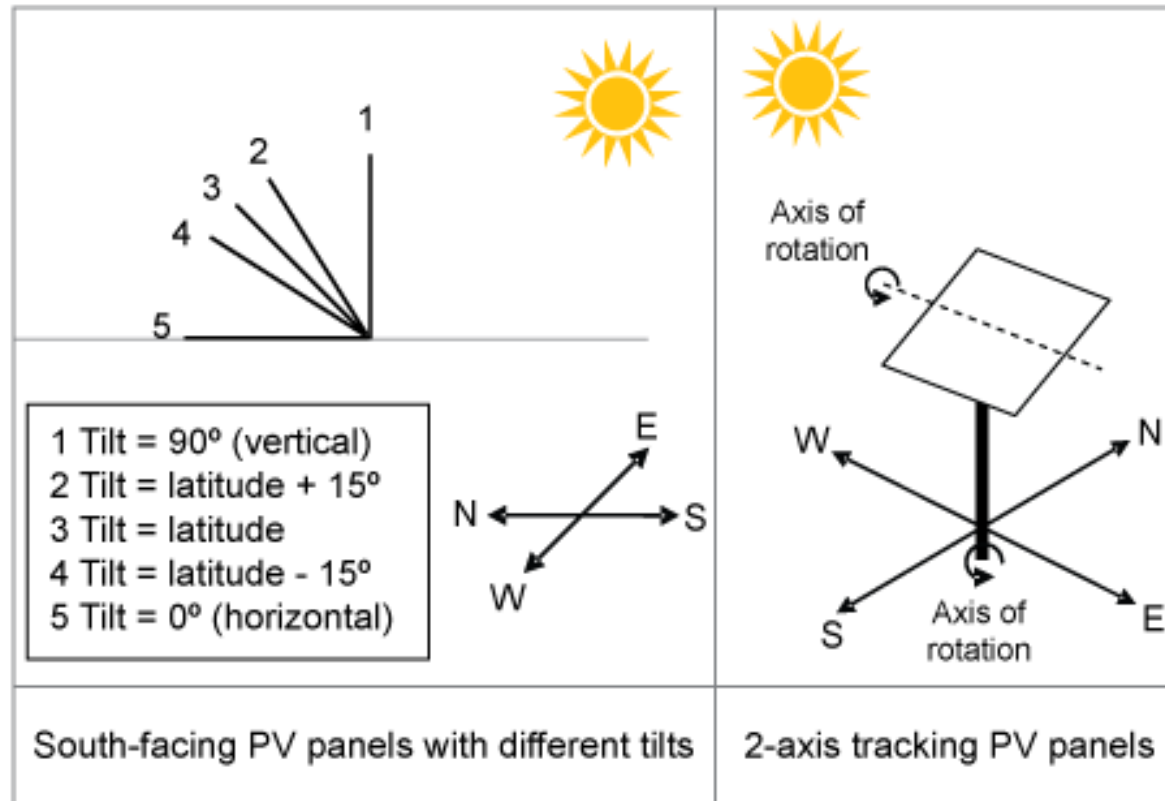
CWEC2016 -> données d'une Typical Meteorological Year (TMY) en format .csv ou .txt

[ftp://client\\_climate@ftp.tor.ec.gc.ca/Pub/](ftp://client_climate@ftp.tor.ec.gc.ca/Pub/)

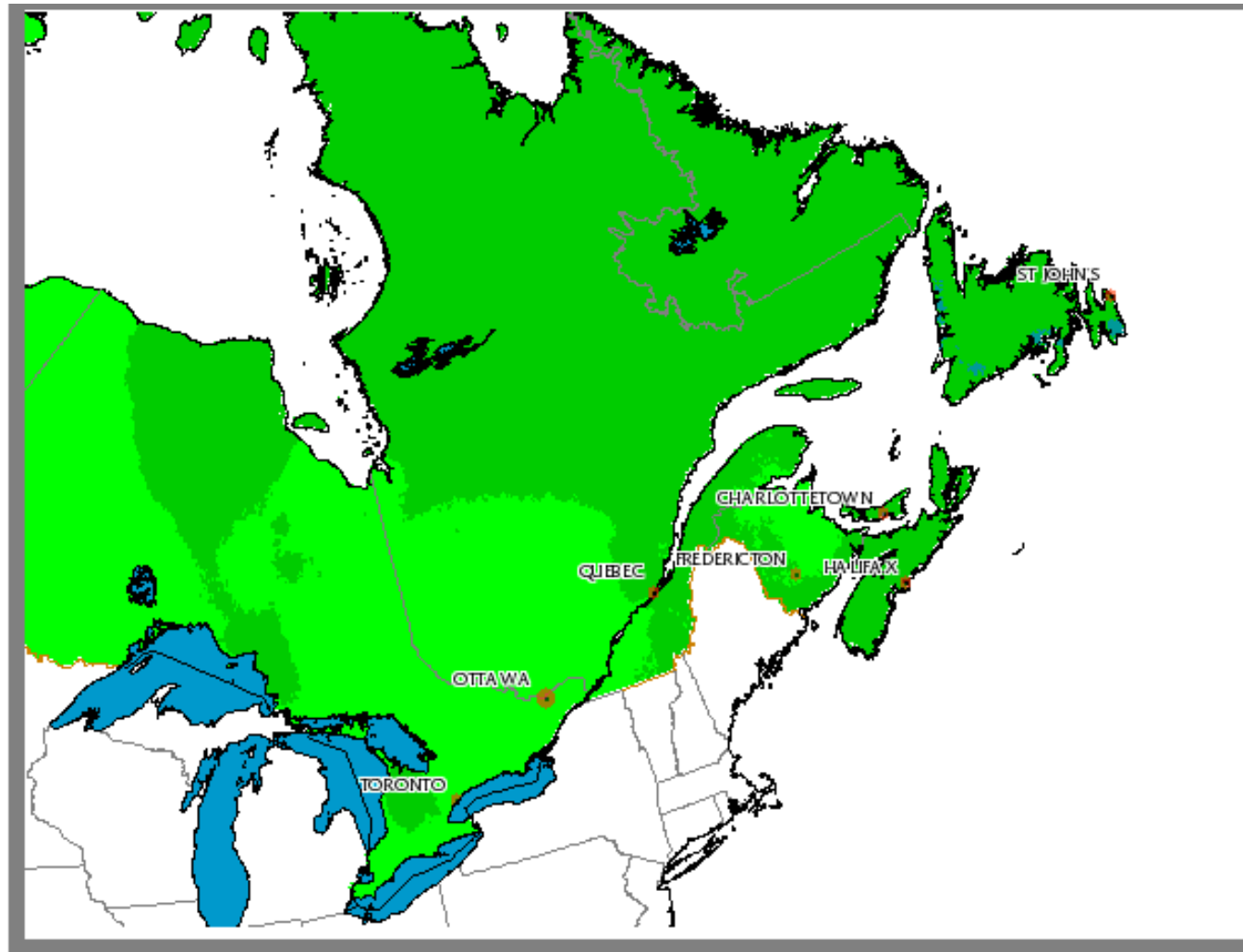
- Autres sources à proposer ?

# La ressource solaire

- Ressources naturelles Canada
  - Cartes du potentiel solaire

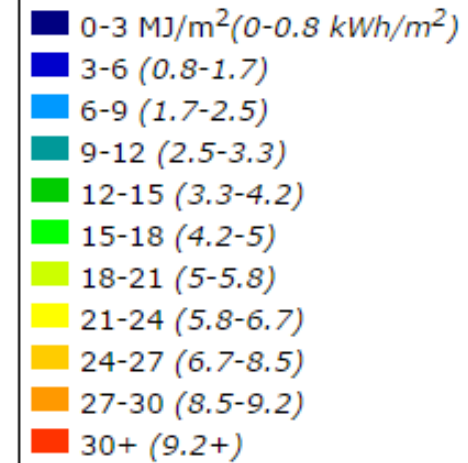


# La ressource solaire



## légende

Ensoleillement global quotidien  
moyen ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ,  $\text{kWh}/\text{m}^2$ ) Orienté  
vers le sud avec  
inclinaison=latitude Annuelle



0 280 560 840 km

# Question

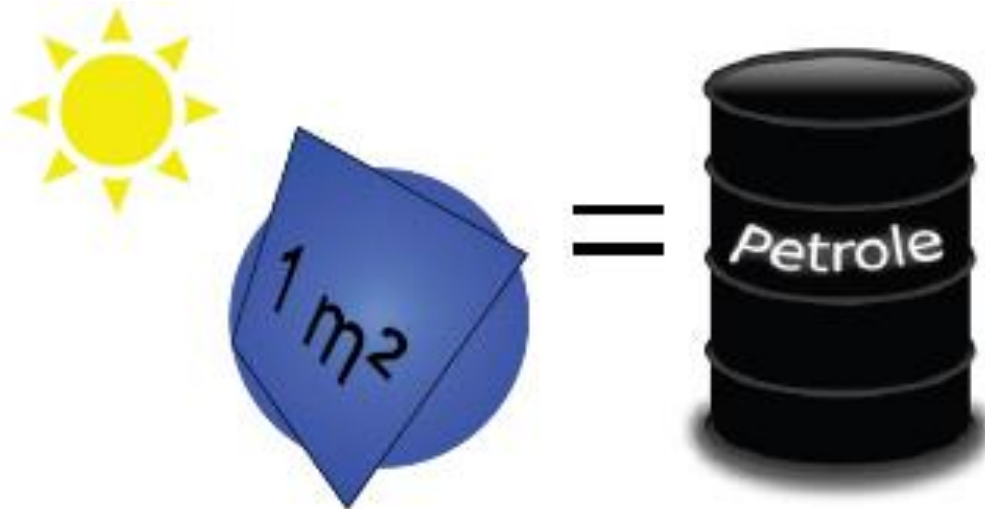


ENR2020

- Quel est l'équivalent énergétique de la ressource solaire reçue au Canada par  $\text{m}^2$  et par an ?
  - A. 1 baril de pétrole
  - B. 1 litre de pétrole
  - C. 100 kg de charbon
  - D.  $10\text{m}^3$  de gaz naturel
  - E.  $100\text{m}^3$  de gaz naturel

# La ressource solaire

- La ressource solaire au Canada
  - Horizontal : 1300 kWh/m<sup>2</sup>·an
  - Optimal (Sud, pente  $\approx$  latitude) : 1580 kWh/m<sup>2</sup>·an
  - 1 baril de pétrole = 159 L  $\approx$  1580 kWh



Réf : Michaël Kummert, 2011

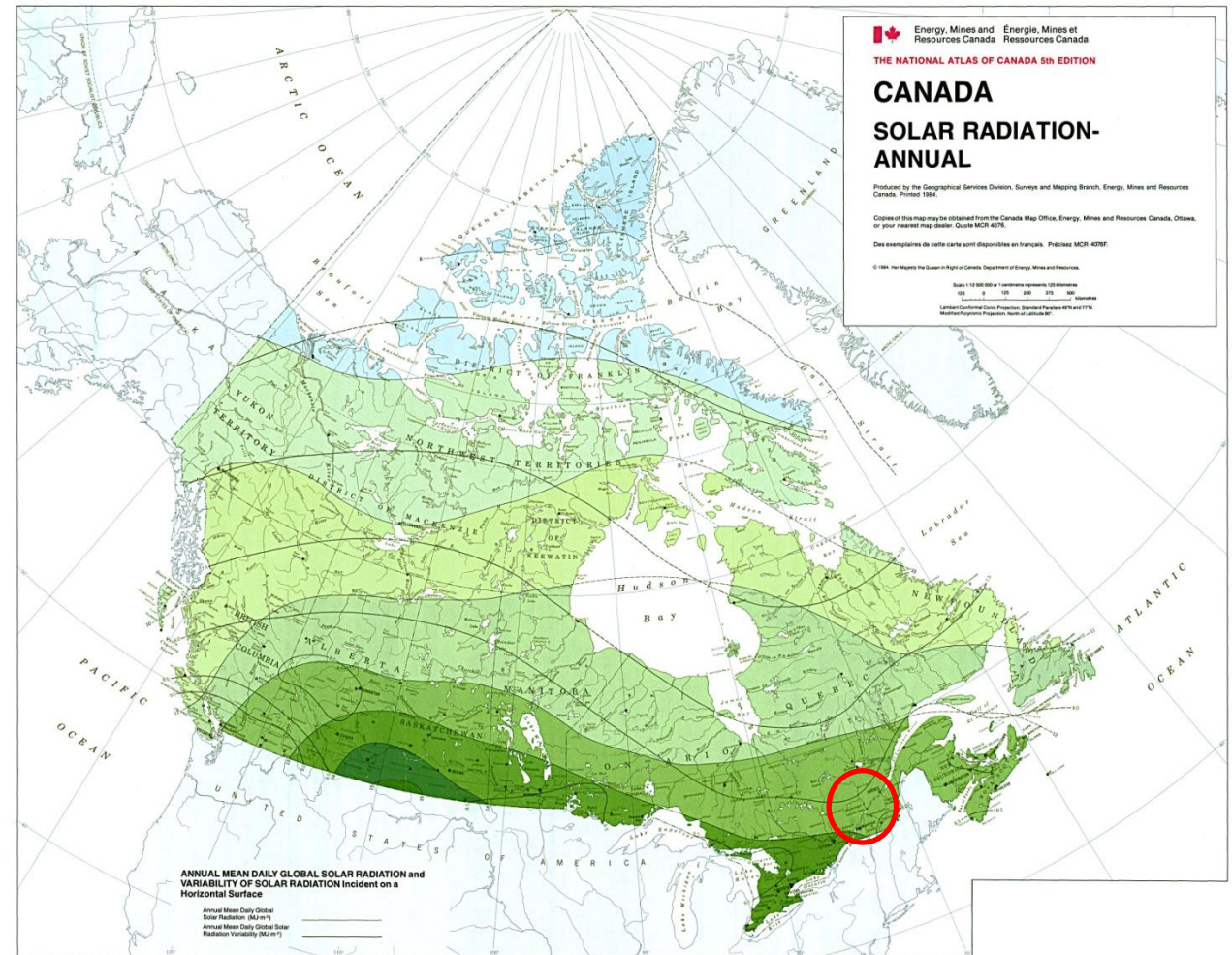
# Ressource solaire

- La ressource solaire disponible est assez complexe (mais pas difficile) à estimer car il faut connaître à tout instant l'angle d'incidence du rayonnement qui arrive sur la surface considérée.
- Ce calcul se fait à partir d'une série d'équations et de modèles présentés ultérieurement.
- Cette section présente les cartes solaires du Canada de la ressource solaire.

# Ressource solaire

- Maps from *Energy, Mines and Resources Canada*
- Moyenne journalière annuelle de la radiation solaire global et de sa variabilité (incidente sur une surface horizontale)

<https://geoscan.nrcan.gc.ca/starweb/geoscan/servlet.starweb?path=geoscan/download.web&search1=R=294675>





# Ressource solaire



- Moyenne journalière annuelle de la radiation solaire global (incidente sur une surface inclinée à 90° et 60° orientée Sud)

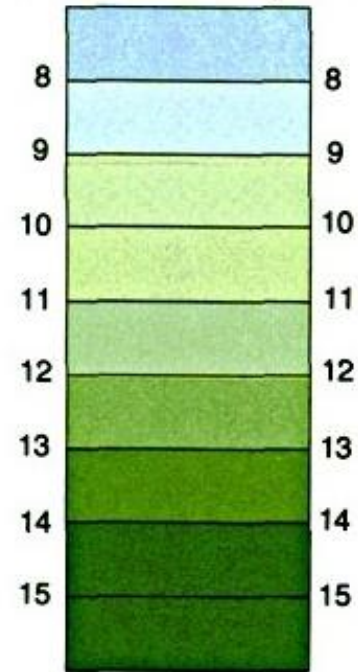
<https://geoscan.nrcan.gc.ca/starweb/geoscan/servlet.starweb?path=geoscan/download.web&search1=R=294675>



# Ressource solaire

## ANNUAL MEAN DAILY GLOBAL SOLAR RADIATION

MEGAJOULES PER  
SQUARE METRE (MJ·m<sup>-2</sup>)



CLIMATE STATION

Measured Data • ◦ Simulated Data

<https://geoscan.nrcan.gc.ca/starweb/geoscan/servlet.starweb?path=geoscan/download.web&search1=R=294675>

# Ressource solaire

## Notes and Definitions

**Solar Radiation:** Energy transmitted from the sun in the form of electromagnetic waves. *Global solar radiation* includes radiation received at the earth's surface by direct incidence and radiation received after scattering or diffuse reflection by atmospheric gas molecules, water vapour, and dust particles. In addition to direct and diffuse radiation, global solar radiation on inclined surfaces includes the component of radiation reflected from ground surfaces.

**Annual Mean Daily Global Solar Radiation:** The average of the daily global solar radiation values for the year.

**Annual Mean Daily Global Solar Radiation Variability:** The standard deviation of the annual mean daily global solar radiation—a measure of the inter-annual variation of annual mean daily global solar radiation values.

**Inclined Surfaces:** Data for solar radiation incident on inclined surfaces have been derived from measured and simulated horizontal radiation data using a numerical model. Inclined surfaces of 60° and 90° with a south orientation were selected because of their relevance to solar energy applications. 60° data are applicable to active solar energy systems that convert solar radiation into other energy forms. 90° data are relevant to passive energy systems that use solar radiation directly.

**Megajoule Per Square Metre (MJ·m<sup>-2</sup>):** The standard metric unit of radiation measurement. One joule (10<sup>-6</sup> megajoule) of radiant energy is equivalent to the work done by a force of one newton (kg·m·s<sup>-2</sup>) when the point at which the force is applied is displaced one metre in the direction of the force.

<https://geoscan.nrcan.gc.ca/starweb/geoscan/servlet.starweb?path=geoscan/download.web&search1=R=294675>

# Ressource solaire

- Les données pour le Canada sont disponibles pour les mois de juin et décembre, ainsi que pour avril et octobre.
- RETscreen incorpore les données du Canada.
- Une autre source: Solar Radiation Data Analyses for Canada 1967-1976, McKay, 1985

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- Le Soleil
- Le rayonnement solaire
- La ressource solaire
- ***Conclusion***

# Conclusion

- Le Soleil offre un potentiel énergétique exceptionnel mais réparti de manière hétérogène;
  - il est abondant aux endroits où le développement est le plus nécessaire de nos jours
- On peut considérer trois composantes du rayonnement solaire
  - Directe, réfléchie, diffuse;
  - Le rayonnement diffus est parfois réparti en différents types (isotrope, horizon, albedo, circumsolaire...)

# Références

- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1991. Solar Engineering of Thermal Processes. Wiley.
- International Energy Agency. Solar Energy Perspectives. 2011.  
<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name,34725,en.html>



**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

