

Ressource solaire et concentration du rayonnement

LABORATOIRE
PROCÉDÉS, MATÉRIAUX
et ENERGIE SOLAIRE

UPR 8521 du CNRS.
conventionnée avec
l'université de Perpignan

PROCESSES, MATERIALS
and SOLAR ENERGY
LABORATORY



Master ER&S
2015
Université
Mohammed V

**FLAMANT
Gilles**

Directeur
PROMES-CNRS

Gilles.flamant@promes.cnrs.fr





Sommaire

RESSOURCE SOLAIRE

- Eclairement solaire sur terre
- Les différentes mesures de la ressource
- Ressource en rayonnement direct

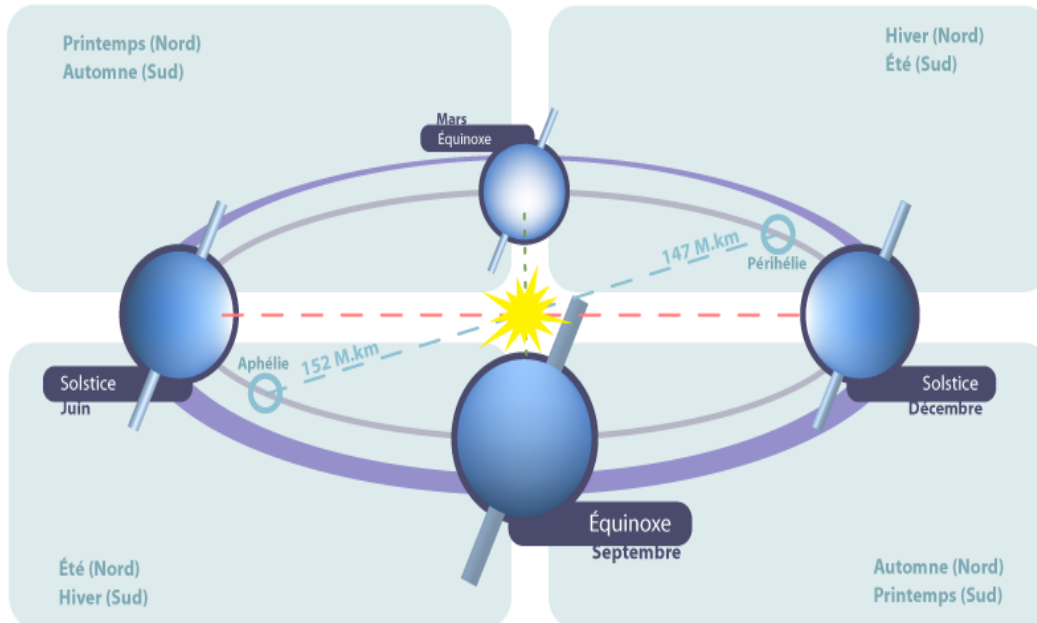
CONCENTRATION

- Définition
- Concentration maximale théorique
- Miroirs (défauts et erreurs)
- Logiciels



La ressource solaire sur terre

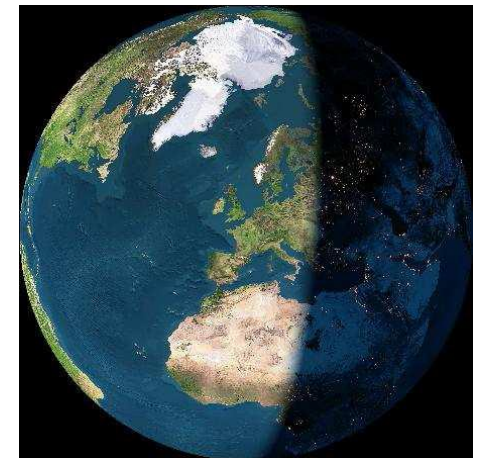
Terre/Soleil



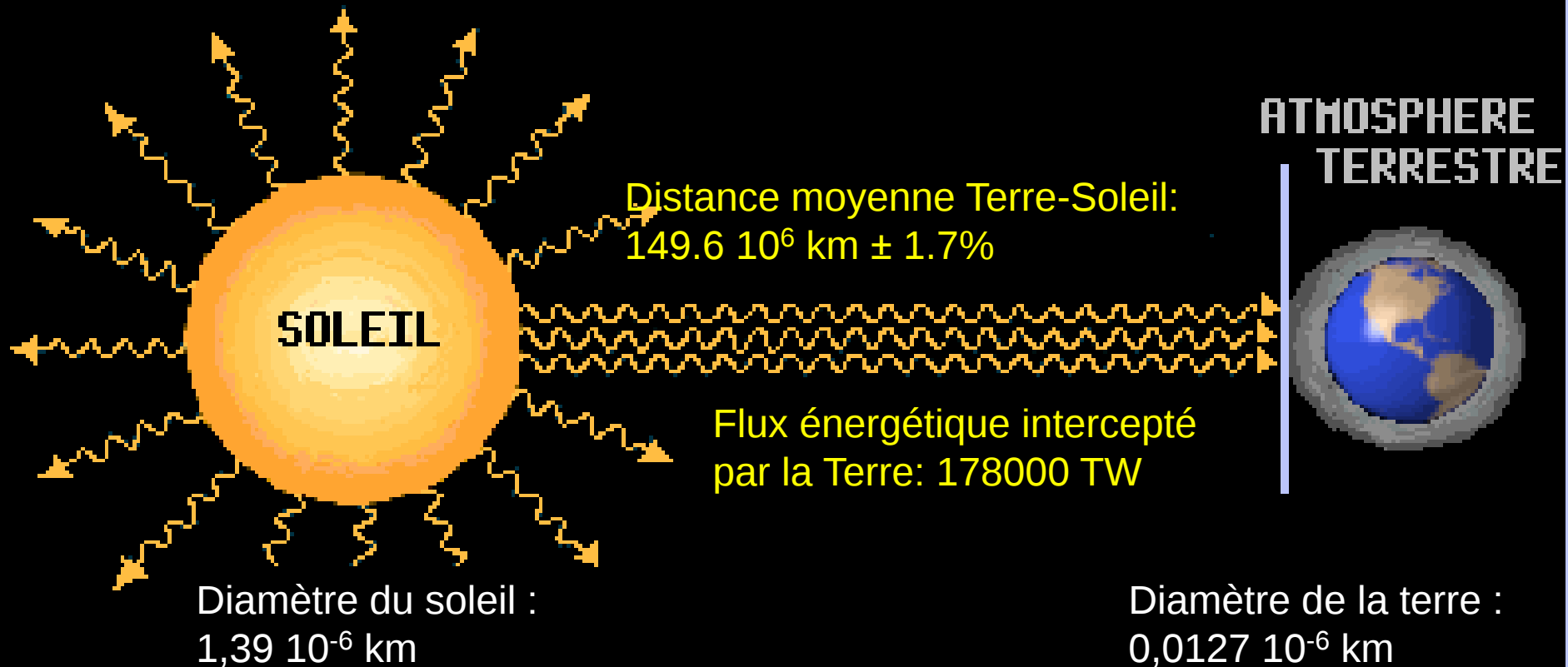
Hémisphère Nord

- 365.25 jours, orbite elliptique
- Solstice hivers : 21-12 : le + court
- Solstice été : 22-06 : le + long
- Equinoxe : 12h-12h (lever plein E-coucher plein O), 21-03, 21-09

Angle normal-axe de rotation de 23.27° à l'origine de la durée des jours et des nuits, des climats...



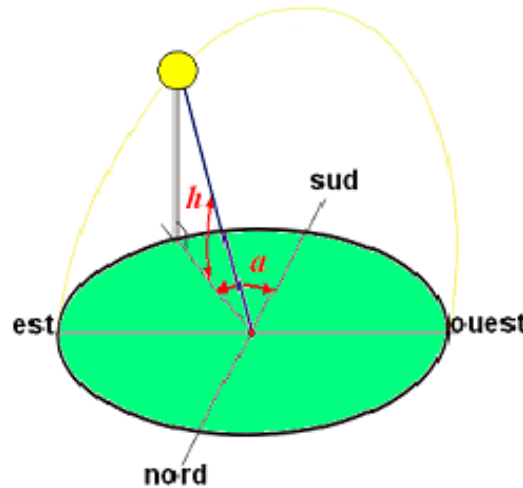
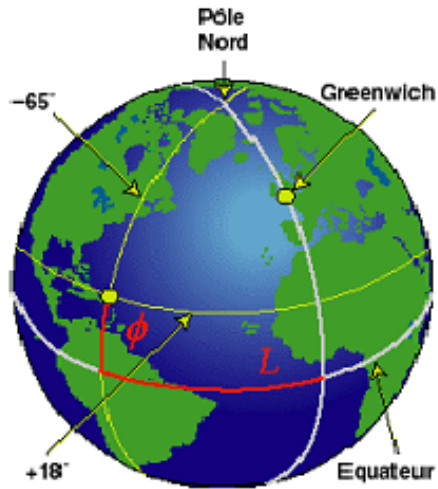
Terre/Soleil



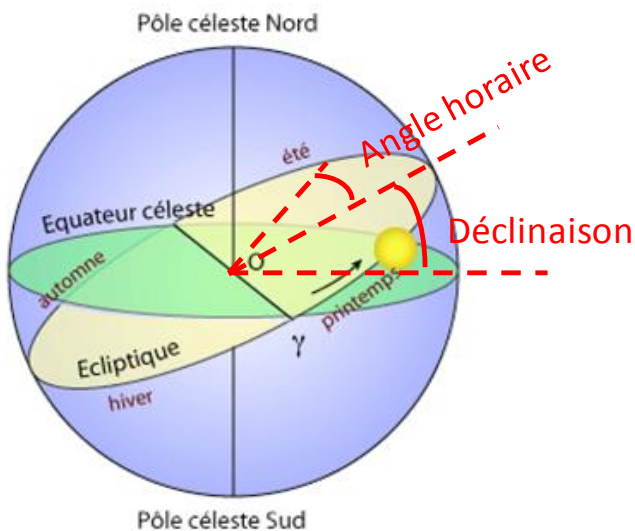
Puissance moyenne reçue à l'entrée de l'atmosphère :
Constante solaire moyenne : 1353 W.m^{-2}

Terre/Soleil

Site terrestre : Latitude, Longitude



- Angles en coordonnées sphériques
- Azimut (a) + Elevation (h)



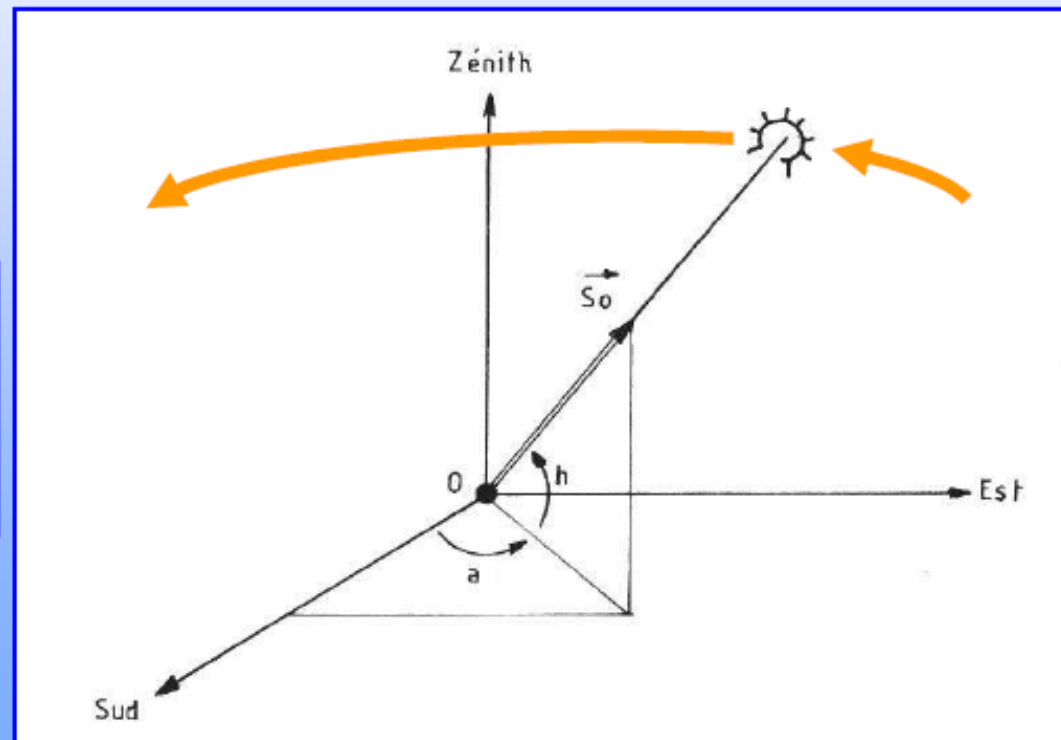
- La déclinaison : -23.45 à $+23.45$
- L'angle horaire : $0-360^\circ$

Terre/Soleil

Position du soleil dans le ciel

- Elle est définie par deux angles en hauteur (h) et en azimut (a) qui dépendent de la localisation géographique du lieu d'observation

$$\vec{S}_0 \begin{cases} \cos a \cos h \\ \sin a \cos h \\ \sin h \end{cases}$$



Terre/Soleil

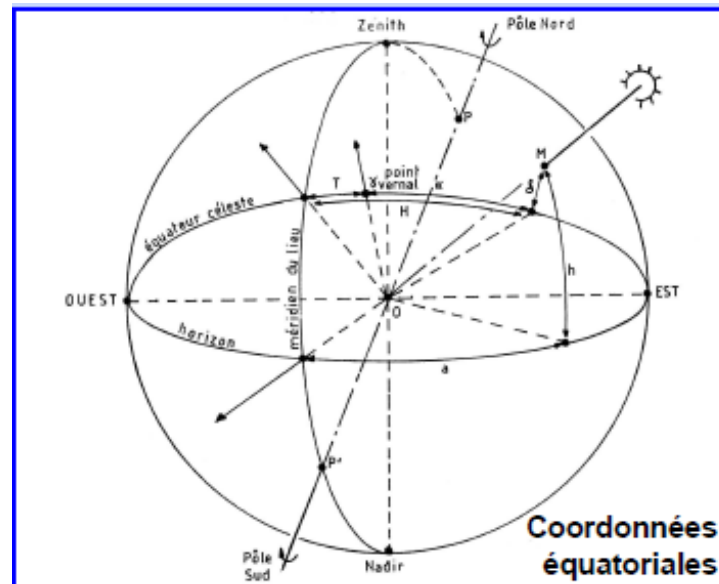
Azimut et Elévation

- Les angles a et h sont calculés par des relations astronomiques classiques:

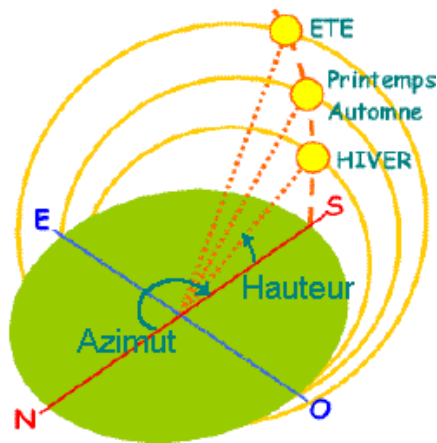
$$\begin{aligned} - \sin(h) &= \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\alpha - T) \\ - \sin(a) &= \cos(\delta) \sin(\alpha - T) / \cos(h) \end{aligned}$$

ϕ Latitude géographique
 δ Déclinaison céleste
 α Ascension droite
 T Temps Sidéral

- Mais il faut y introduire de nombreuses corrections: précession des équinoxes, nutation, réfraction atmosphérique, effets relativistes...



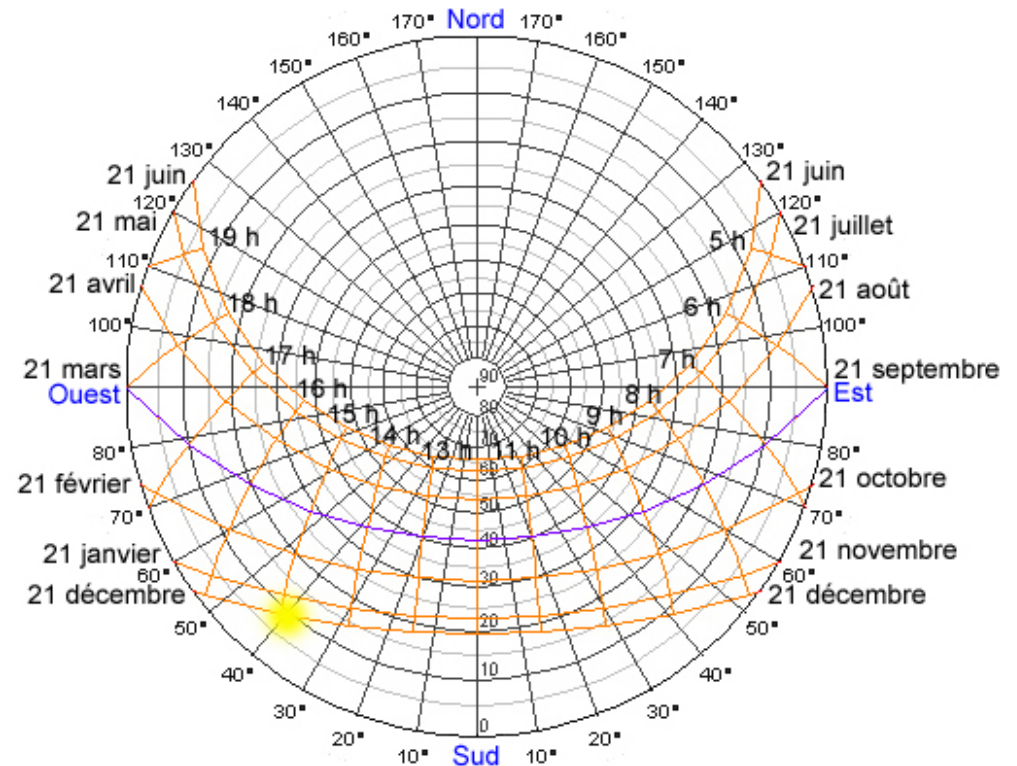
Terre/Soleil



Exemple le 21 décembre à 15h :

- Hauteur du soleil = 10°
- Azimut = 40° ouest

Diagramme valable pour un point du globe
Cercles concentriques = hauteur solaire
Rayons = azimut solaire



Terre/Soleil

Atténuation atmosphérique du rayonnement

- Absorption H_2O : 10%
 - Absorption autres : 6%
 - Diffusion par les molécules et les particules
- composante directe et diffuse du rayonnement solaire : $E_G = E_{dir} + E_{dif}$

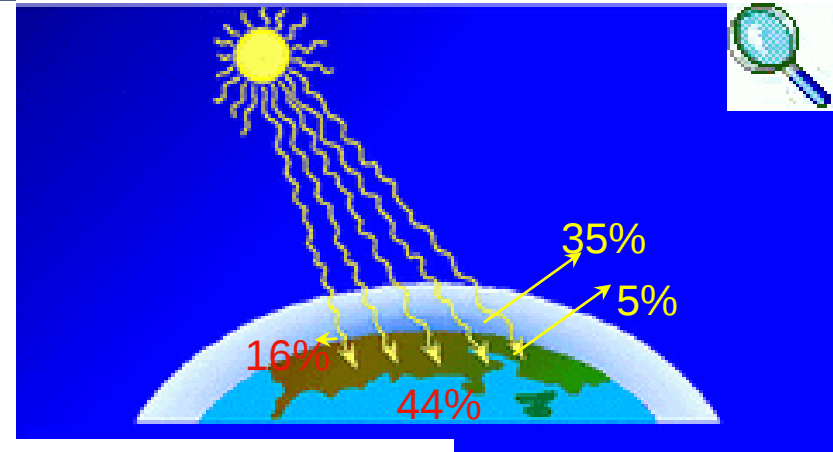
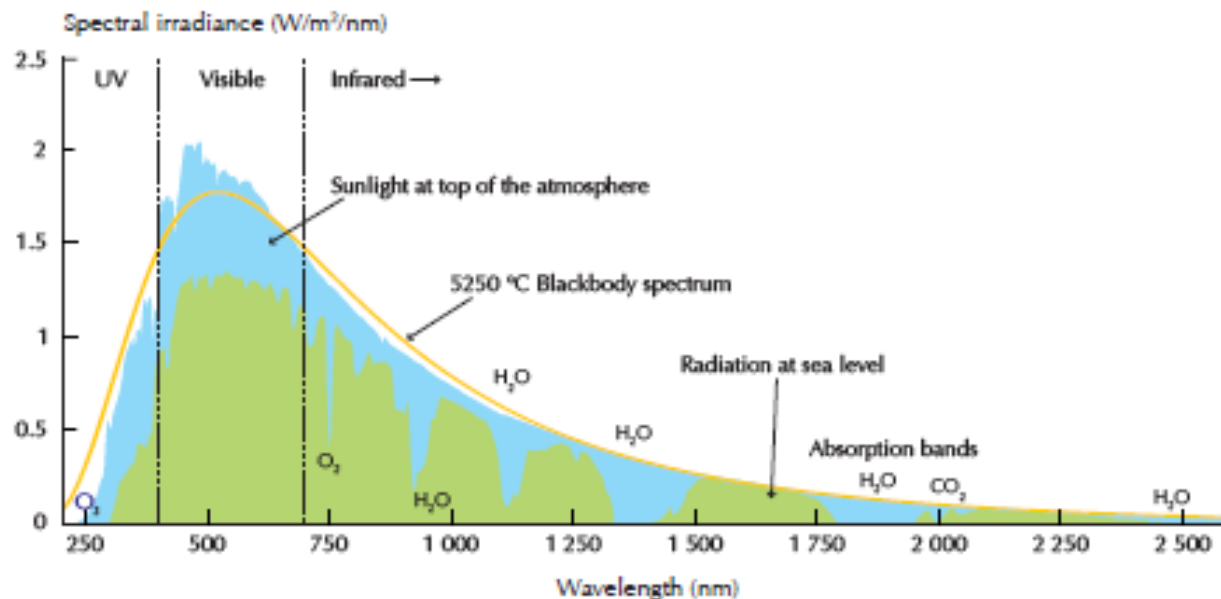
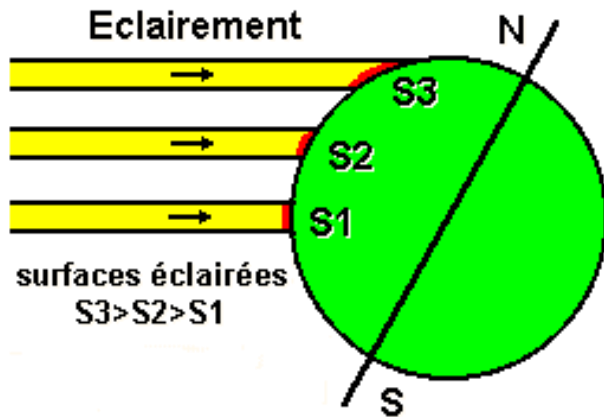


Figure 2.6 Solar radiation spectrum at the top of the atmosphere and at sea level

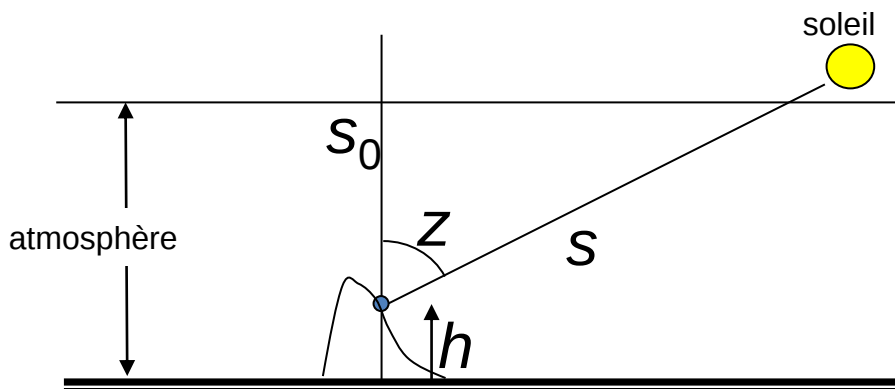


Terre/Soleil

Inclinaison/Atténuation

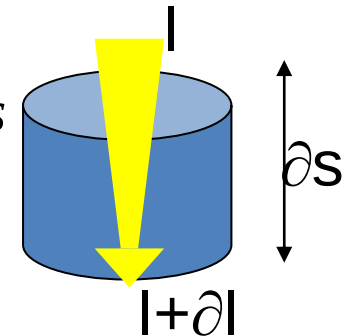


Même puissance répartie sur une plus grande surface



$$\partial I = -\kappa I \partial s$$

$$I = I_0 e^{-\kappa s}$$

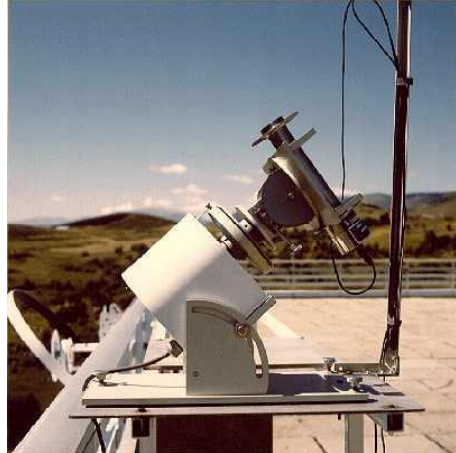


Flux solaire direct normal:

$$I(z, h) = I_0 (1 - ah) e^{-0,357 S^{0,678}} + ah I_0$$

$$a = 0,14 \text{ km}^{-1}$$

Mesure du rayonnement incident



Pyrhéliomètre → direct normal
ouverture $5^{\circ} 43'$ (disque solaire + circumsolaire)
domaine spectral: $0,3 - 4 \mu\text{m}$

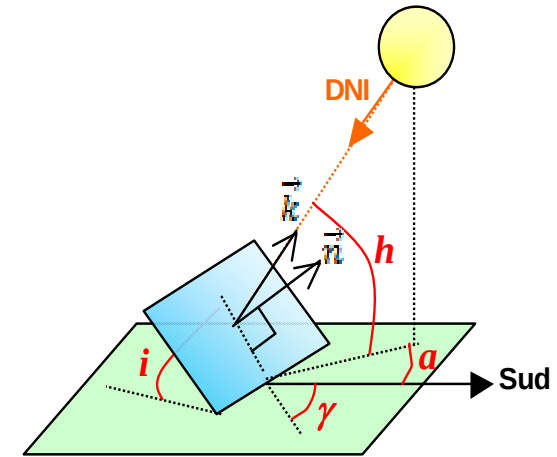
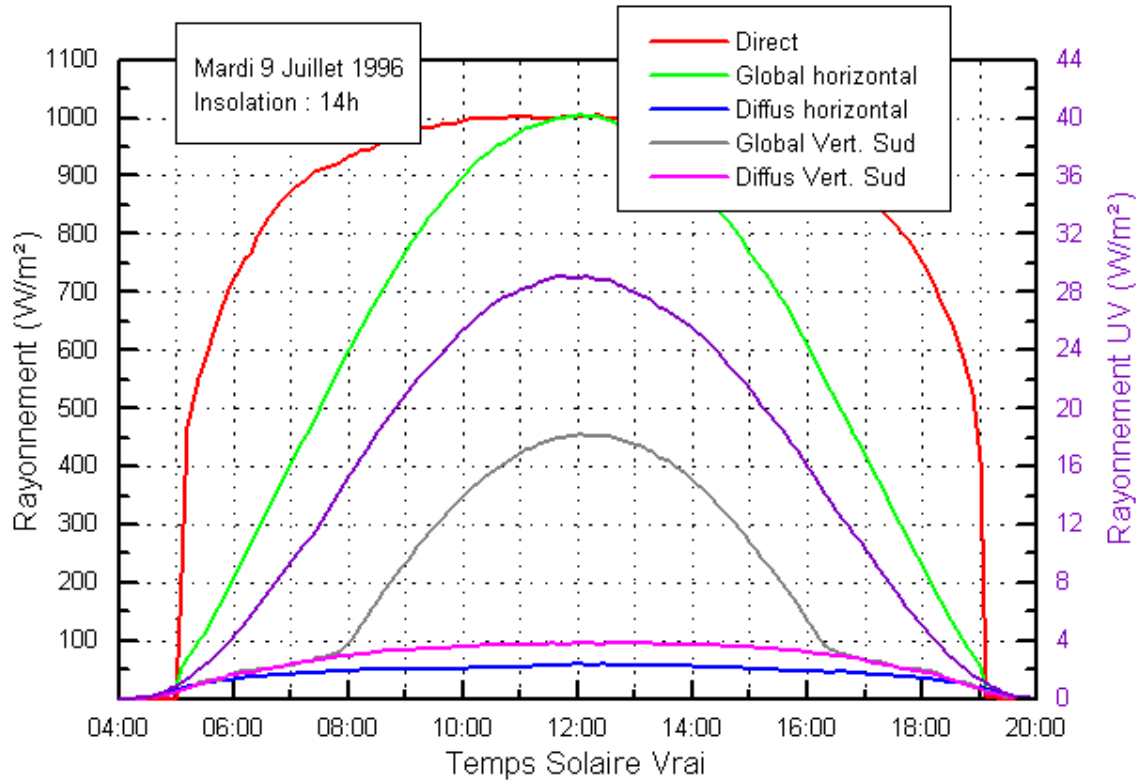


**Pyranomètre → global horizontal ou
diffus horizontal**
domaine spectral: $0,3 - 2,8 \mu\text{m}$

Pyrgéomètre → rayonnement IR
domaine spectral: $3,5 - 100 \mu\text{m}$

**Données satellites
(Global Irradiation System)**

Mesure du rayonnement



$$Global = DNI \cdot \vec{k} \cdot \vec{n} + Diffus$$

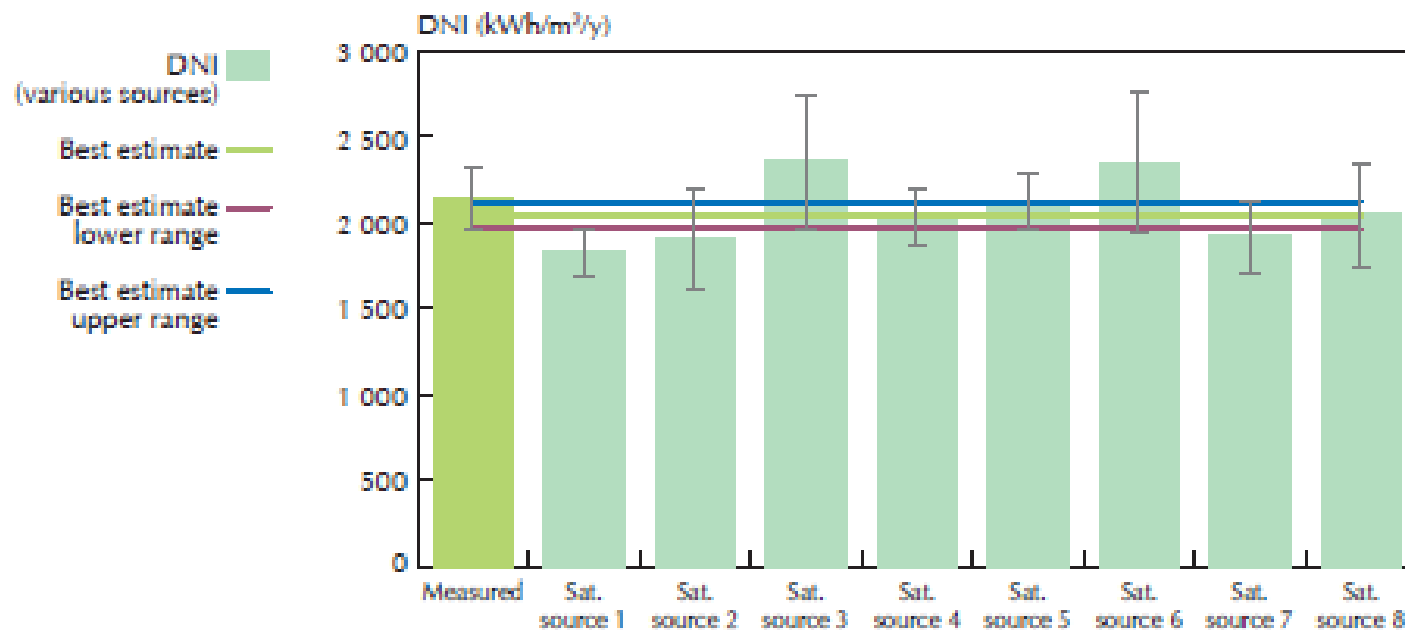
Effet cosinus

- FAIRE TRES ATTENTION AUX DONNEES
- Exemple : L'ensoleillement direct est supérieur au global horizontal !
- DNI : Direct NORMAL Irradiance, GHI : Global HORIZONTAL Irradiance

Mesure du rayonnement

Satellite / Mesures au sol

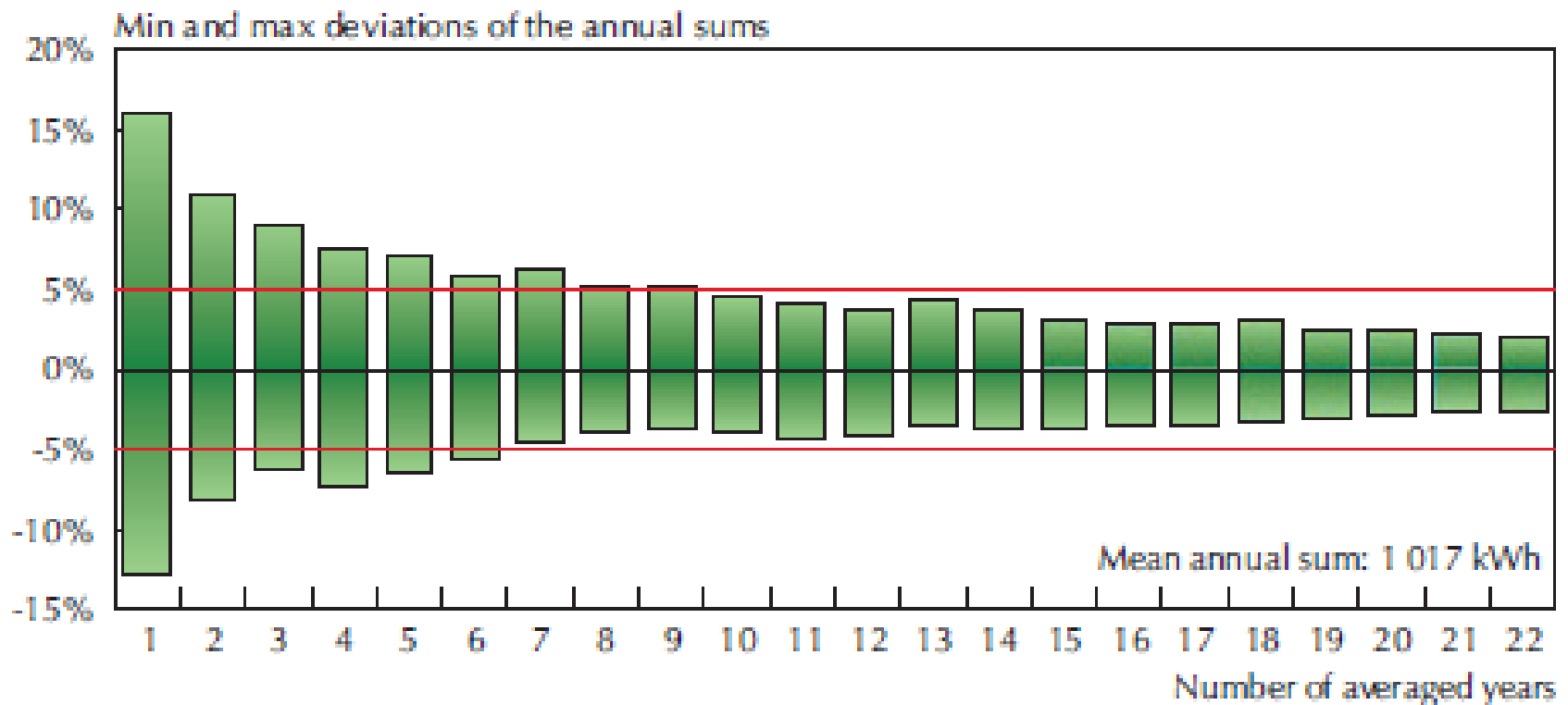
Figure 2.12 Comparison of satellite data sources with best estimate from on-ground measurement



➤ Mesures au sol indispensables

Mesure du rayonnement

Année type



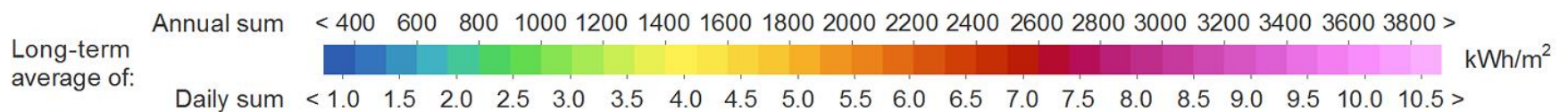
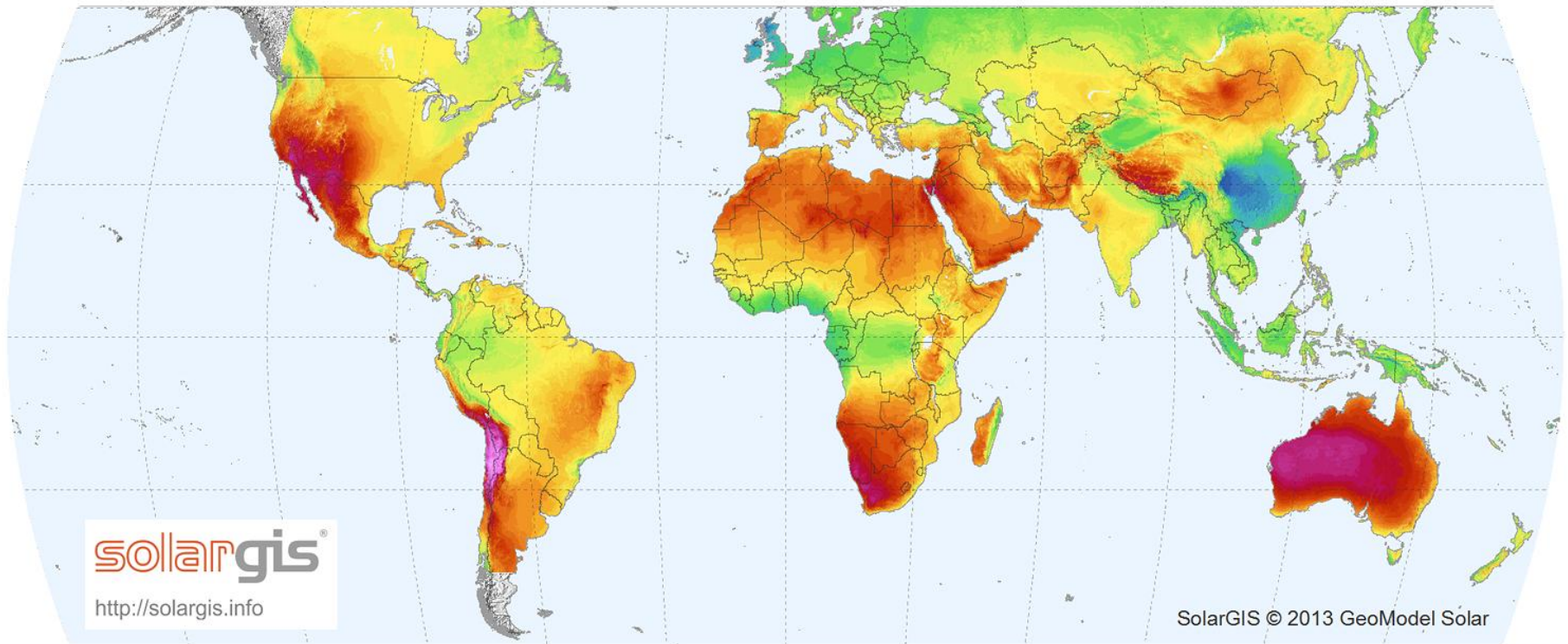
➤ Mesures sur de longues périodes pour obtenir une valeur moyenne

Ressources

DNI

WORLD MAP OF DIRECT NORMAL IRRADIATION

GeoModel
SOLAR



Ressources

DNI

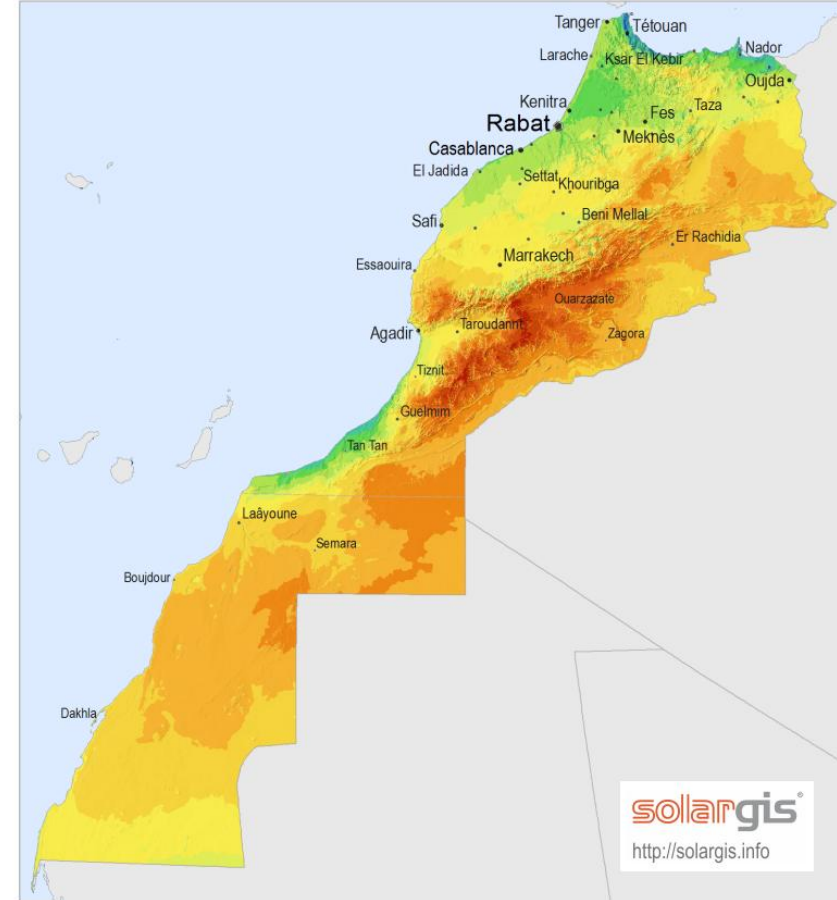
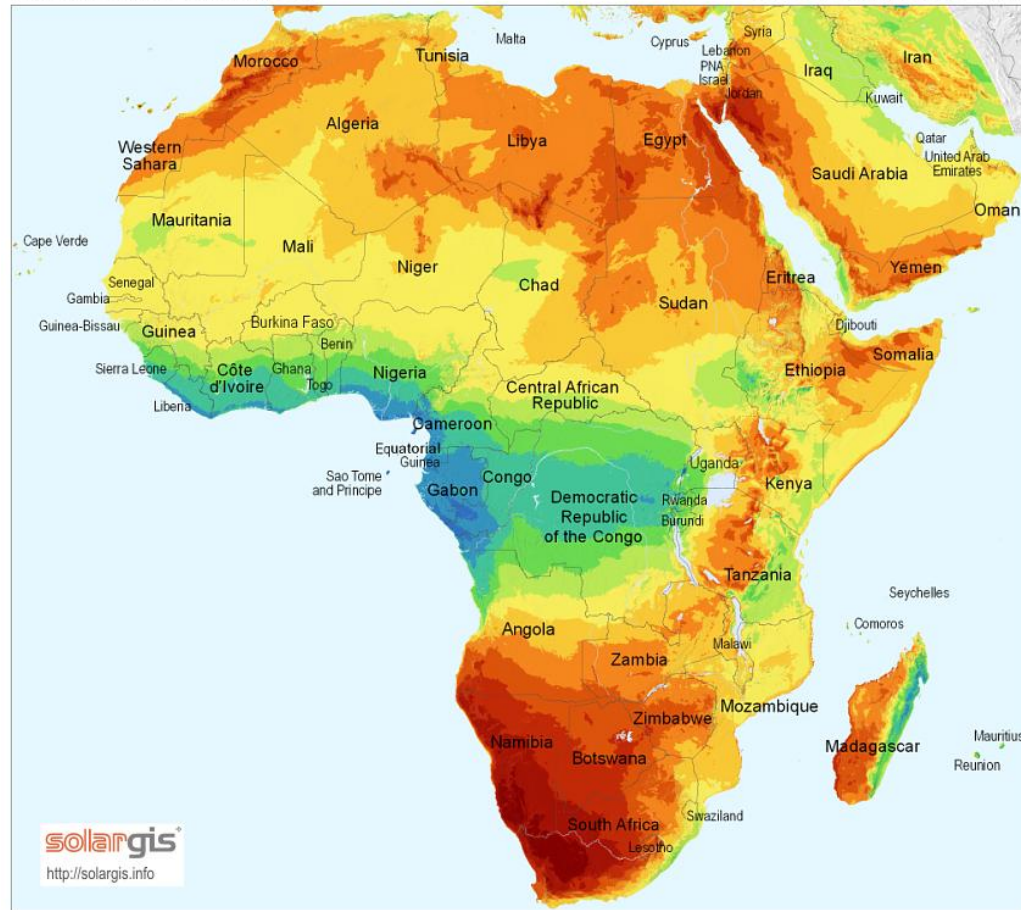


Direct Normal Irradiation

Africa and Middle East

Direct Normal Irradiation

Morocco



Average annual sum (4/2004 - 3/2010)
 < 800 1200 1600 2000 2400 2800 > kWh/m²

0 500 1000 km

© 2011 GeoModel Solar s.r.o.

Average annual sum, period 1994-2010
 < 1500 1700 1900 2100 2300 2500 2700 > kWh/m²

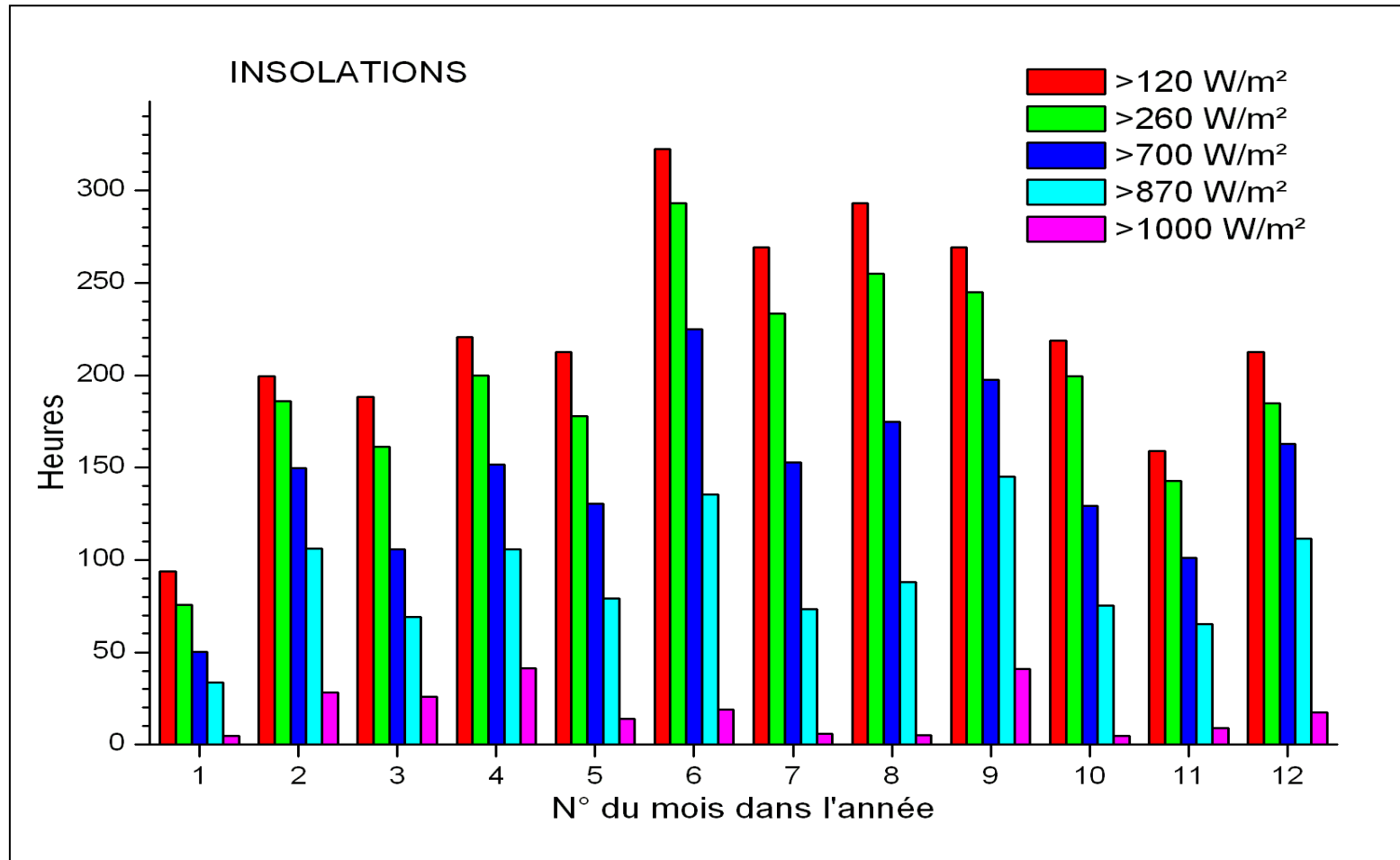
0 100 200 km

SolarGIS © 2013 GeoModel Solar



Ressources DNI

Répartition par seuils



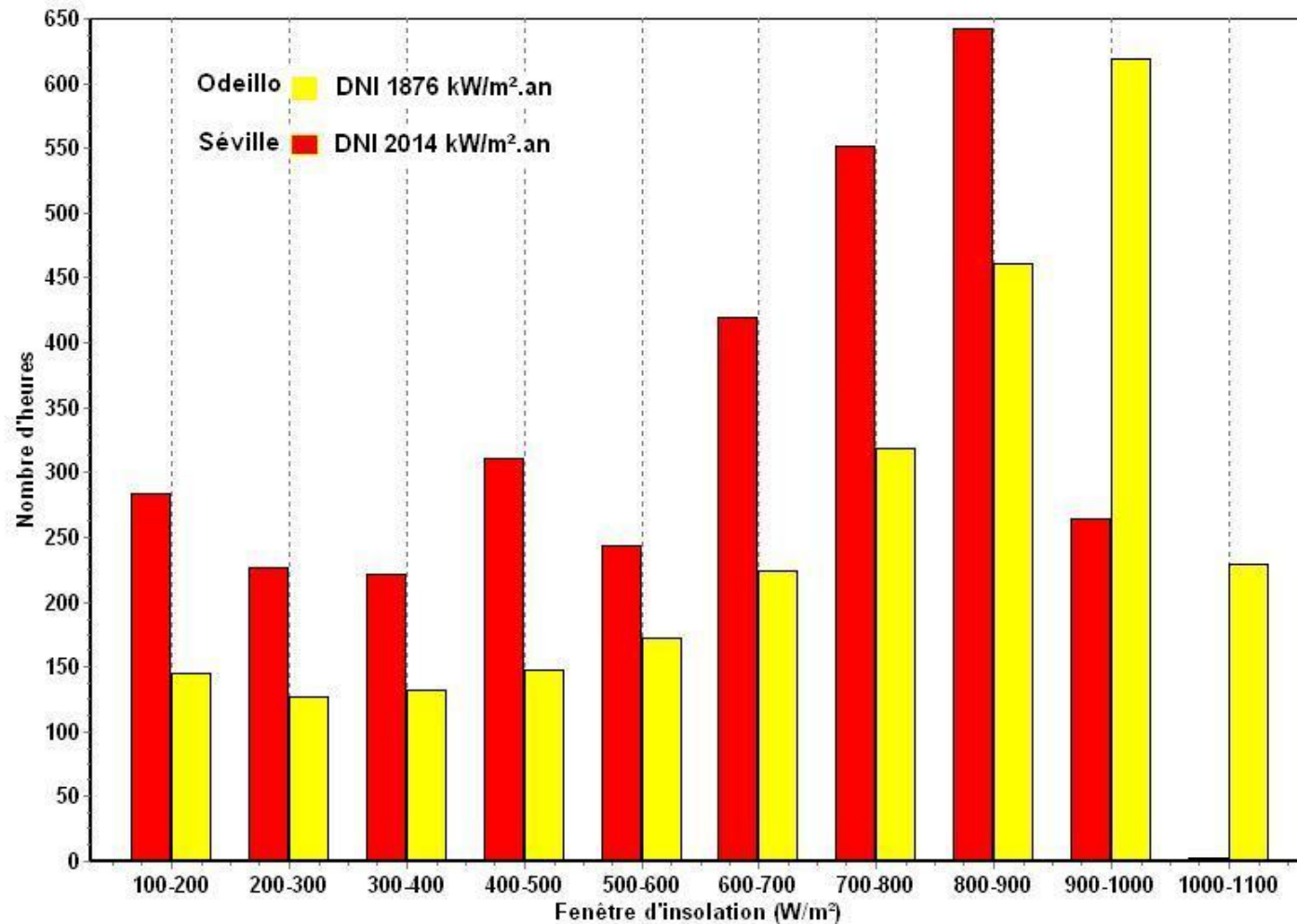
Odeillo, 2001

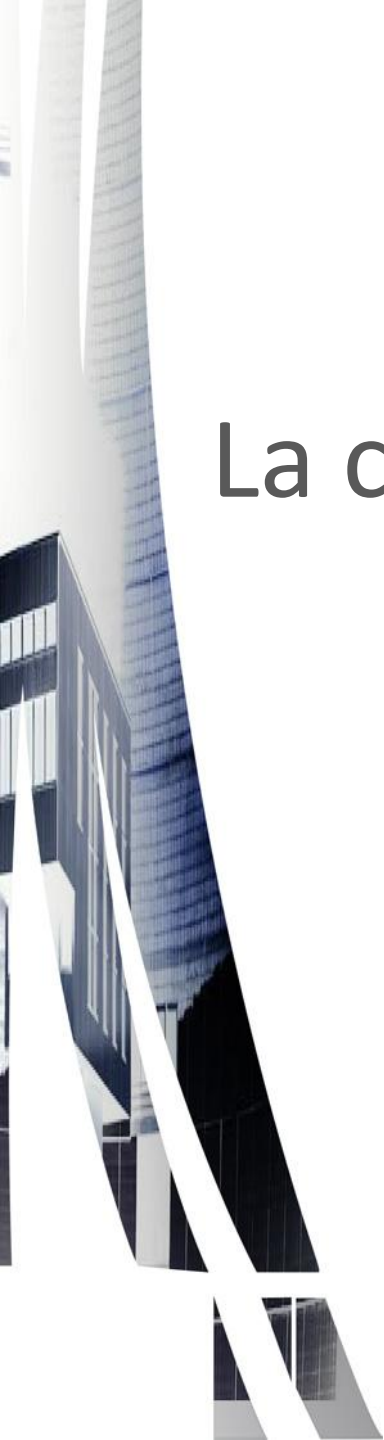


Ressources DNI

Répartition par seuils

Important pour le dimensionnement





La concentration du rayonnement solaire

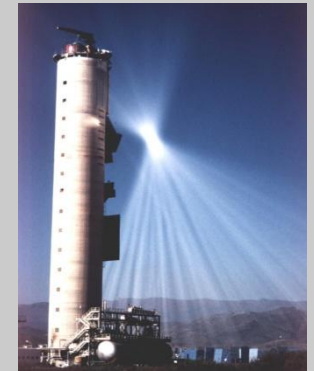
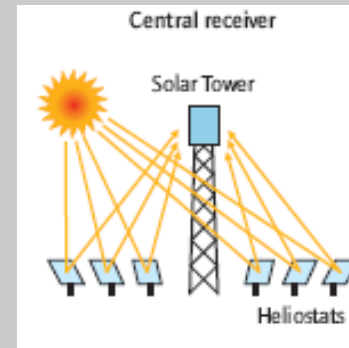
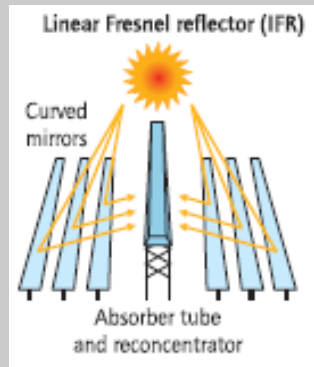
Technologies de concentration

**Concentration
Réception**

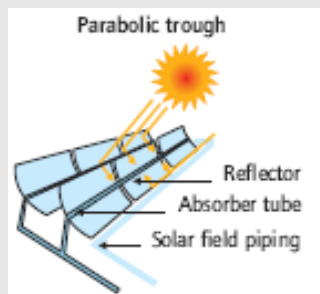
Linéaire (30-100 soleils)
300°C-500°C

Ponctuelle (500-10 000 soleils)
500°C-1500°C

Fixe



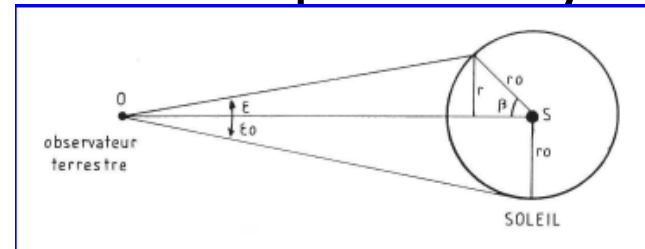
Mobile



Eclairement solaire

- Le soleil nous apparait comme un disque de rayon angulaire:

$$\varepsilon_0 = 16 \pm 0.3 \text{ minutes d'arc}$$



- L'éclairement solaire reçu au niveau de la terre s'écrit:

$$E_0 = 2\pi L_0 \int_0^{\varepsilon_0} \sin \varepsilon \cos \varepsilon d\varepsilon = \pi L_0 \sin^2 \varepsilon_0 \approx \pi L_0 \varepsilon_0^2$$

E_0	Eclairement solaire
L_0	Luminance solaire (supposée uniforme)
ε_0	Rayon angulaire du Soleil

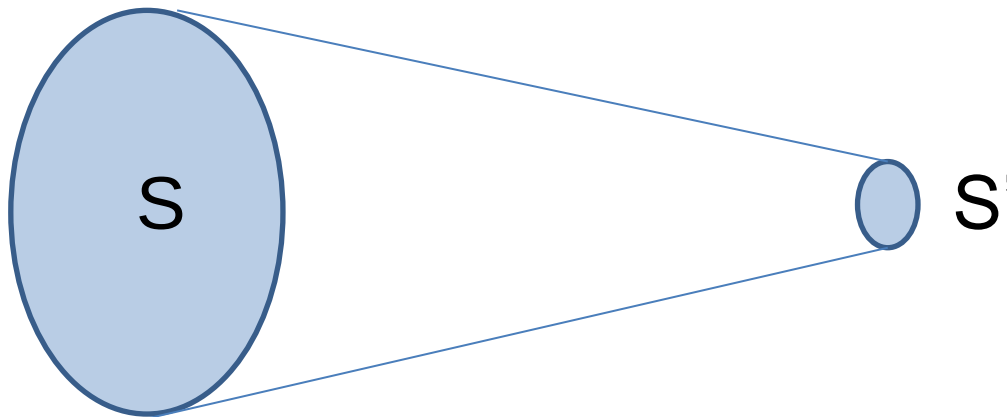
E_0 (spatial)	1350 W/m²
L_0 (spatial)	1.98E+7 W/m²/sr
E_0 (au sol)	1000 W/m²
L_0 (au sol)	1.47E+7 W/m²/sr

$$L_\lambda = \frac{2hc_\lambda^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc_\lambda}{k\lambda T}\right) - 1}$$

Concentration : Définition

- Le facteur de concentration moyen C peut être défini comme le rapport des surfaces collectrice S et réceptrice S' :

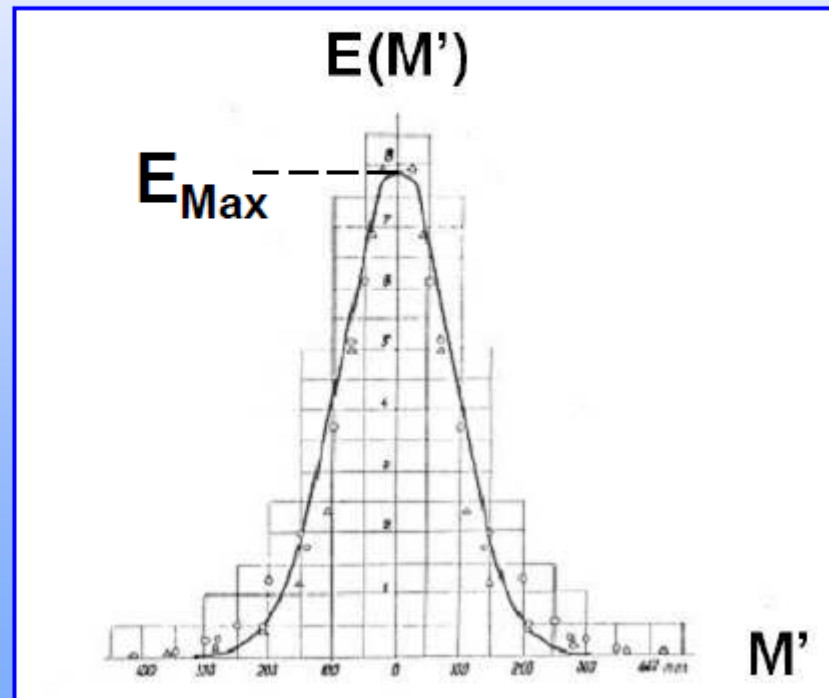
$$C = S/S'$$



Concentration : Définition

- En réalité, le facteur de concentration C est proportionnel à l'éclairement $E(M')$, variable en fonction de la position du point d'observation M' dans le volume focal
- Il est préférable de définir C comme le rapport de l'éclairement maximal dans le volume focal E_{Max} à la constante solaire E_0

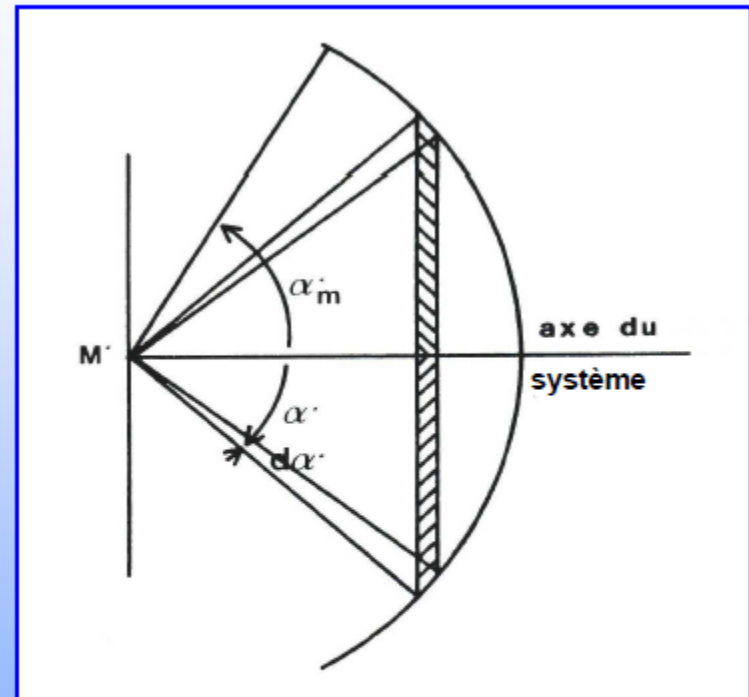
$$C = E_{\text{Max}} / E_0$$



Concentration Maximale

Paraboloïde de révolution

- Calculons E_{Max} au foyer d'un système concentrateur d'énergie solaire d'ouverture angulaire α'_m (sans tenir compte du facteur T_A puisqu'il s'élimine dans l'expression finale de C)



$$E_{\text{Max}} = 2\pi L_0 \int_0^{\alpha'_m} \sin \alpha' \cos \alpha' d\alpha' = \pi L_0 \sin^2 \alpha'_m$$



Concentration Maximale

- Ce qui nous donne finalement:

$$C \approx \sin^2 \alpha'_m / \varepsilon_0^2$$

- Application numérique: Avec $\varepsilon_0 = 16$ minutes d'arc et une ouverture maximale $\alpha'_m = 90$ degrés, on obtient:

$$C \approx 46200 \text{ Soleils}$$

F. Trombe, A. Le Phat Vinh, in *Cahiers de l'AFEDES* n°3 (1971)

- Généralisons la formule en appliquant la loi de conservation de l'étendue géométrique:

$$C \approx n^2 \sin^2 \alpha'_m / \varepsilon_0^2$$

où n est l'indice de réfraction du milieu image

Welford & Winston, *The optics of non imaging concentrators* (1978)

Concentration/ Température maximales

- La loi de Stefan-Boltzmann permet d'associer la température T d'un corps noir (ou gris) à l'éclairement reçu:

$$\sigma T^4 = \varepsilon E_{\text{Max}} = \varepsilon C E_0$$

où ε est l'émissivité du corps gris ($\varepsilon = 1$ pour un corps noir)
et σ la constante de Stefan-Boltzmann égale à $5.67 \cdot 10^{-8}$
 $\text{W/m}^2/\text{K}^4$

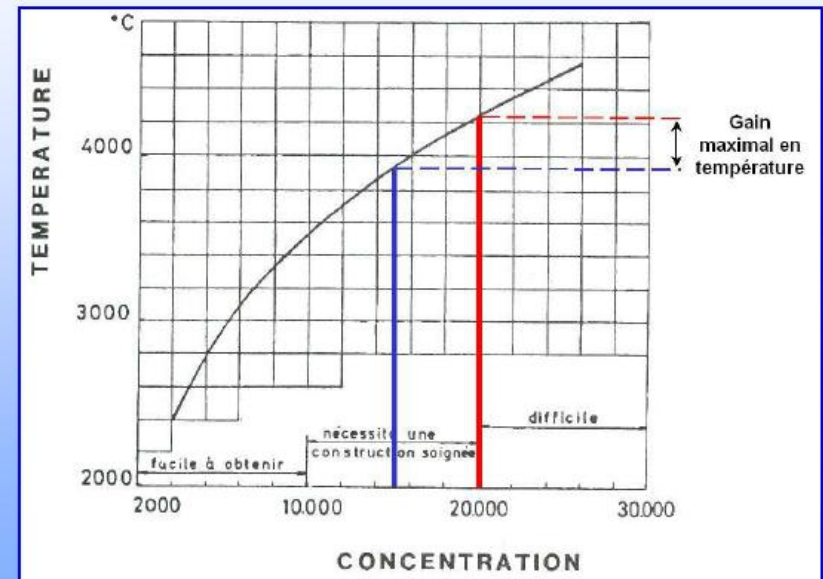
- On en déduit la température maximale atteignable au foyer d'un concentrateur solaire:

$$T = \sqrt[4]{\frac{\varepsilon C E_0}{\sigma}}$$

Concentration/ Température maximales

Émissivité $\varepsilon = 1$

Facteur de concentration	T (K)	T (°C)
0	0	-273
1	364	91
2	433	160
5	545	272
10	648	375
20	771	498
50	969	696
100	1152	879
200	1370	1097
500	1723	1450
1000	2049	1776
2000	2437	2164
5000	3064	2791
10000	3644	3371
20000	4334	4061
50000	5449	5176



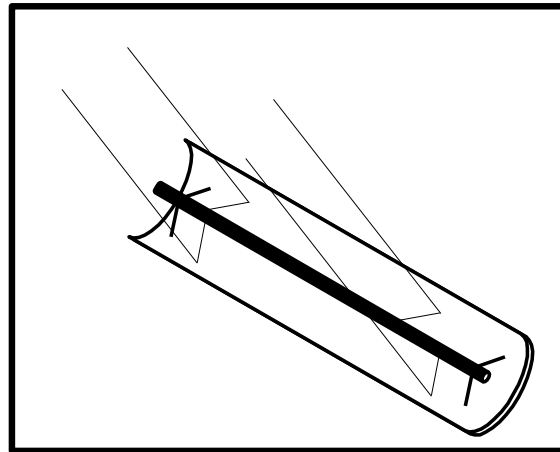
F. Trombe, A. Le Phat Vinh, in *Cahiers de l'AFEDES* n°3 (1971)



Concentration Maximale

Cylindro-parabolique

$$C_m = \sin \alpha / \varepsilon_o$$



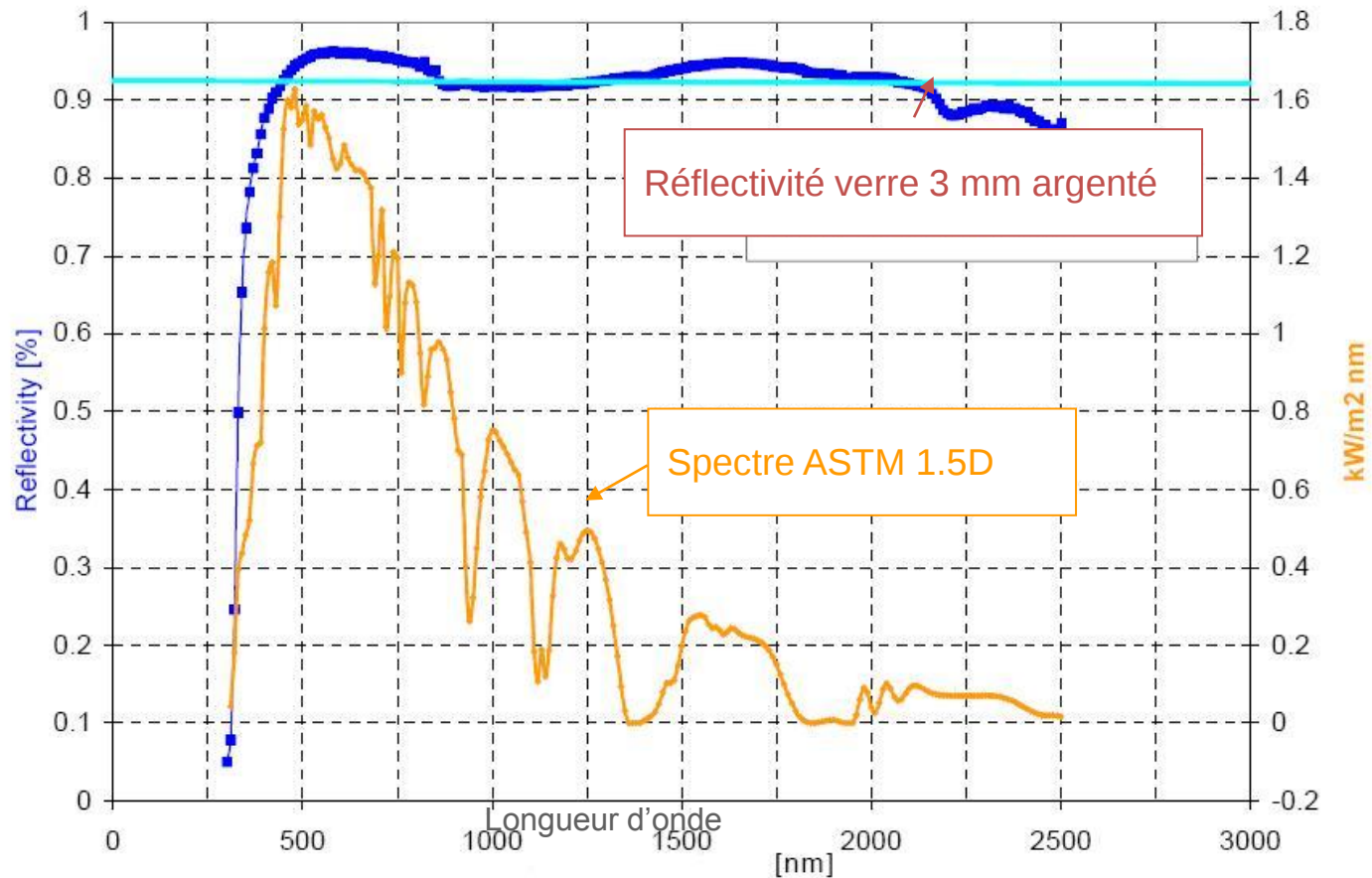
Pour $\alpha = \pi/2$

$C_g = 1/0,00465 = 215$, concentration maximale pour un CP



Miroirs

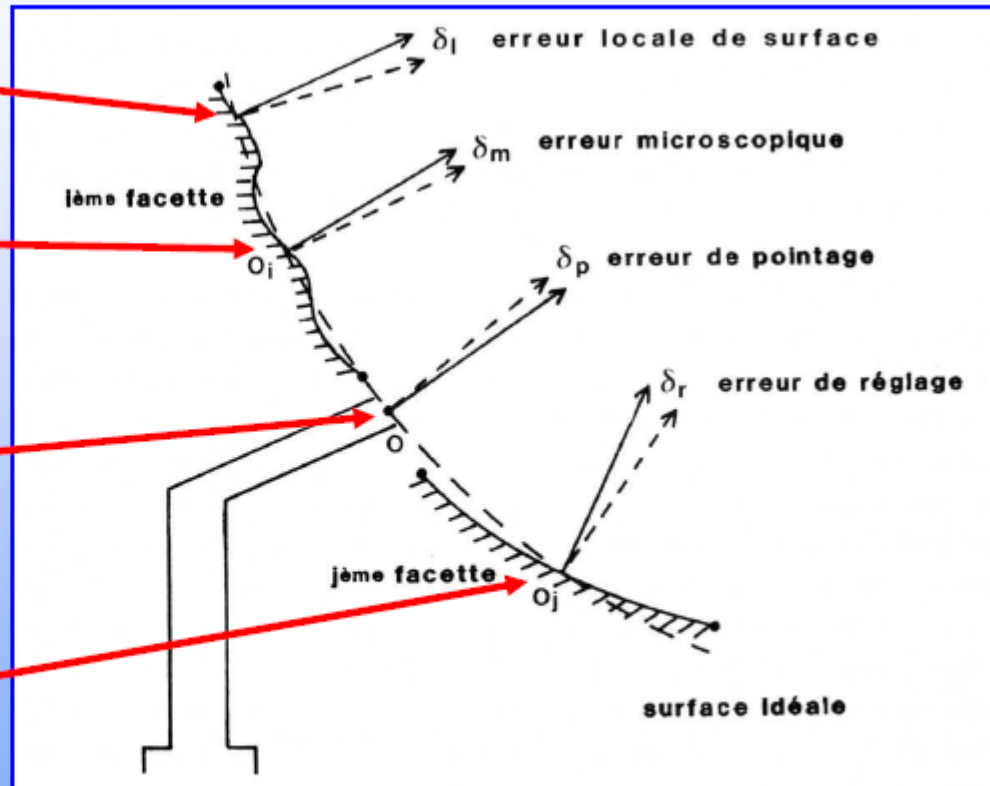
Réflectivité



Miroirs

Défauts / Erreurs

- δ_l erreurs locales de surface
- δ_m erreurs microscopiques de surface (rugosité)
- δ_p erreur de pointage global d'un héliostat
- δ_r erreur de réglage d'un segment ou module individuel



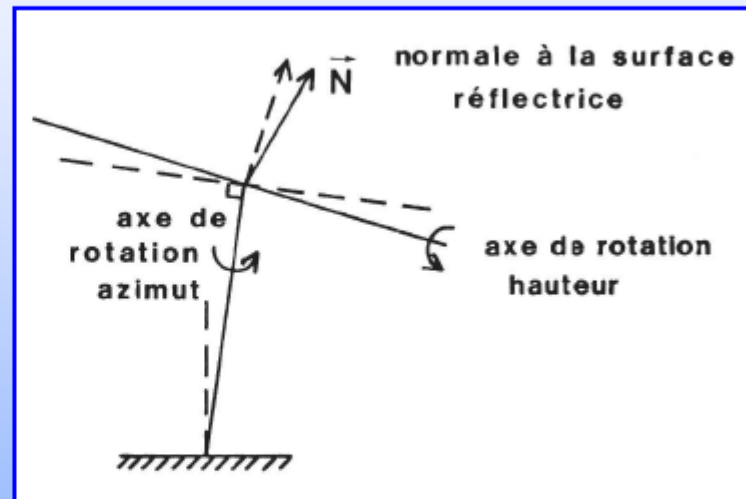
Note: Les erreurs microscopiques δ_m produisent essentiellement de la diffusion et sont comptées dans le facteur de réflexion global

Miroirs

Erreurs de pointage

- Cas typique d'une monture altazimutale pilotée en boucle ouverte avec diverses causes d'erreurs

- Incertitude géométrie Soleil / héliostat / chaudière
- Verticalité de l'axe de rotation Az
- Perpendicularité des axes Alt-Az
- Précision des codeurs

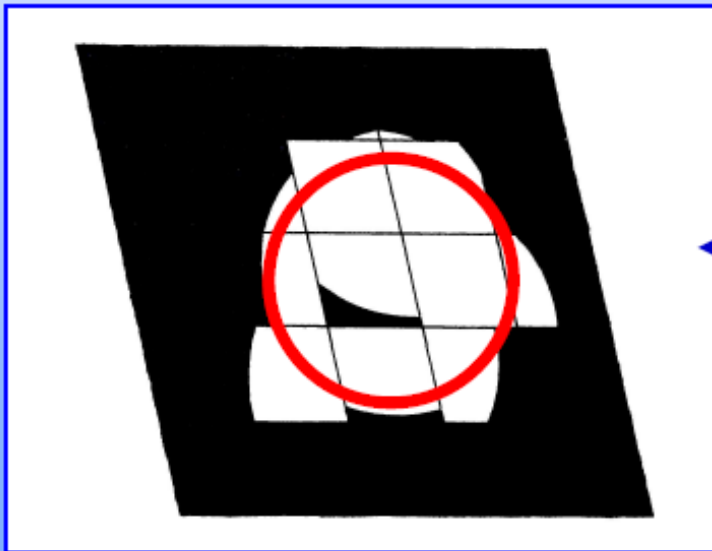


- Certaines de ces erreurs peuvent être compensées par le pilotage informatique
- Au niveau d'un champ d'héliostats complet, ces défauts sont de **nature statistique**

Miroirs

Erreurs de réglage

- Erreurs d'alignement entre les différentes facettes ou modules d'un héliostat ou d'un système concentrateur complet
- Il s'agit essentiellement d'erreurs en orientation (les défauts de positionnement suivant les axes X, Y et Z ont une influence négligeable sur le facteur de concentration C)
- Défauts de **nature statistique** →
 - Résultent essentiellement des procédures de réglage au niveau héliostat ou concentrateur
 - Effets de vieillissement possibles (alternances hivers/étés, vents...)



Petite illustration pédagogique

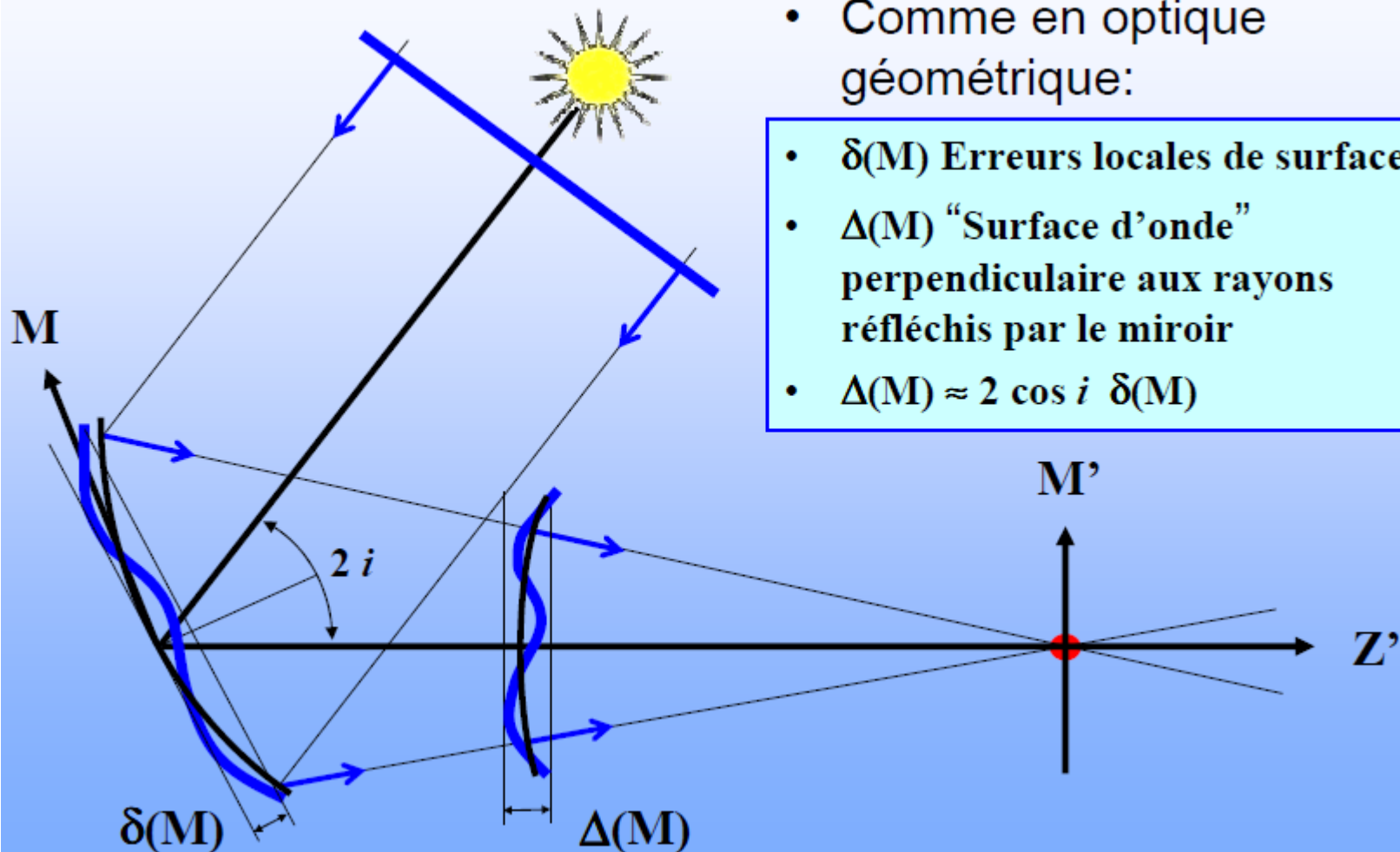
L'image du soleil vue à travers un héliostat plan correctement réglé serait délimitée par le cercle rouge. En présence de dérèglages, elle en déborde visiblement

Miroirs

Erreurs de surface

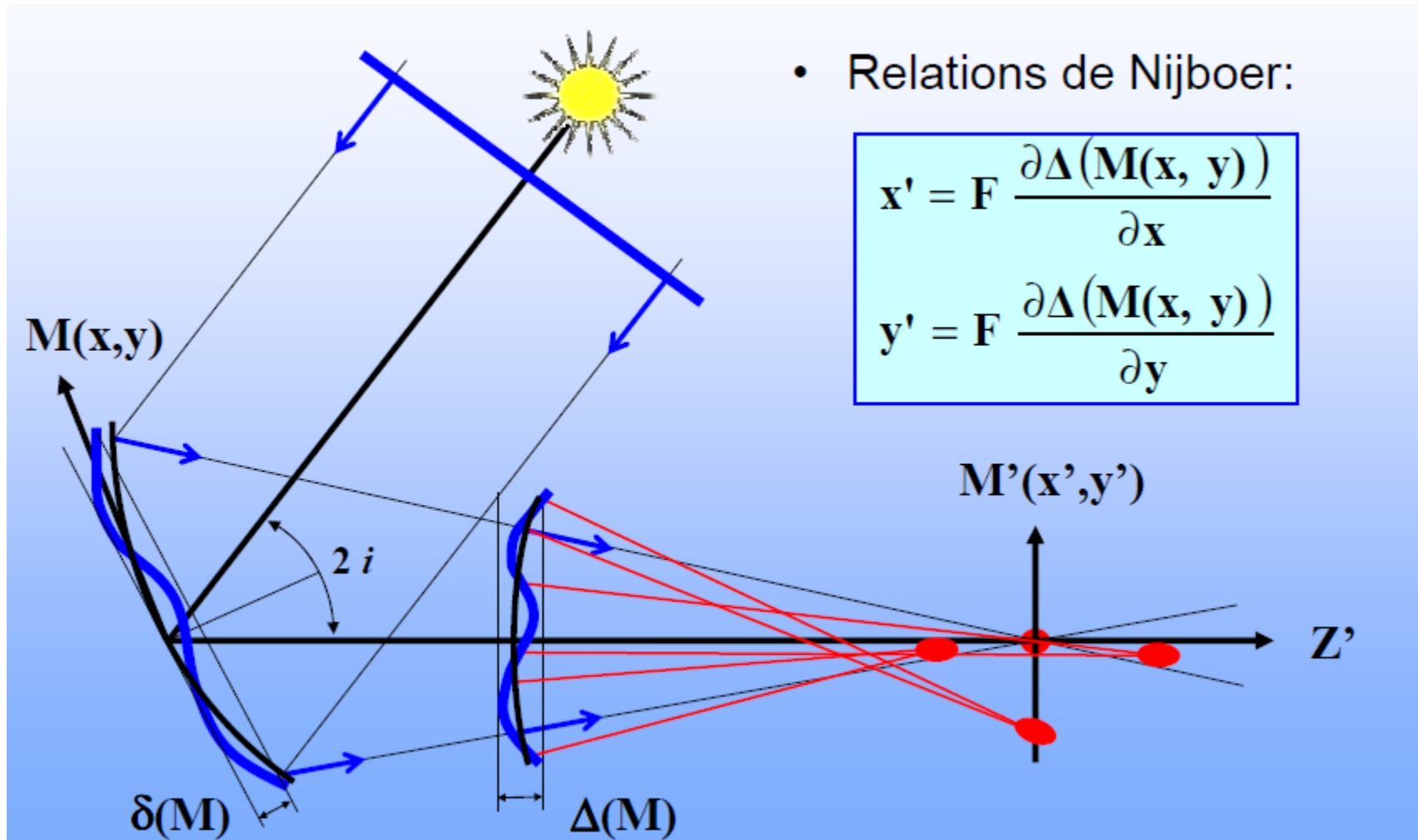
- Comme en optique géométrique:

- $\delta(M)$ Erreurs locales de surface
- $\Delta(M)$ "Surface d'onde" perpendiculaire aux rayons réfléchis par le miroir
- $\Delta(M) \approx 2 \cos i \delta(M)$



Miroirs

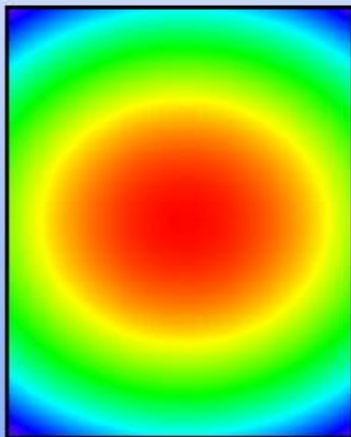
Erreurs de surface



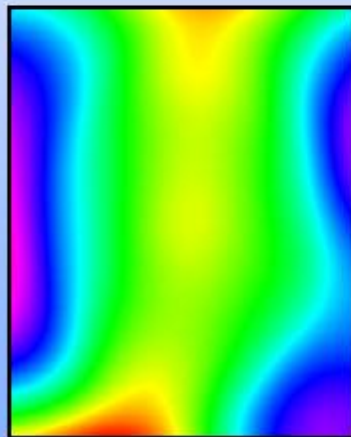
Miroirs

Erreurs de surface

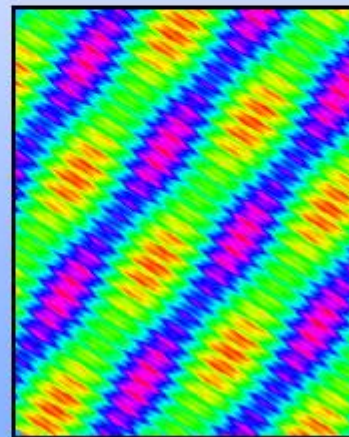
- En dépit des échelles extrêmement différentes (erreurs de l'ordre du mm), les miroirs des concentrateurs solaires suivent les lois de l'optique géométrique "classique"
- Certains types de défauts sont identiques (defocus, astigmatisme), mais ils présentent en plus de fortes erreurs aléatoires
- Toutes ces erreurs peuvent varier considérablement d'un miroir à l'autre, d'où finalement un comportement globalement statistique



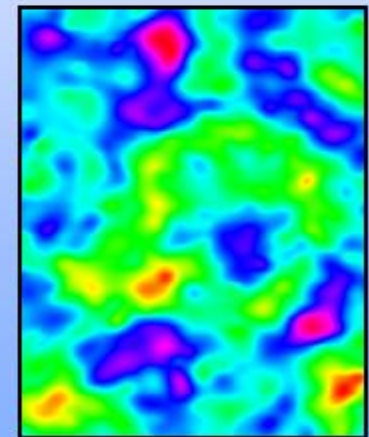
Erreur de courbure
(defocus)



Déformations d'ordre
modéré: astigmatisme...



Défauts périodiques
(tôle ondulée)



Erreurs
aléatoires

Miroirs

Perte de concentration
due aux erreurs et
défauts

Avec

$$\eta = \frac{C}{C_0} = \frac{1}{1 + \delta^2 / \varepsilon_0^2}$$

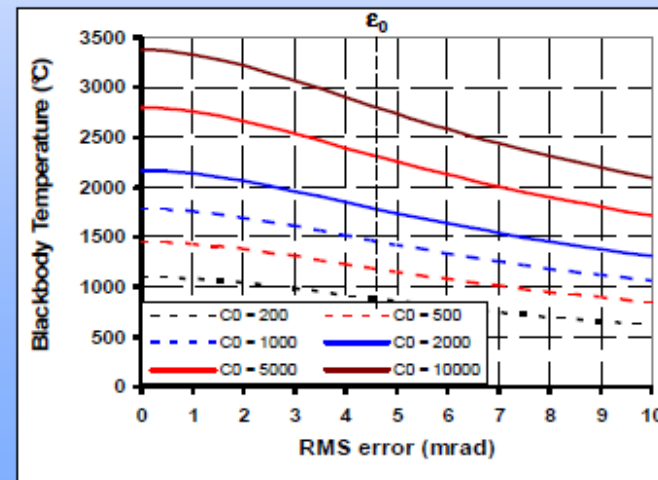
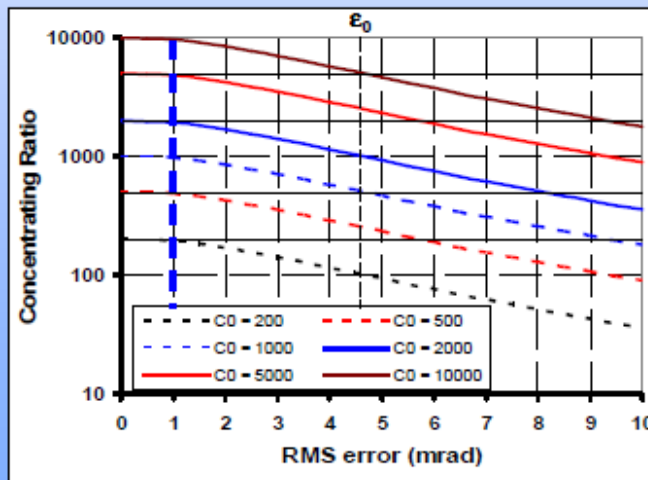
$$\delta = \sqrt{4\delta_L^2 + 4\delta_R^2 + \delta_P^2}$$

Erreurs de pointage

Erreurs locales
de surface

Erreurs de réglage

- Résultats: la concentration baisse de 50% si $\delta \approx \varepsilon_0$ et de 80% si $\delta \approx 2\varepsilon_0$



Miroirs

Perte de concentration
due aux erreurs et
défauts

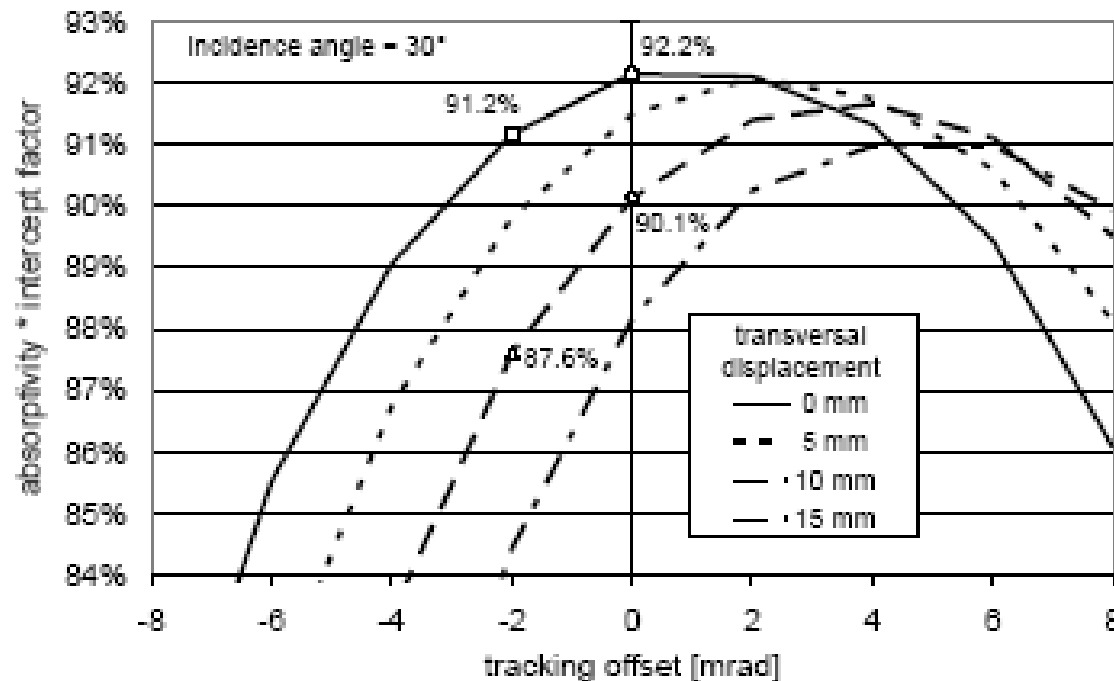


Figure 12: Example for a sensitivity study with parameter variation. The combined influence of tracking offset and a displacement of the absorber on the optical efficiency is shown



Logiciels

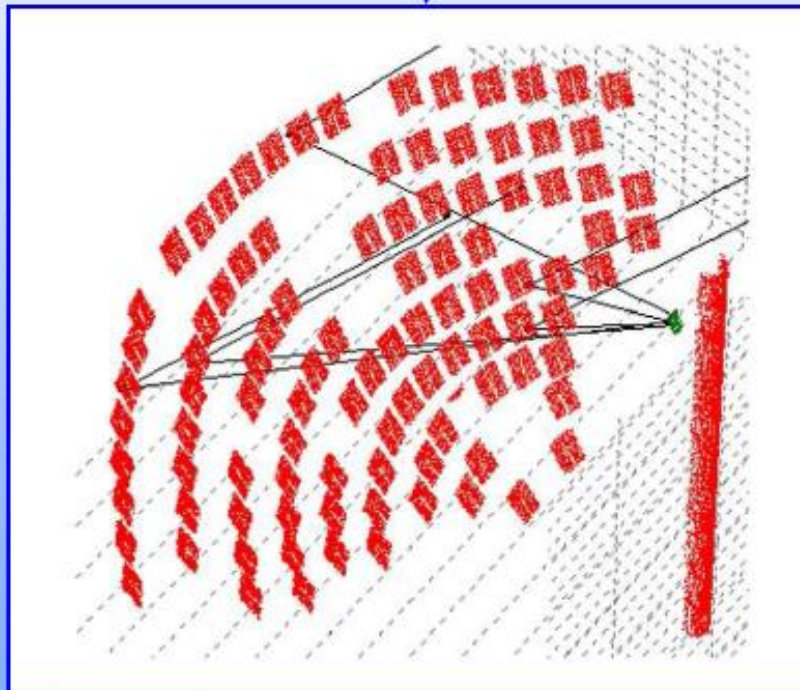
- De nombreux logiciels des deux familles ont été développés par les laboratoires impliqués. Ce sont généralement des logiciels “maison” non commerciaux
- La plupart d’entre eux sont librement accessibles sur Internet, mais le code source n’est pas toujours fourni
- Quelques exemples:
 - **Famille n°1** (Monte-Carlo): MIRVAL (le grand ancêtre), SolTRACE (actuellement utilisé à THEMIS), STRAL (développé par le DLR)...
 - **Famille n°2** (convolution): HELIOS (le grand ancêtre), WinDELSOL, HFLCAL et ses futures évolutions...

Logiciel MC développé par CNRS-PROMES et HPC-SA: SOLFAST-4D

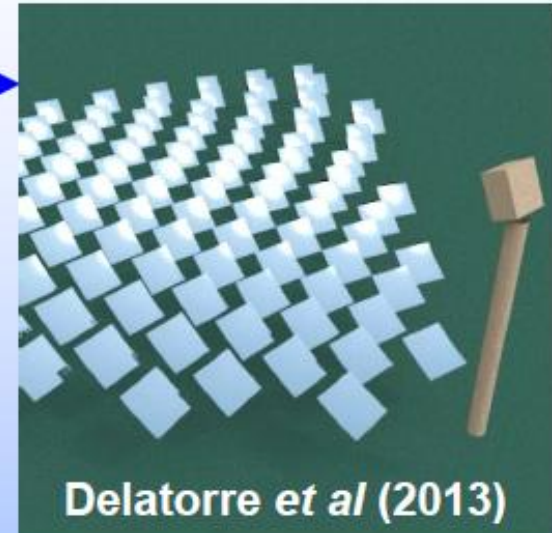
Logiciels

- Quelques illustrations graphiques...

- Monte-Carlo
- Convolution



WinDELSOL (Garcia et al 2008)

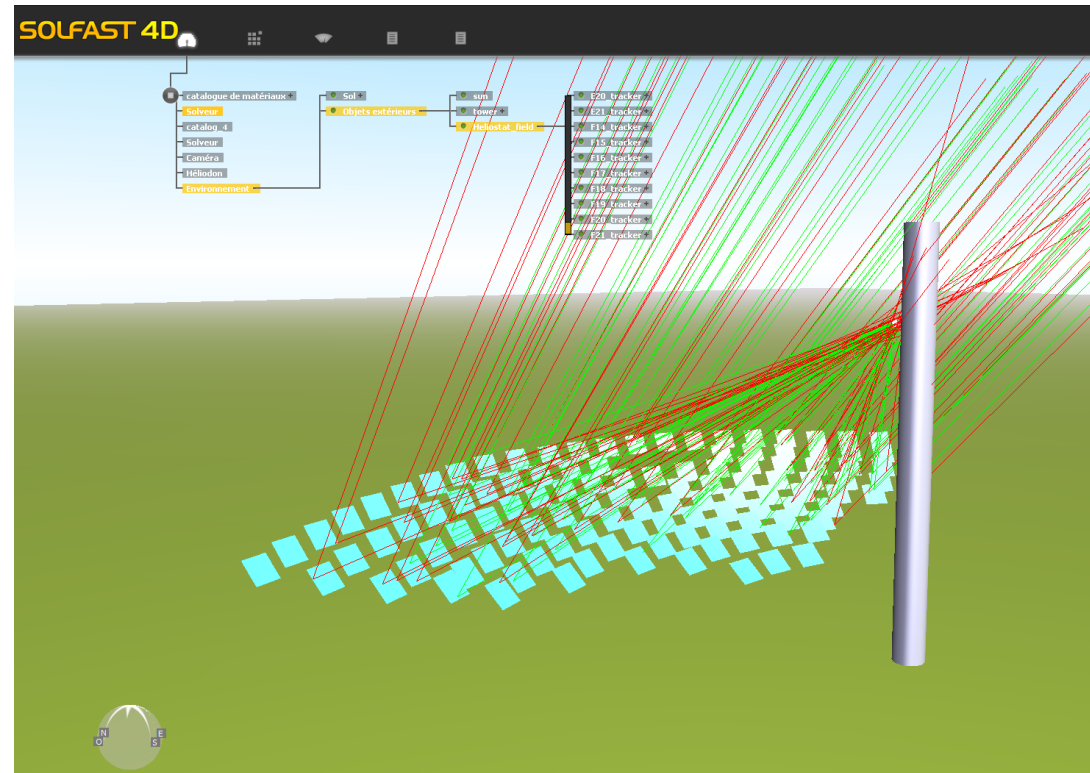
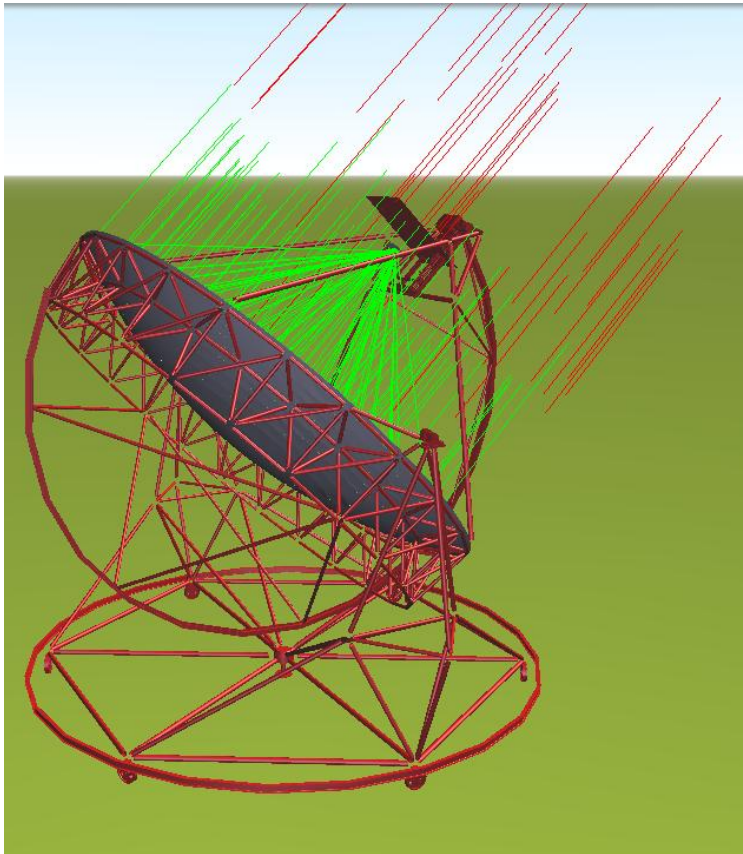


Delatorre et al (2013)



STRAL (Ulmer et al 2011)

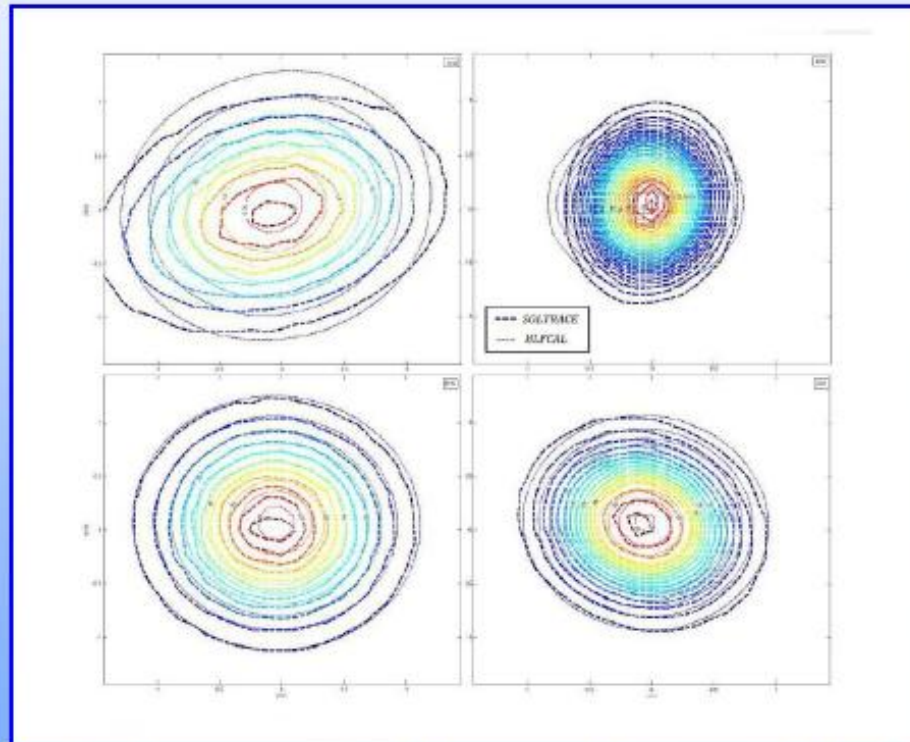
Logiciels



SOLFAST-4D CNRS / HPC-SA

Comparaison logiciels

- Performances similaires pour les héliostats centraux, mais avantage au modèle de Monte-Carlo pour les héliostats décentrés



A. Salomé, Thèse de Docteur en Sciences, Université de Perpignan (2012)

Conclusion

- Seule la composante directe (DNI) du rayonnement solaire est valorisée par les systèmes à concentration
- Des valeurs de DNI de 2000 à 3000 kWh/m².an sont propices au développement du CSP
- La concentration théorique maximale pour les concentrateurs ponctuels est de 46 000 environ (15 000 en pratique) et de 215 pour les concentrateurs linéaires
- La simulation des concentrateurs doit prendre en compte les défauts et erreurs géométriques des miroirs

Merci de votre attention

