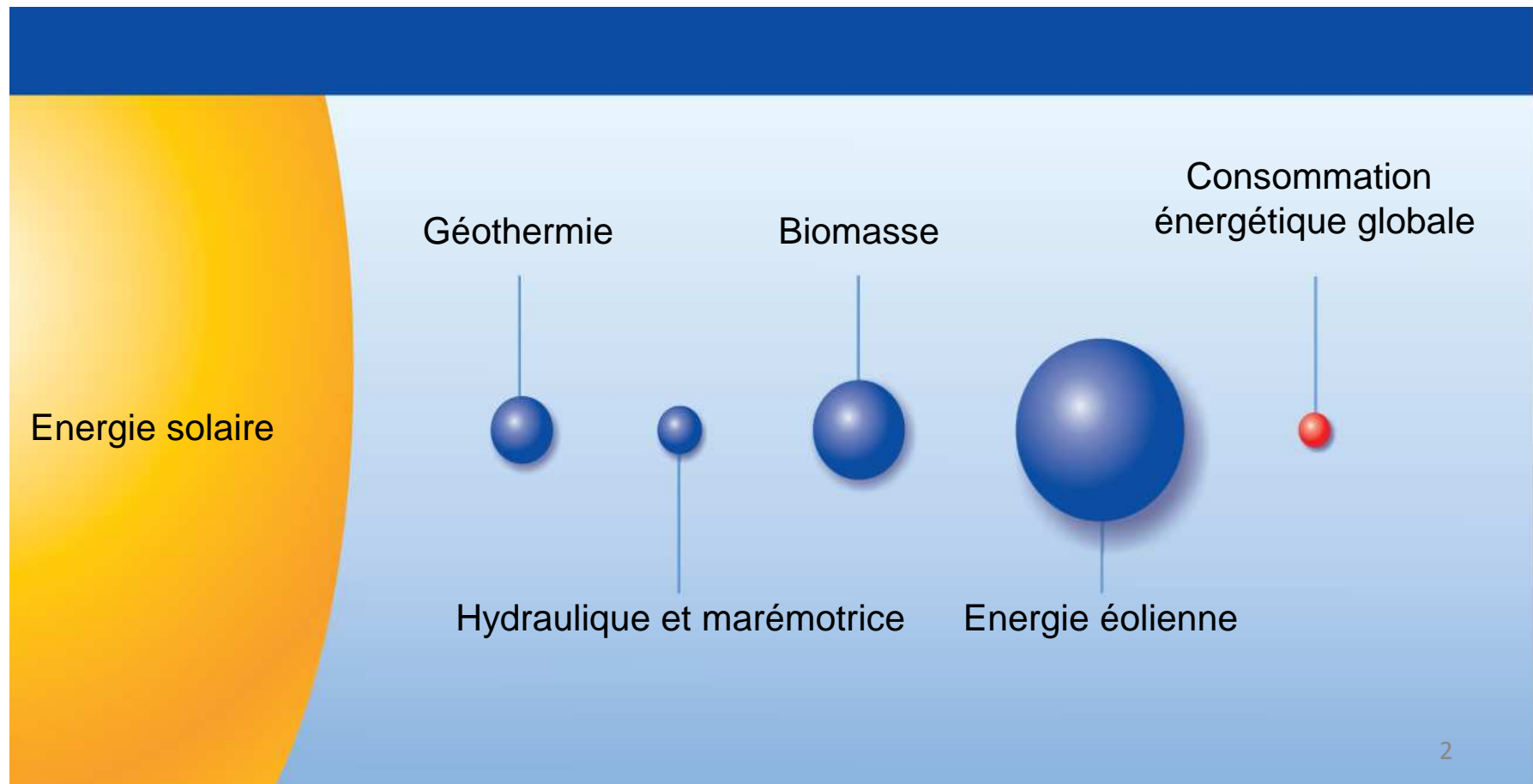




Le Gisement Solaire

1. Le rayonnement solaire: origine et définition
2. Les variables du rayonnement solaire

Potentiel de l'énergie solaire « disponible » sur terre



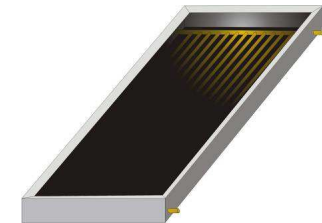
Les 3 principales applications de l'énergie solaire

Le solaire photovoltaïque

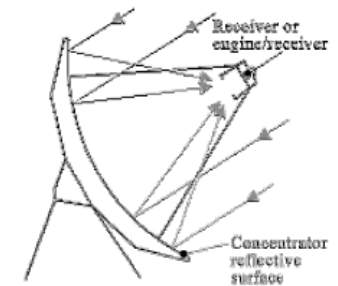
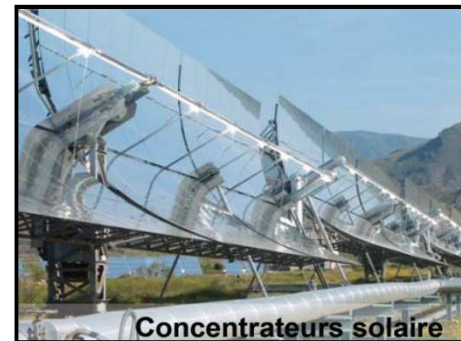


Modules photovoltaïques

Le solaire thermique



Le solaire thermodynamique



Puissance et énergie du rayonnement solaire

- La puissance instantanée du rayonnement solaire s'exprime en **W/m²**
- L'énergie du rayonnement solaire correspond à la quantité d'énergie reçue sur une surface donnée pendant une durée définie, exprimée en **kWh/m²/(an, jour, mois)**
- Une puissance typique de 1000W/m²

Source: RWE Energie AG and RSS GmbH

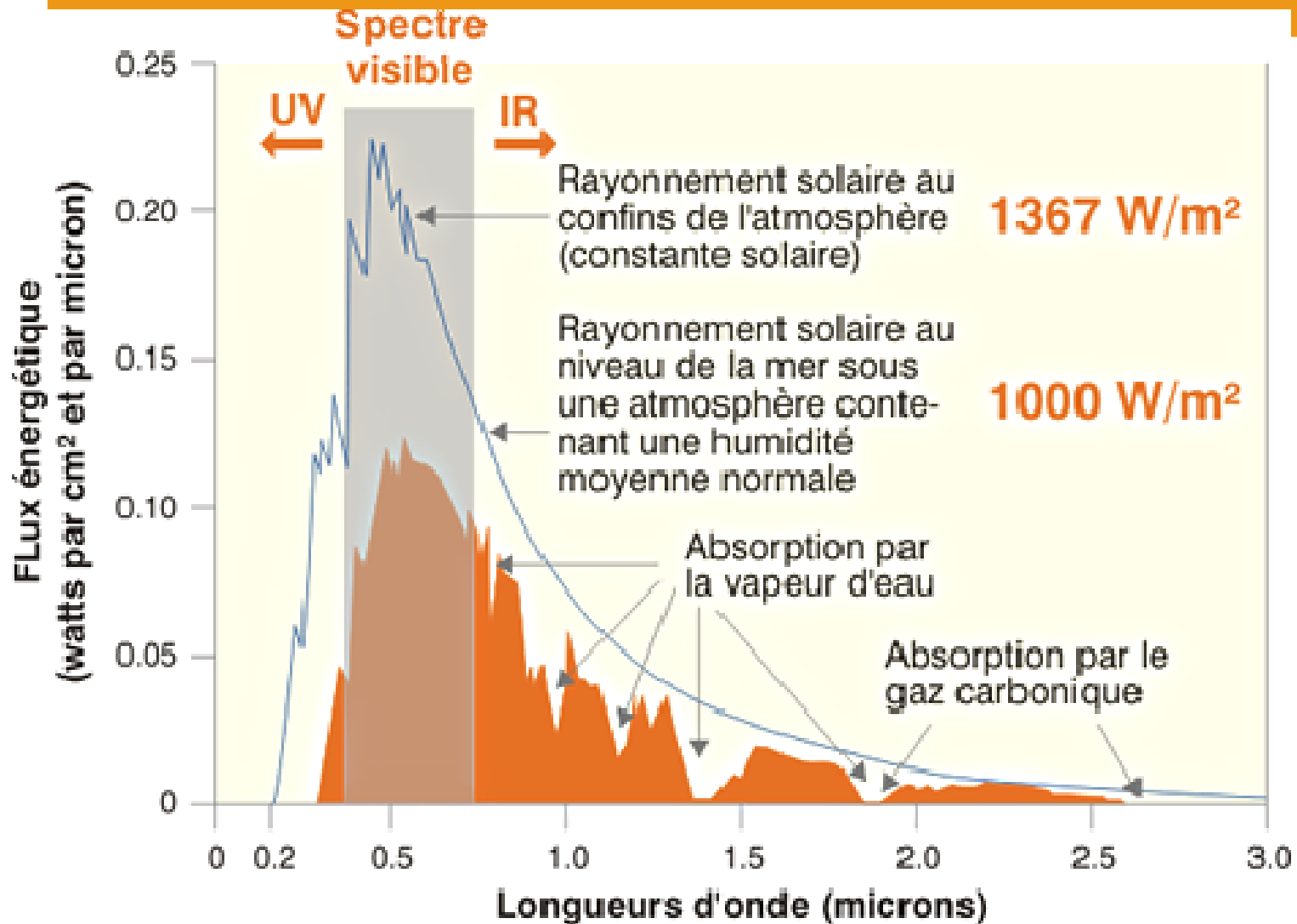
Disponibilité de l'énergie solaire en un lieu donné

Le rayonnement solaire dépend fortement de nombreux paramètres:

- La latitude du site (éloignement par rapport à l'équateur)
- La saison (inclinaison relative de la terre par rapport au soleil qui change au cours de l'année)
- L'heure de la journée (angle variable du soleil dans le ciel)
- Les conditions météo et atmosphériques (nébulosité, pollution, nuages...)
- Etc...

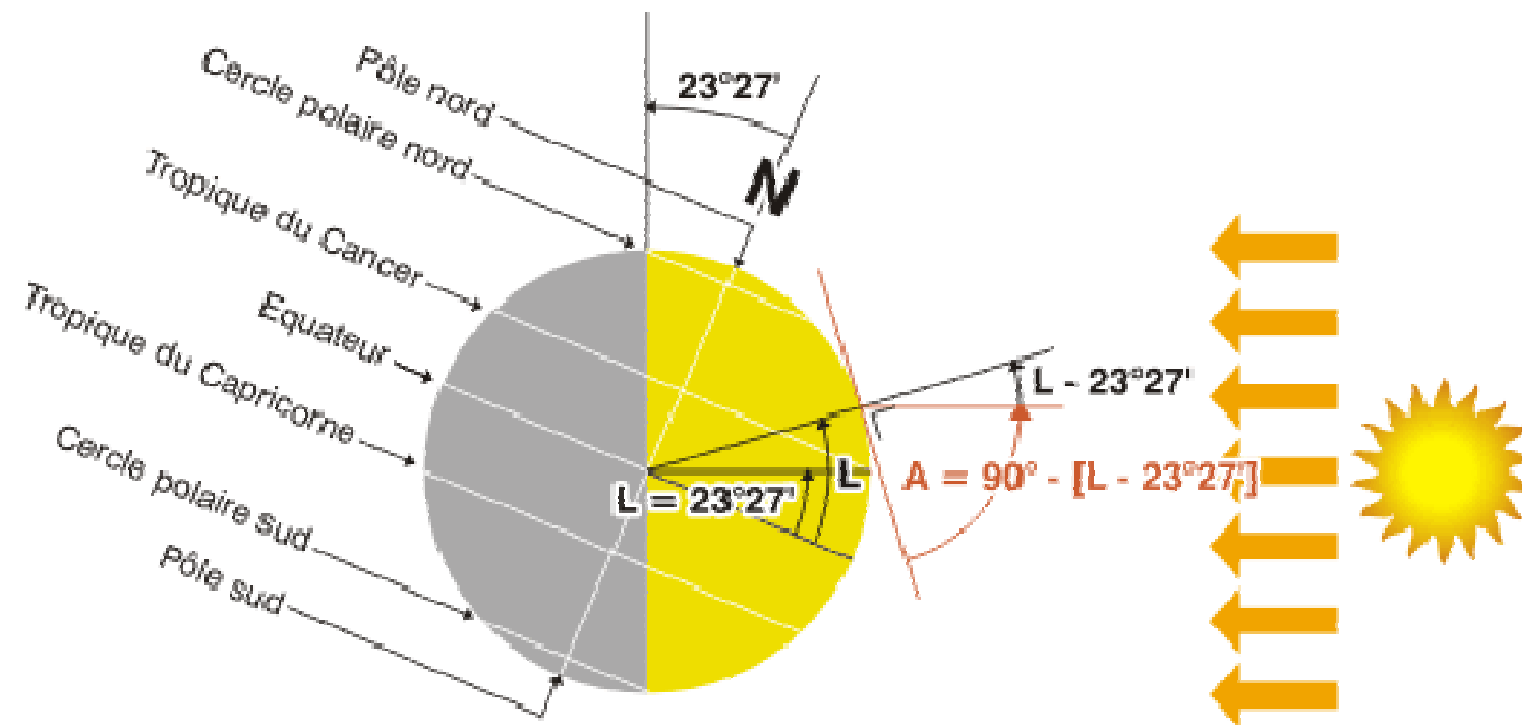
Toutefois d'une année sur l'autre l'énergie solaire totale reçue reste sensiblement constante

Décomposition spectrale



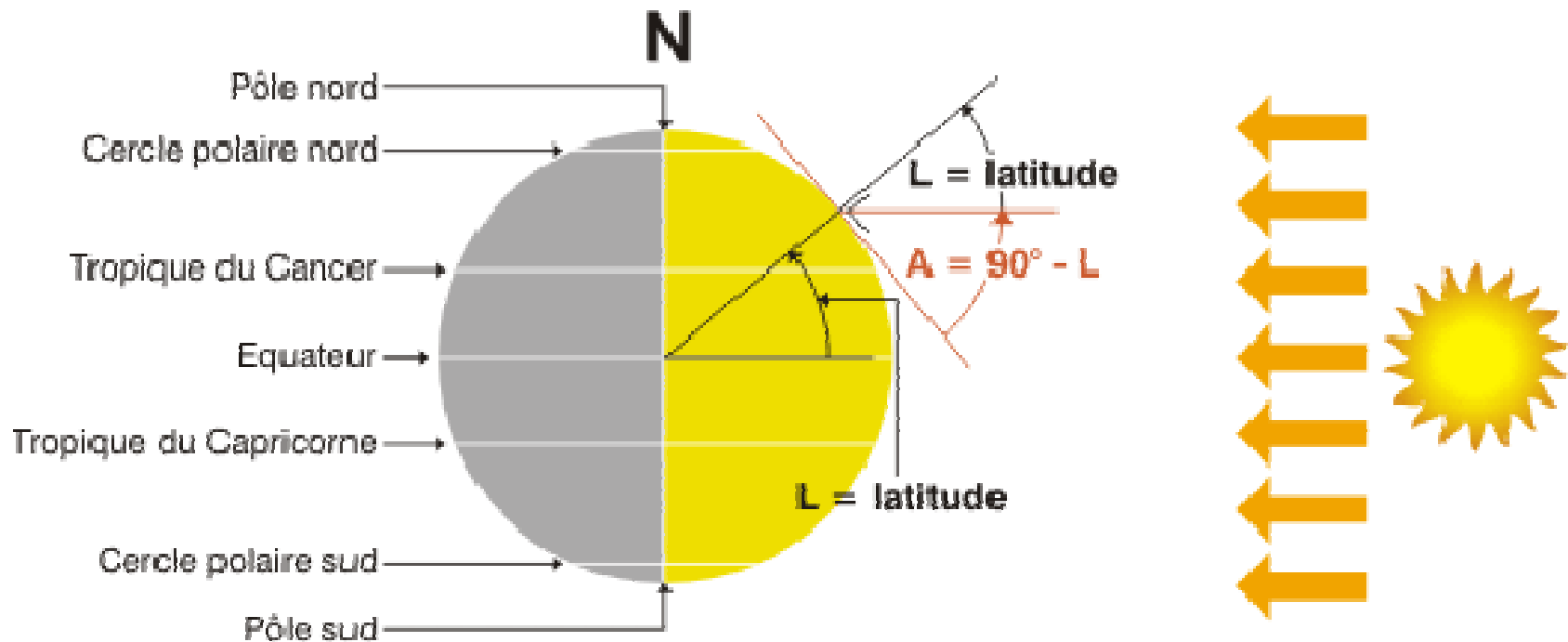
Solstice ETE

Le soleil est perpendiculaire au tropique du cancer ($23^{\circ}27'$). La hauteur du soleil est de $23^{\circ}27'$ supérieur à celle de l'équinoxe.



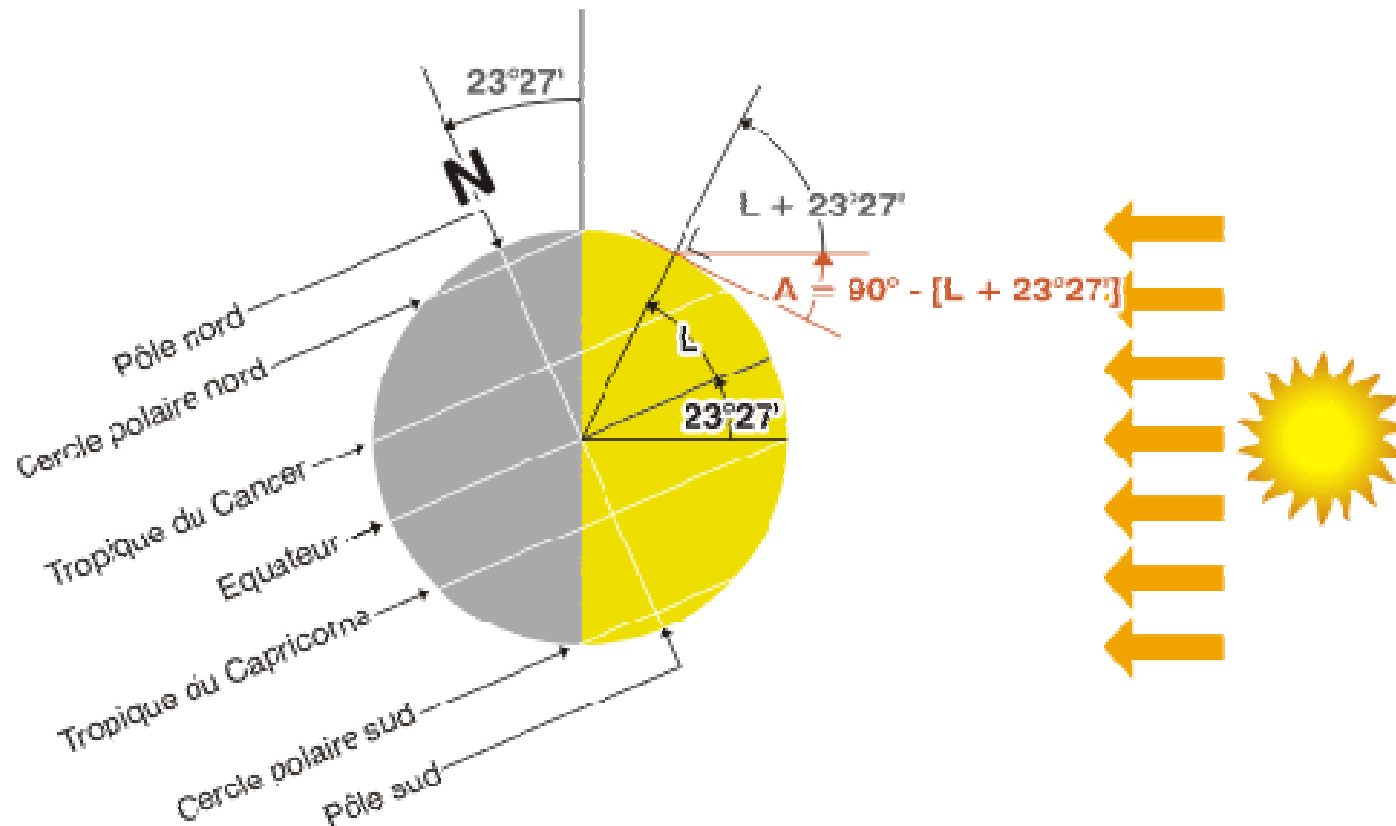
Equinoxe Printemps Automne

Le soleil est perpendiculaire à l'équateur. Les nuits et jours sont de durée égale.



Solstice HIVER

C'est le tropique du capricorne qui bénéficie d'un rayonnement perpendiculaire.
L'angle à midi solaire s'élèvera au maximum à $A = 90^\circ - \text{Latitude} - 23^\circ 27'$.
A est pris pour le recul du champ PV à partir d'un obstacle plein Sud,



Énergie solaire au sol dans le monde, en kWh/m²/an

 inconnu

 640 - 900

 900 - 1050

 1050 - 1200

 1200 - 1350


 1350 - 1500

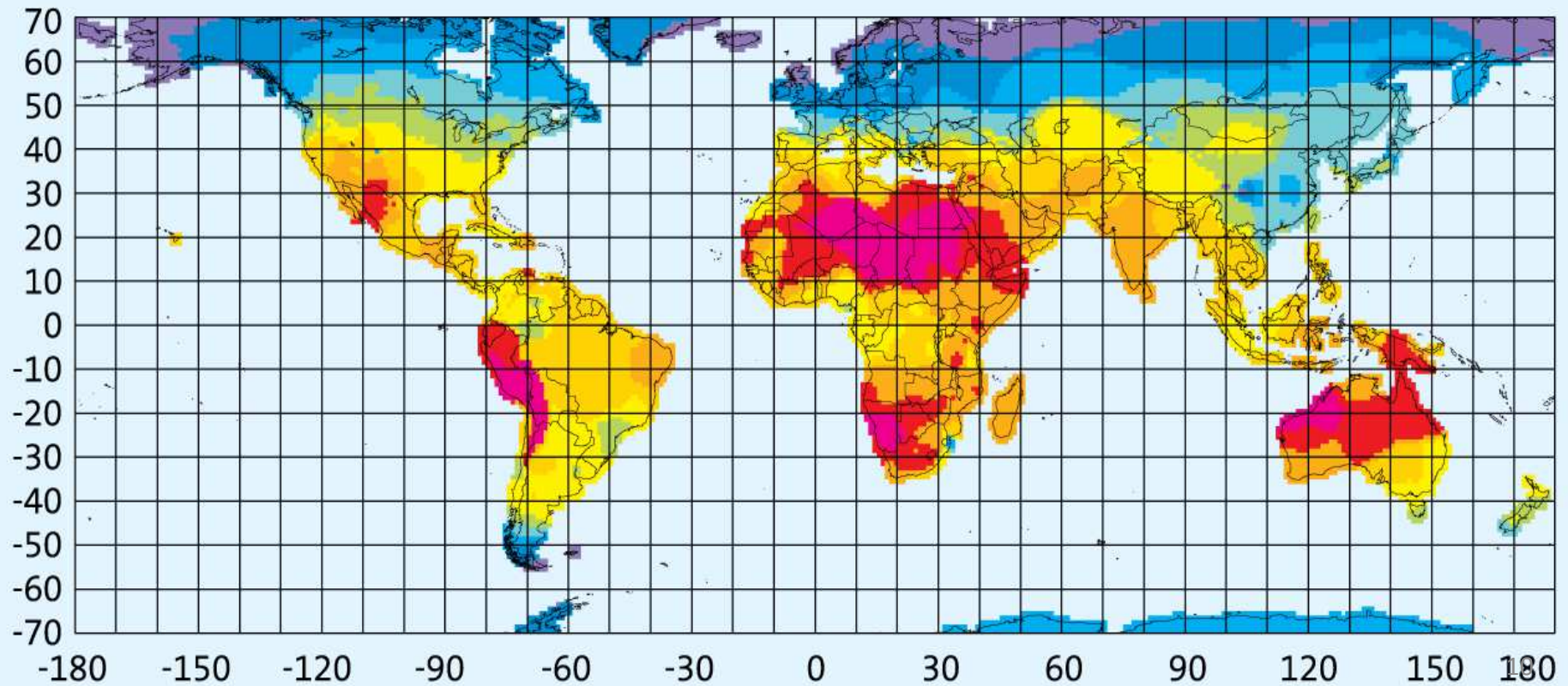
 1500 - 1700

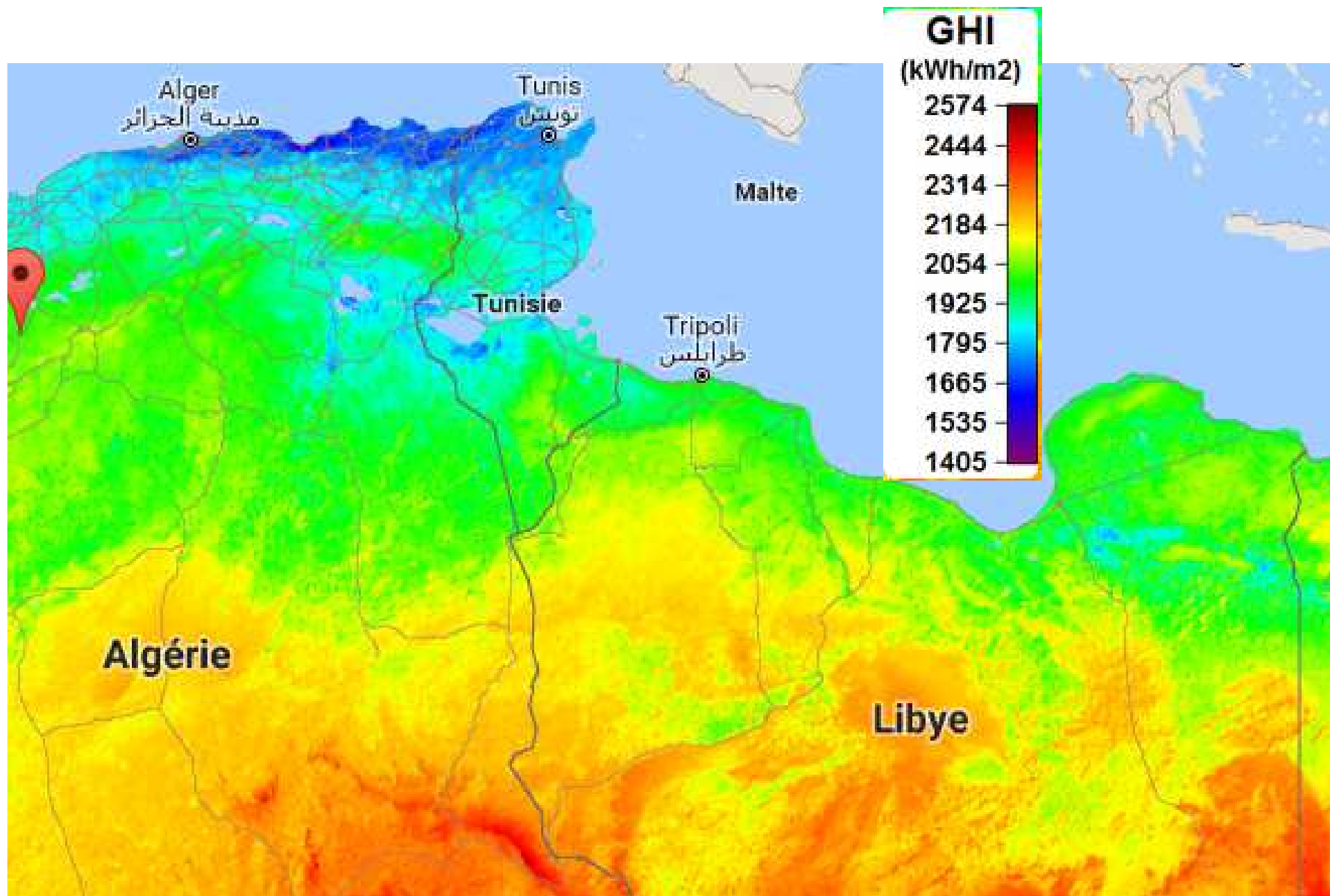
 1700 - 1900

 1900 - 2100

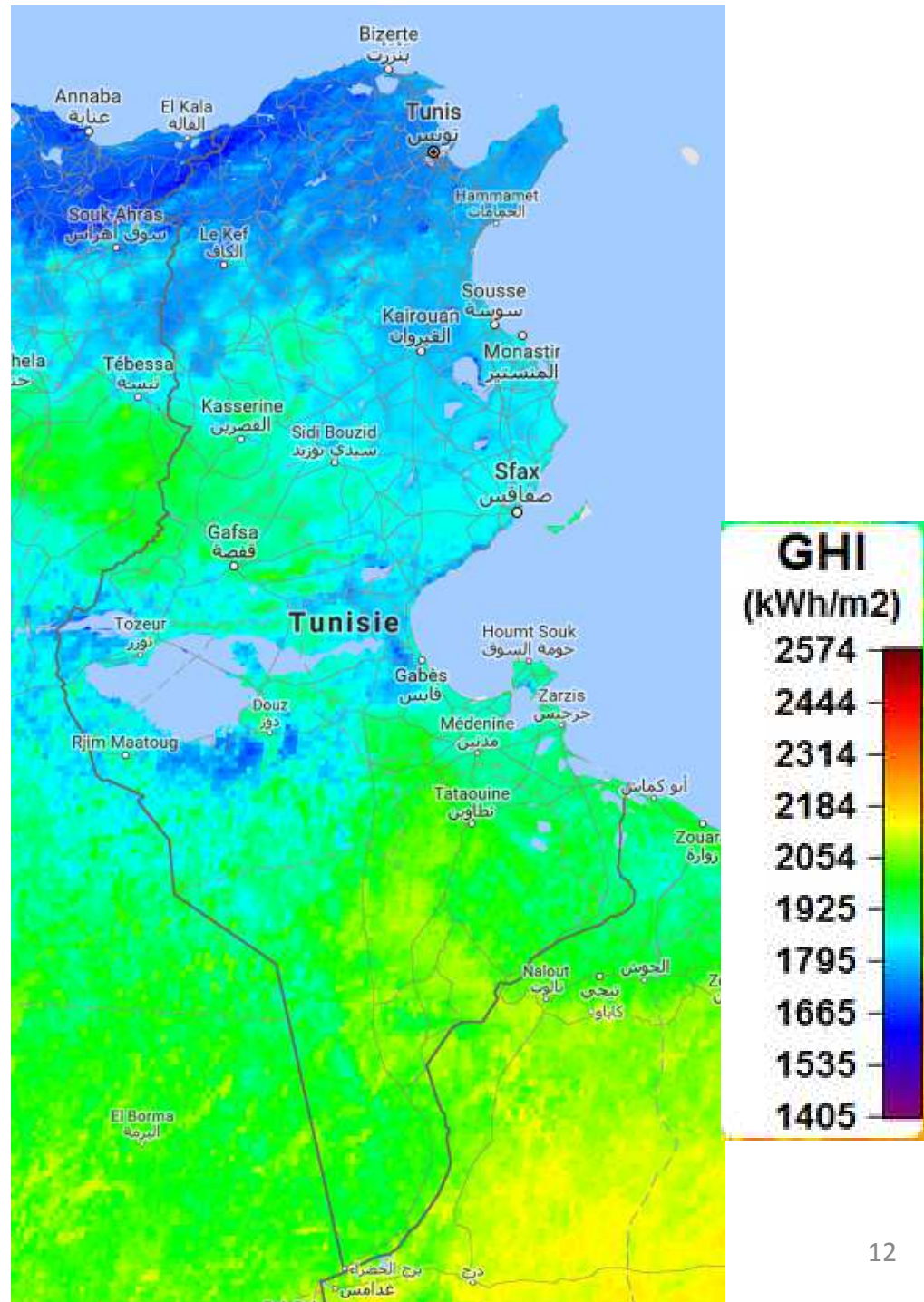
 2100 - 2300

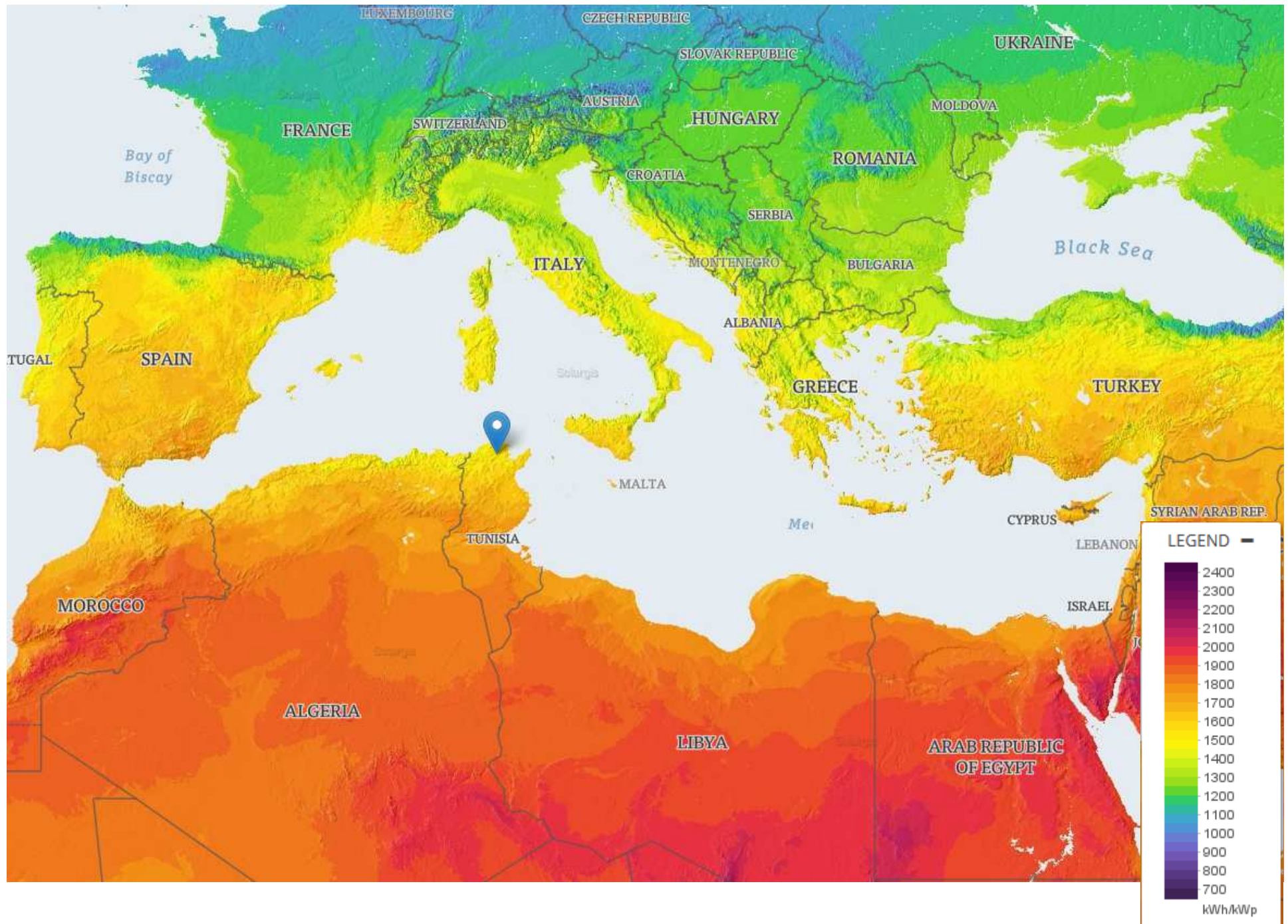
 > 2300

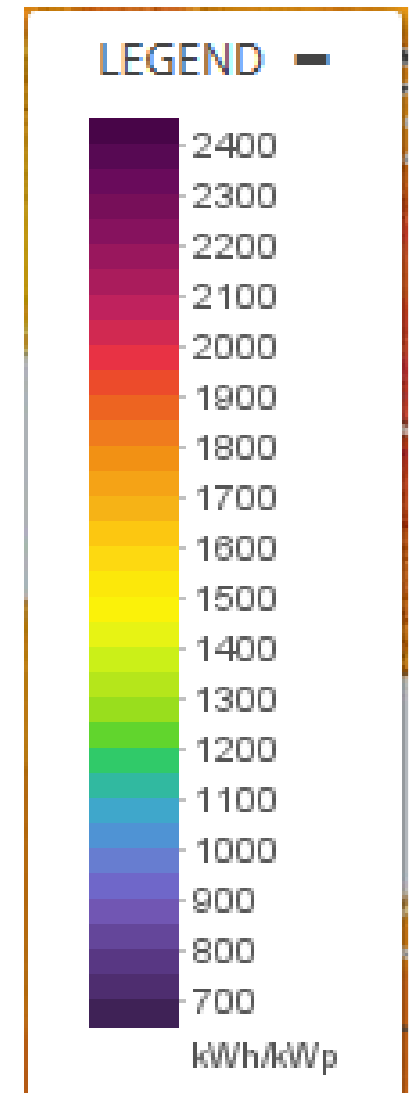




**En Tunisie,
l'ensoleillement varie
entre 1,5 kWh/m²/j et 7
kWh/m²/jour selon les
régions et les saisons.**

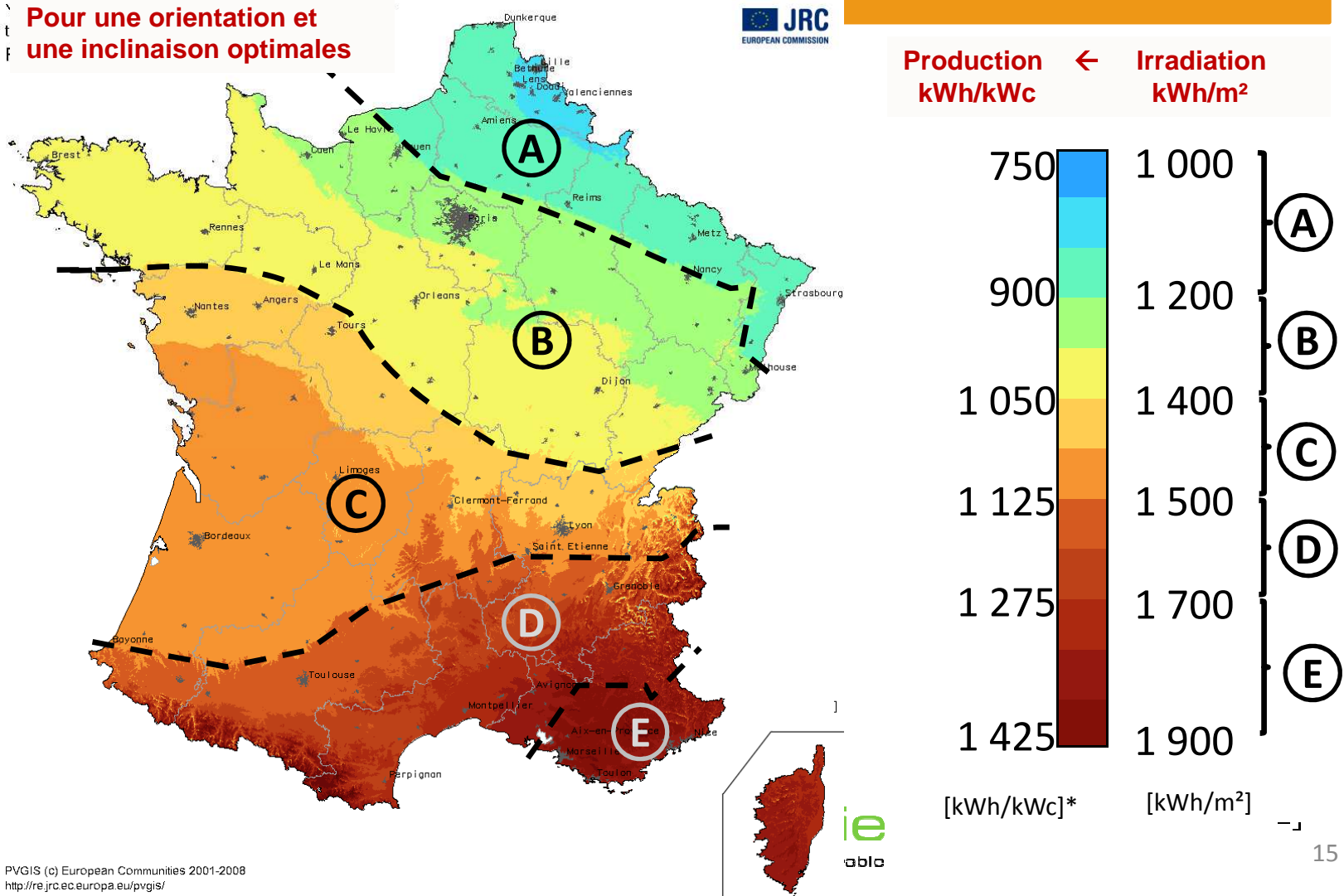




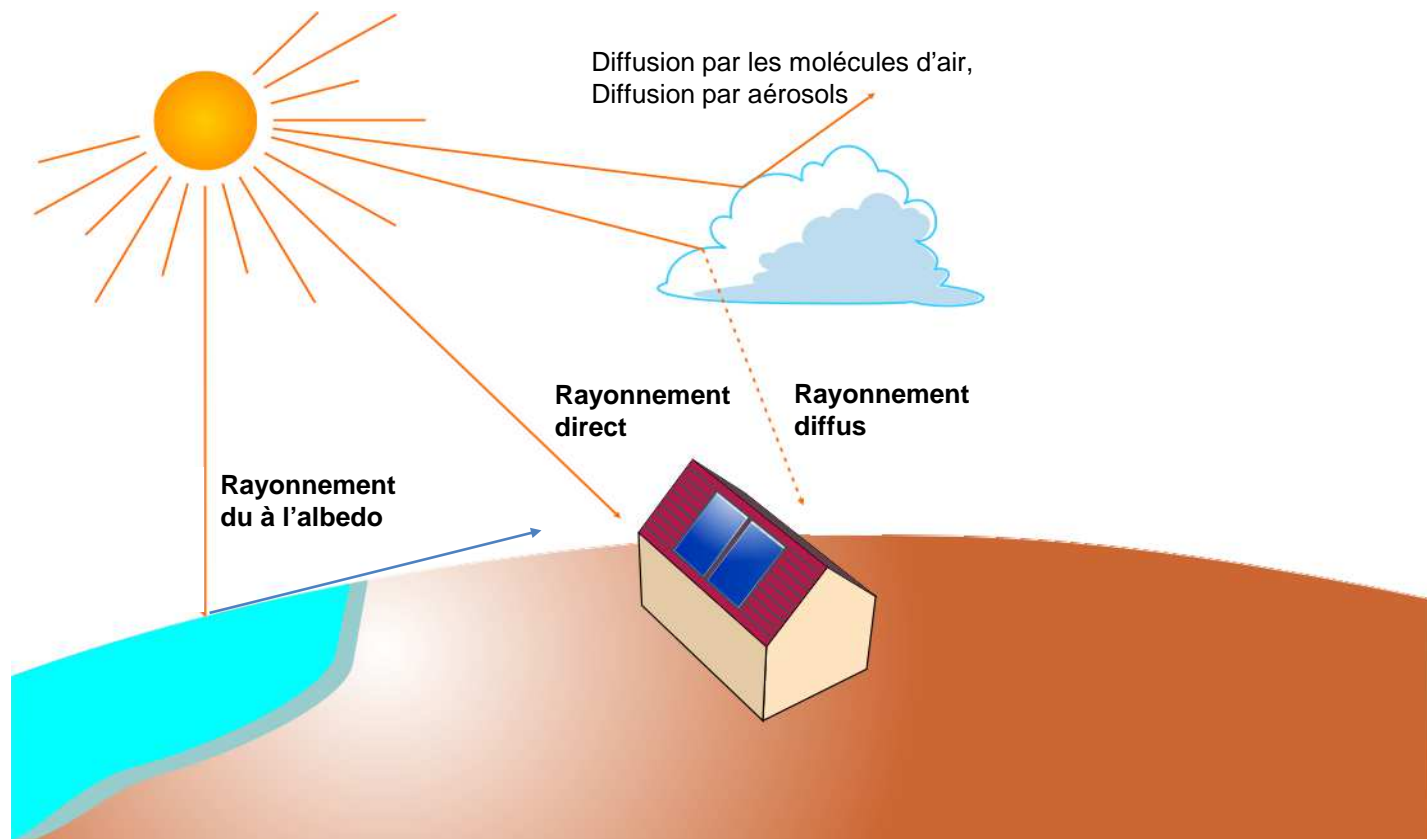


Si on connaît l'irradiation, on connaît la production!

Pour une orientation et une inclinaison optimales

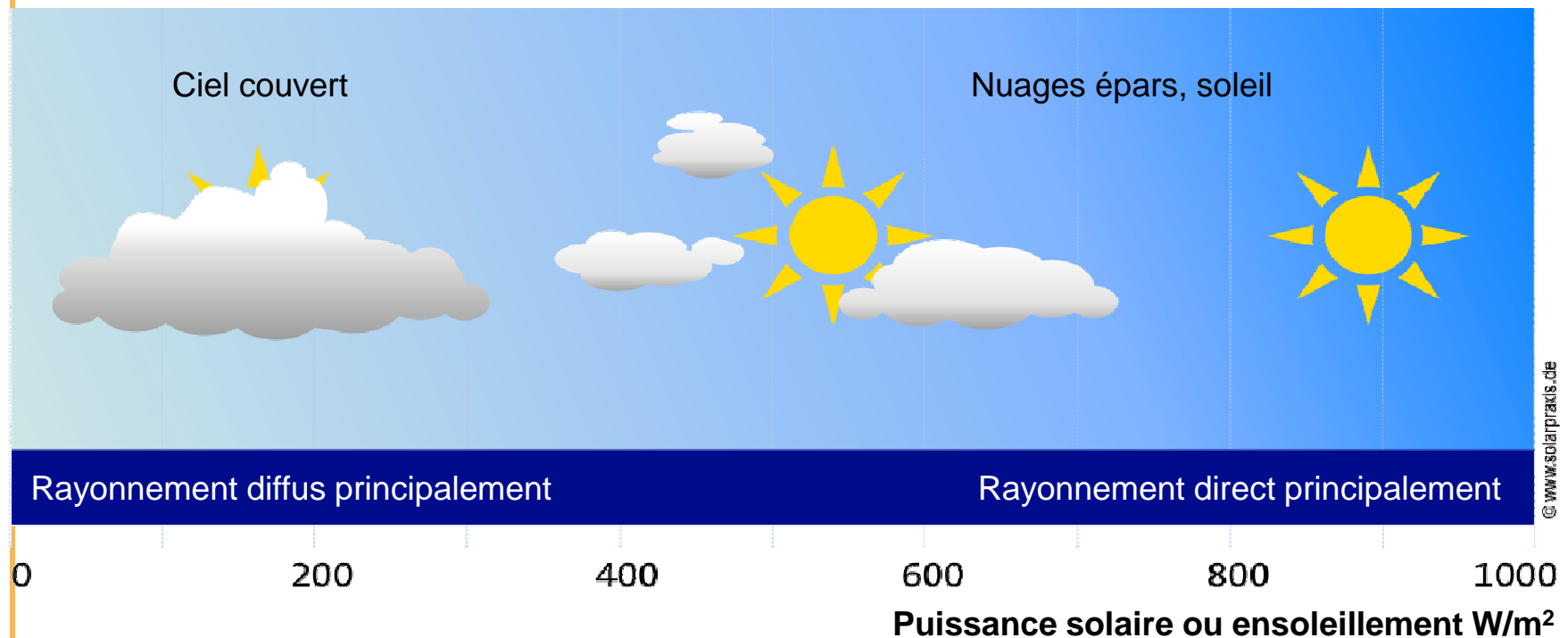


Les composantes du rayonnement solaire



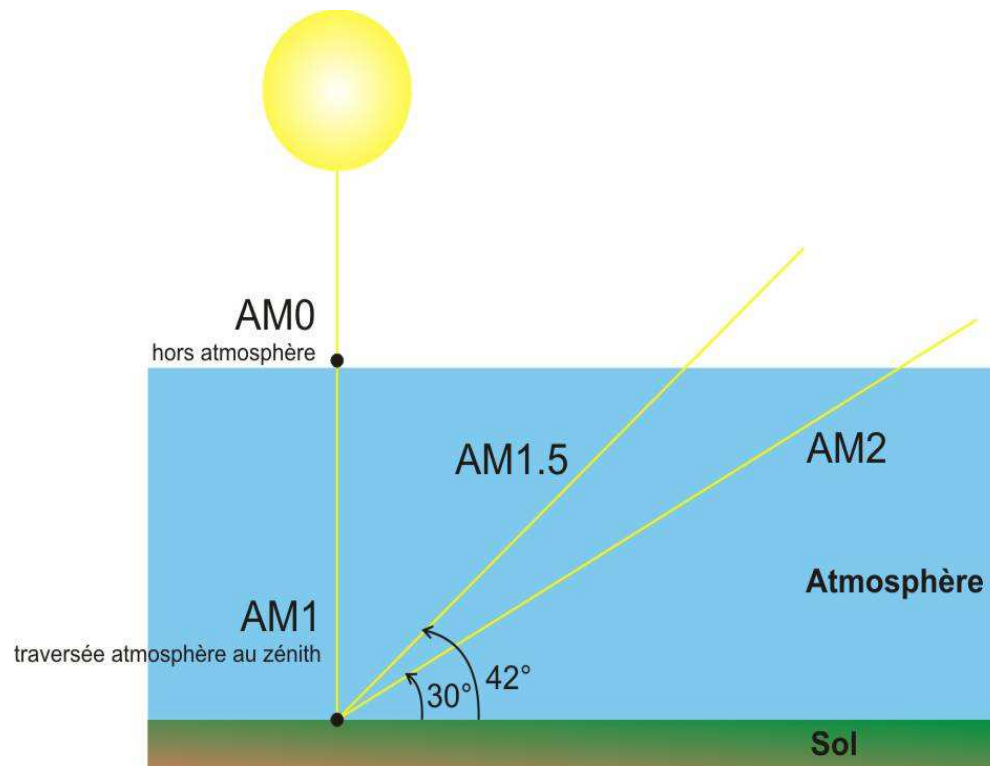
Rayonnement Global = Rayonnement direct + Rayonnement diffus +
Rayonnement réfléchi (albédo x rayonnement total horizontal)

L'influence des conditions météorologiques



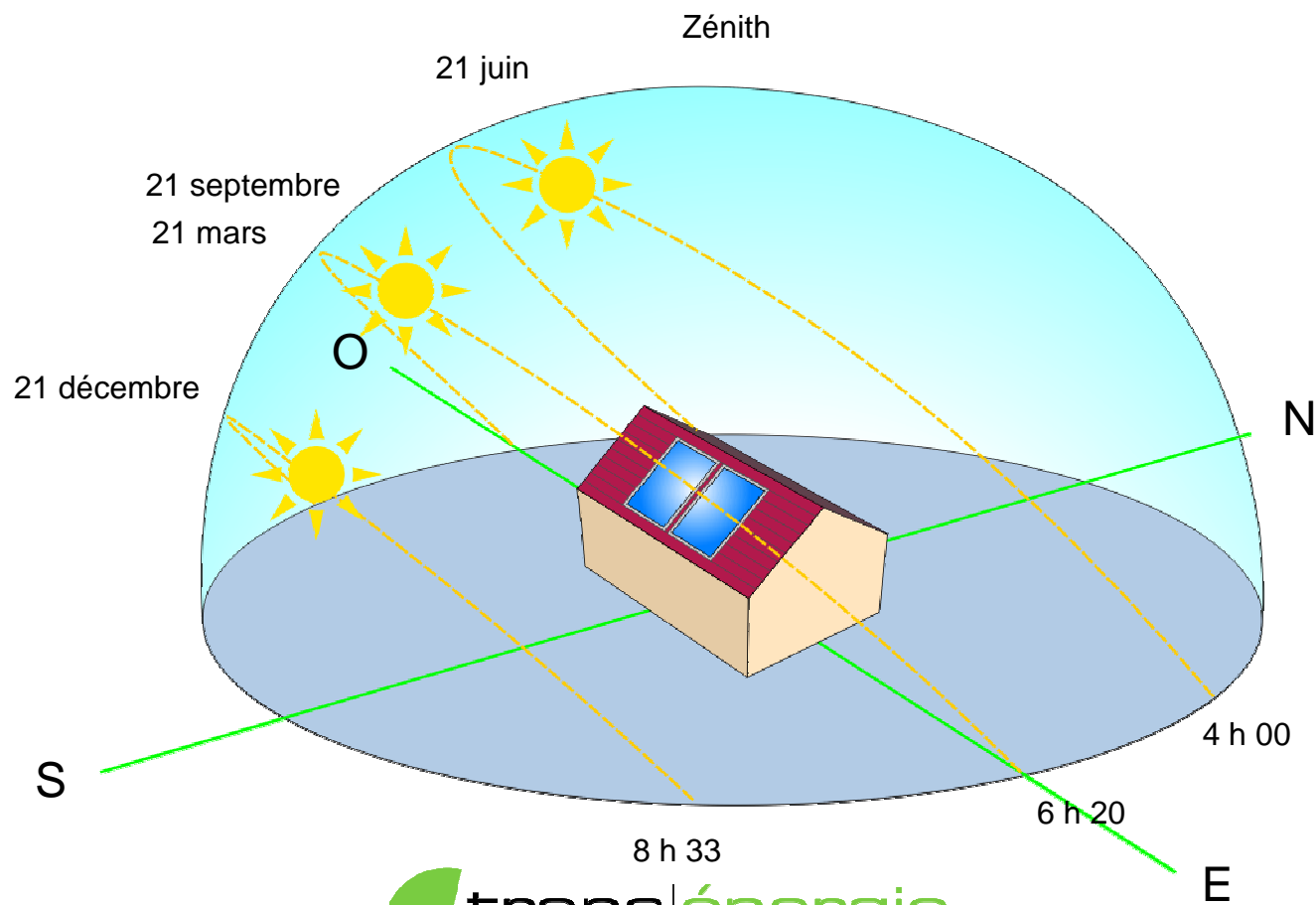
La présence de nuage engendre la présence de rayonnement diffus important, dont la puissance est souvent inférieure à celle du rayonnement direct

Parcours du rayonnement

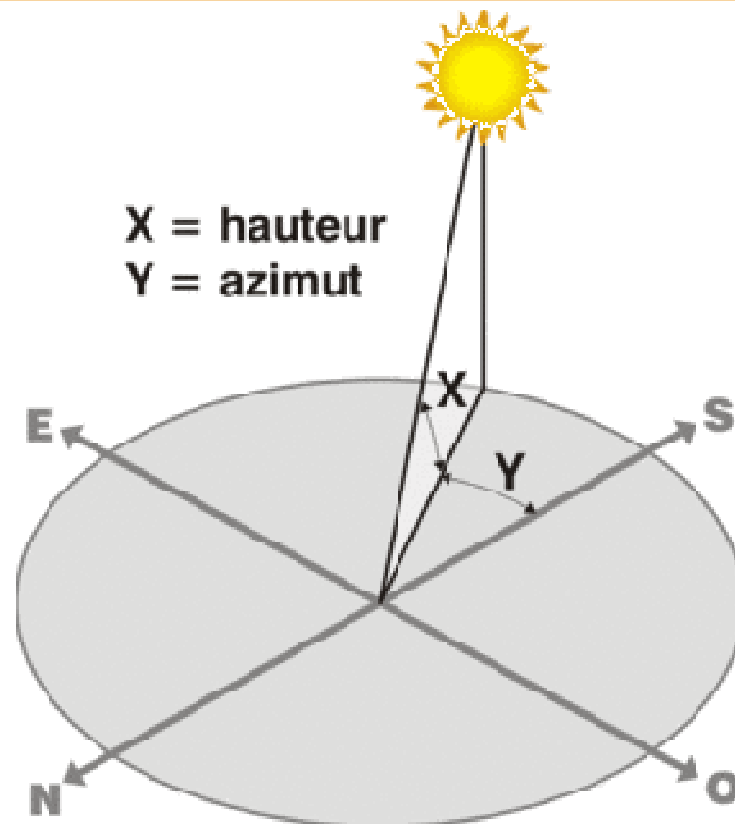


- La position relative du soleil modifie l'épaisseur d'atmosphère traversée
- Le nombre d'Air Masse (AM) caractérise la distance parcourue par le rayonnement solaire dans l'atmosphère
- Test normalisé des cellules photovoltaïques pour un spectre solaire AM 1.5 (Standard Test Conditions)

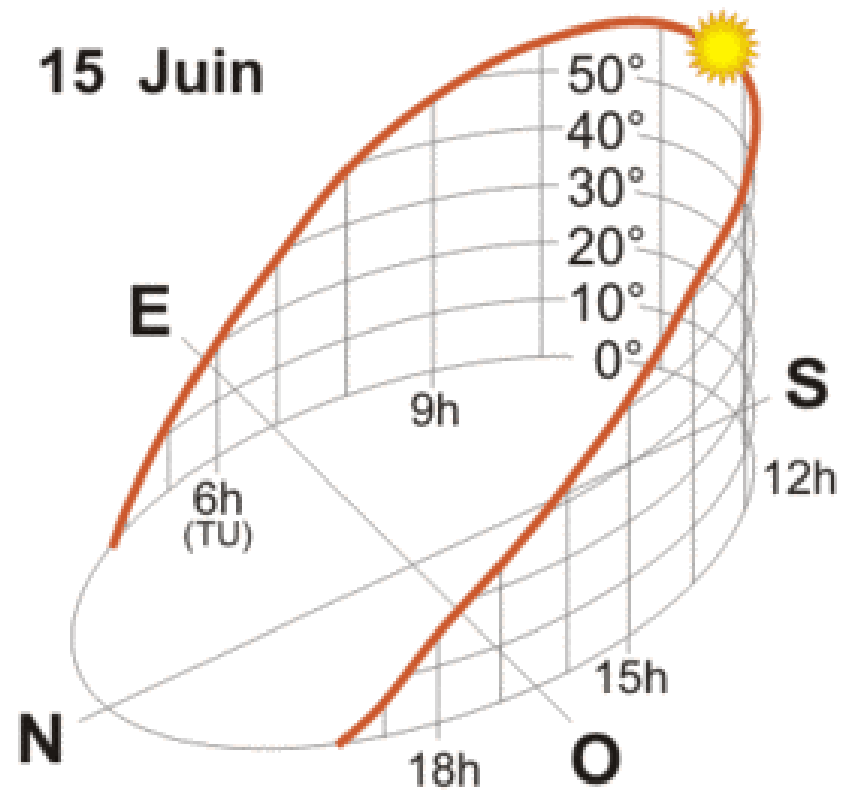
Trajectoire du soleil dans le ciel (hémisphère nord)

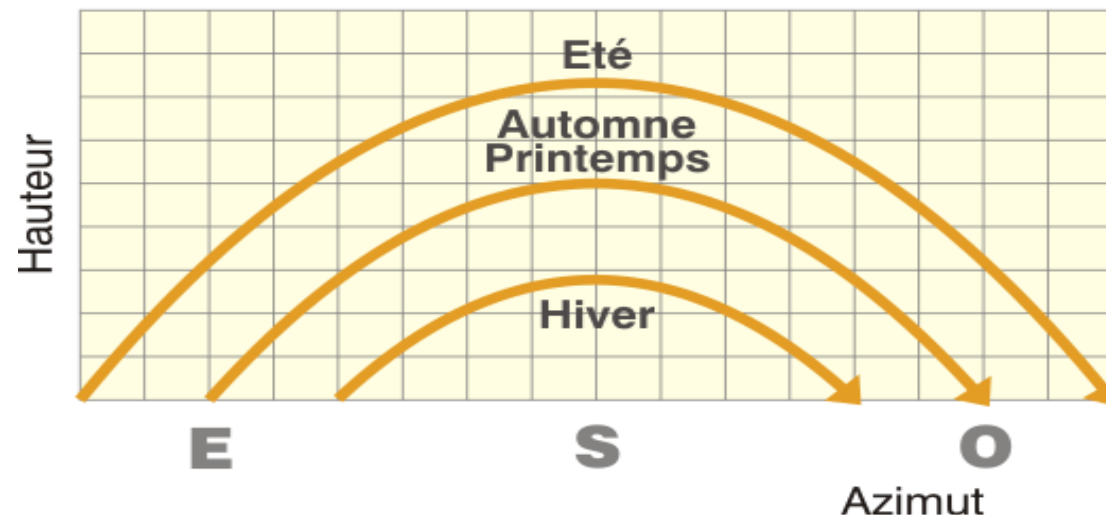
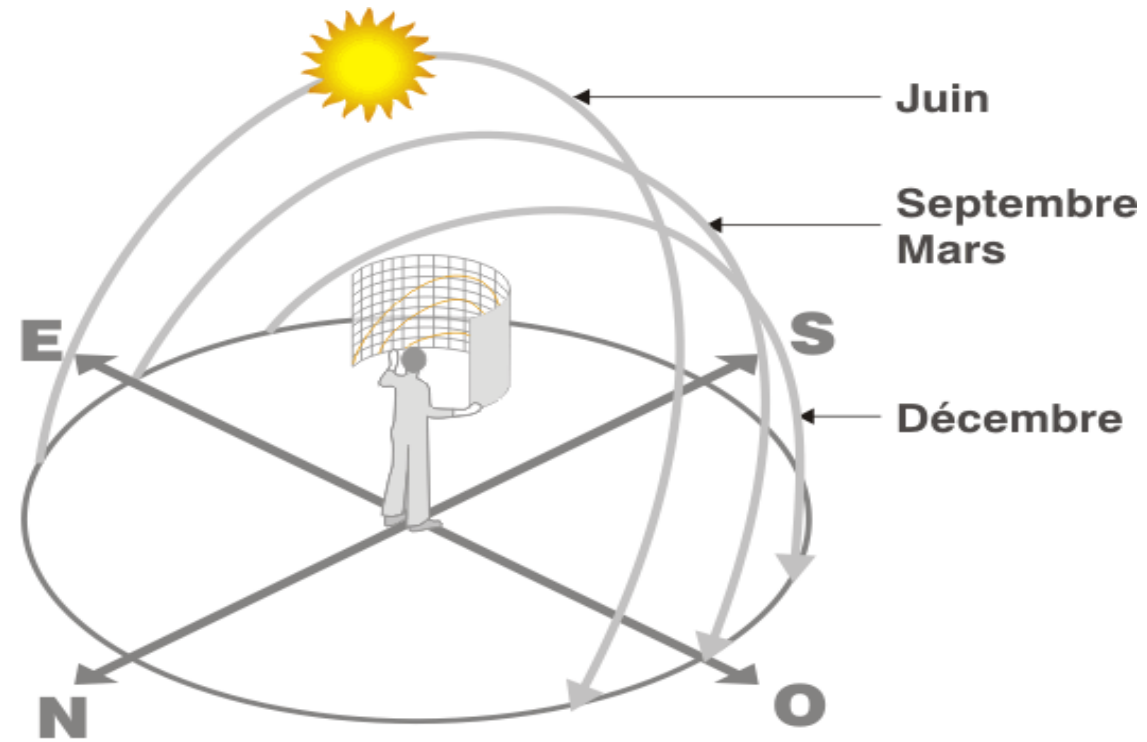


Azimut et Hauteur pour se repérer dans le ciel



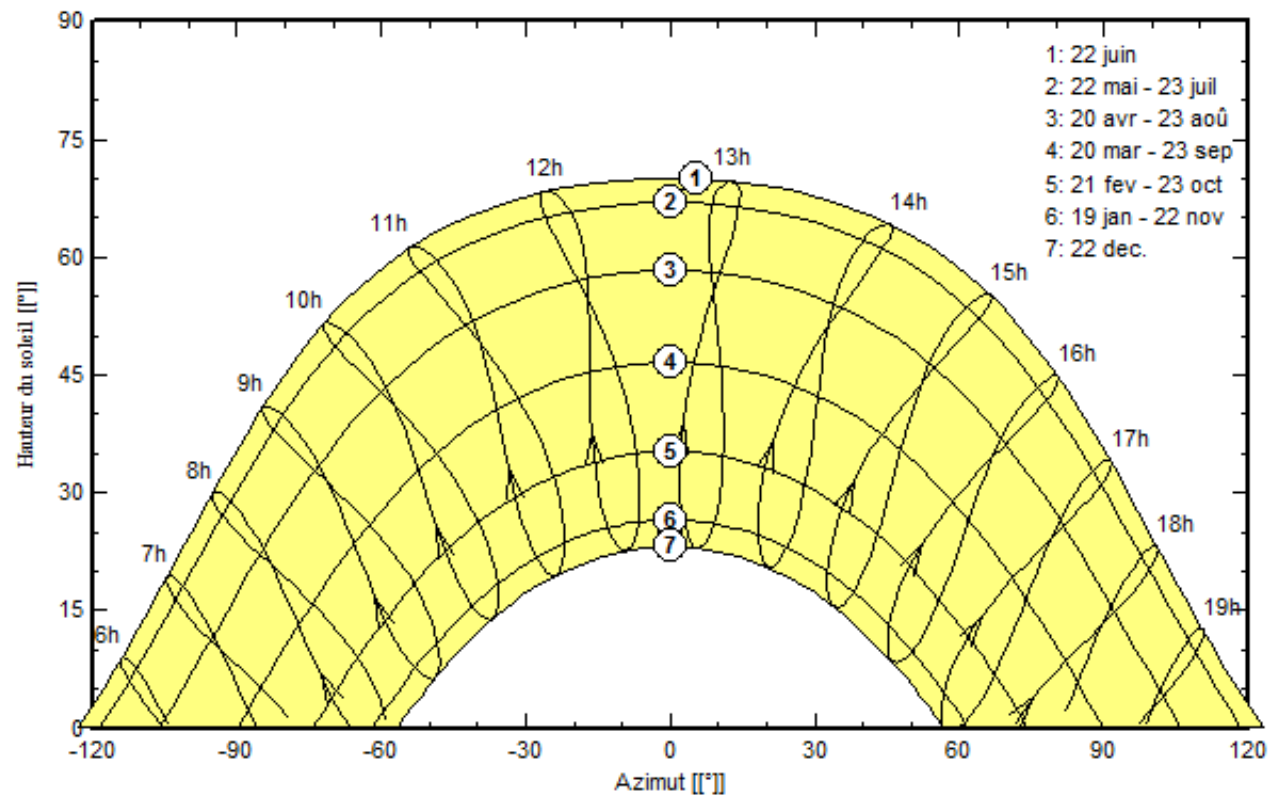
Mouvement apparent du soleil





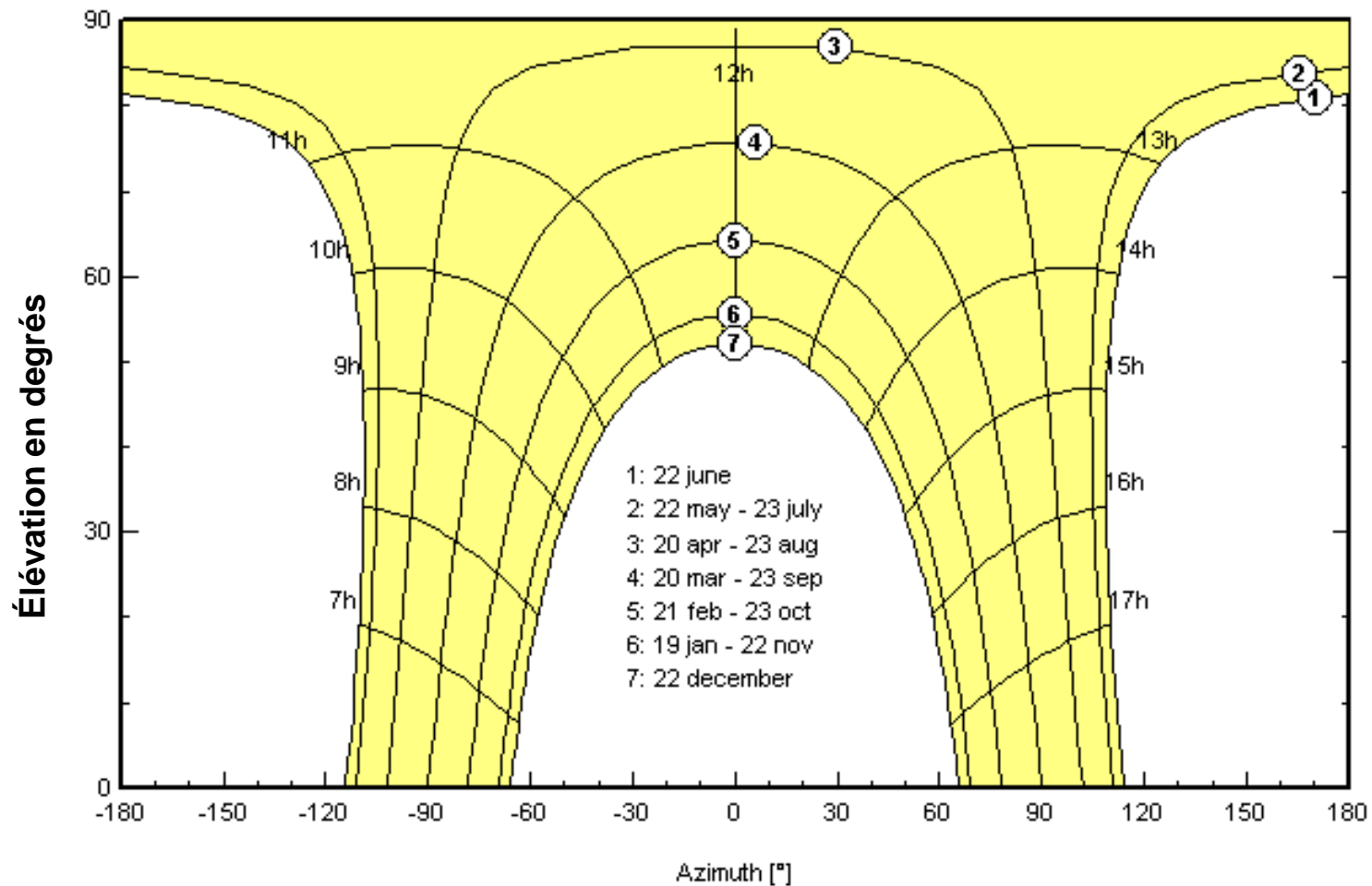
Représentation utilisée: le diagramme de trajectoire solaire en un lieu donné

Trajectoire du soleil à Marseille Marignane, (Lat. 43.4°N, long. 5.2°E, alt. 14) Temps légal



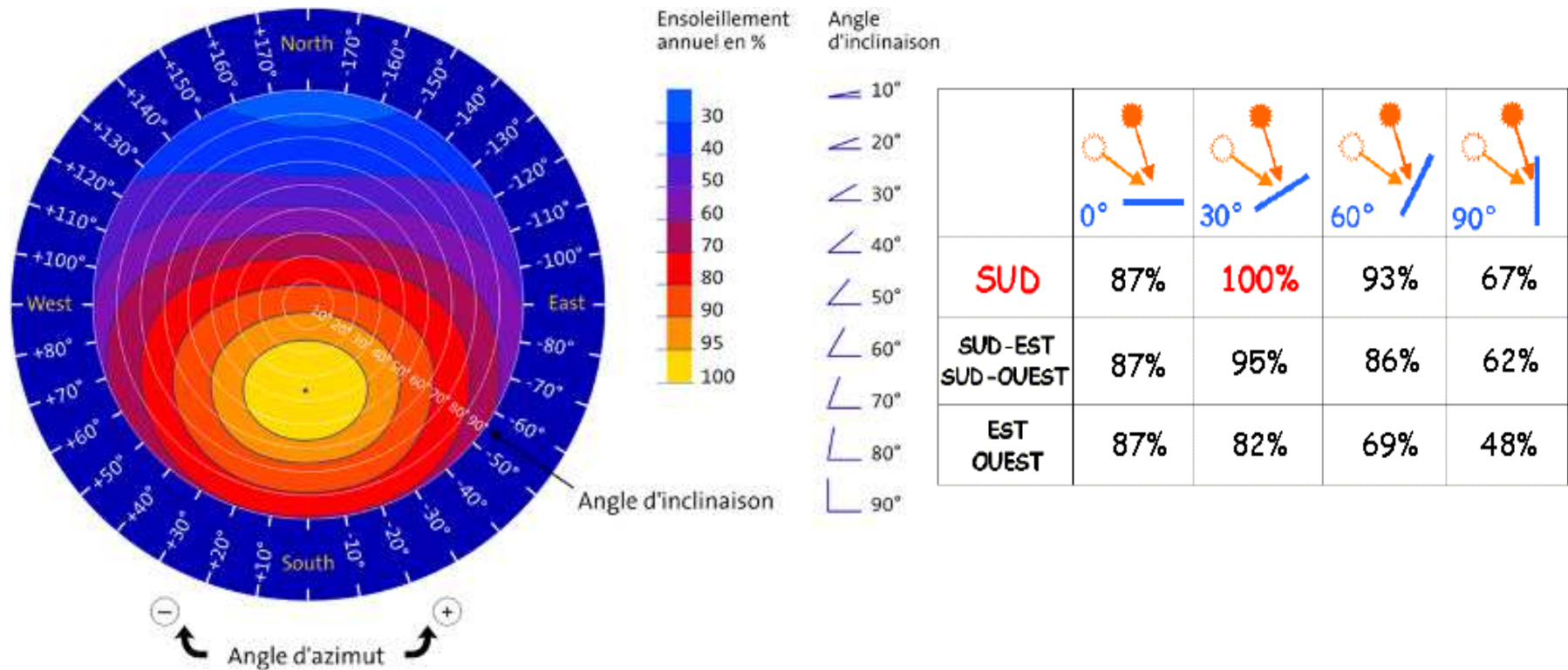
Représentation utilisée: le diagramme de trajectoire solaire en un lieu donné

Trajectoire du soleil au Lamentin (Lat. 14.4°N, long. 61.0°W, alt. 7 m)



Pertes inhérentes à l'installation: Exposition non optimale

- Estimer la perte annuelle d'une exposition non optimale

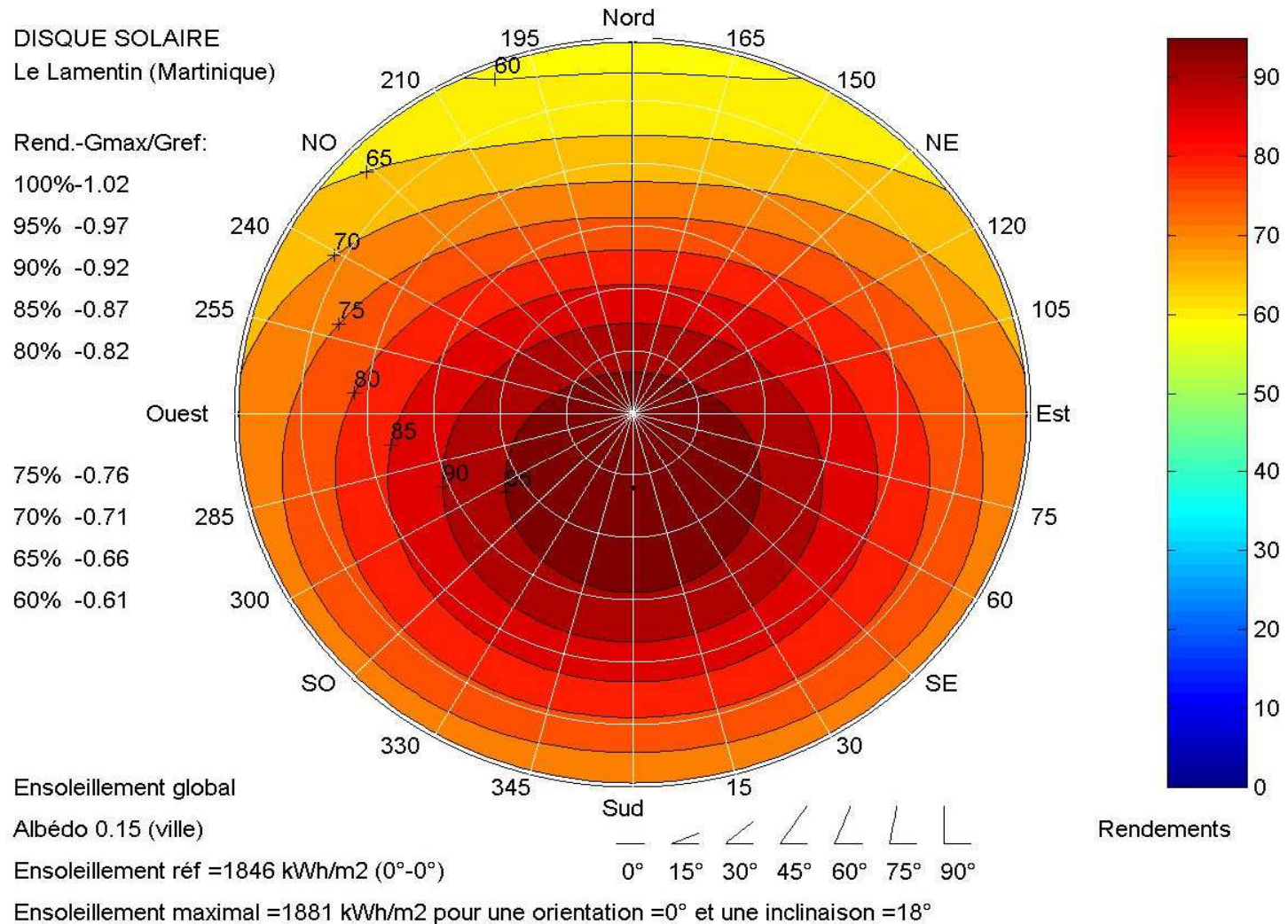


Irradiation fonction de l'inclinaison & orientation

FACTEURS DE CORRECTION POUR UNE INCLINAISON ET UNE ORIENTATION DONNEES					
INCLINAISON		☀	☀	☀	☀
ORIENTATION		0°	30°	60°	90°
Est	→	0,93	0,90	0,78	0,55
Sud-Est	↘	0,93	0,96	0,88	0,66
Sud	↓	0,93	1,00	0,91	0,68
Sud-Ouest	↙	0,93	0,96	0,88	0,66
Ouest	←	0,93	0,90	0,78	0,55

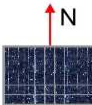

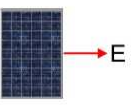
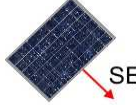
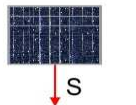
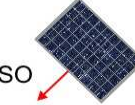
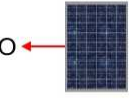










Irradiation fonction de l'inclinaison & orientation



Irradiation fonction de l'inclinaison & orientation

Ci-dessous les facteurs de corrections du gisement solaire (par rapport à une inclinaison de 18° et orientation Sud) selon une inclinaison et une orientation donnée (Latitude du Lamentin Martinique)

Orientation \ Inclinaison								
0° 	98	98	98	98	98	98	98	98
15° 	91	93	96	98	100	98	96	93
30° 	80	83	90	95	97	95	90	83
45° 	65	78	82	87	89	87	82	78
60° 	50	60	72	77	76	77	72	60
90° 	30	40	51	51	46	51	51	40

 Position à éviter si elle n'est pas imposée par des contraintes architecturales

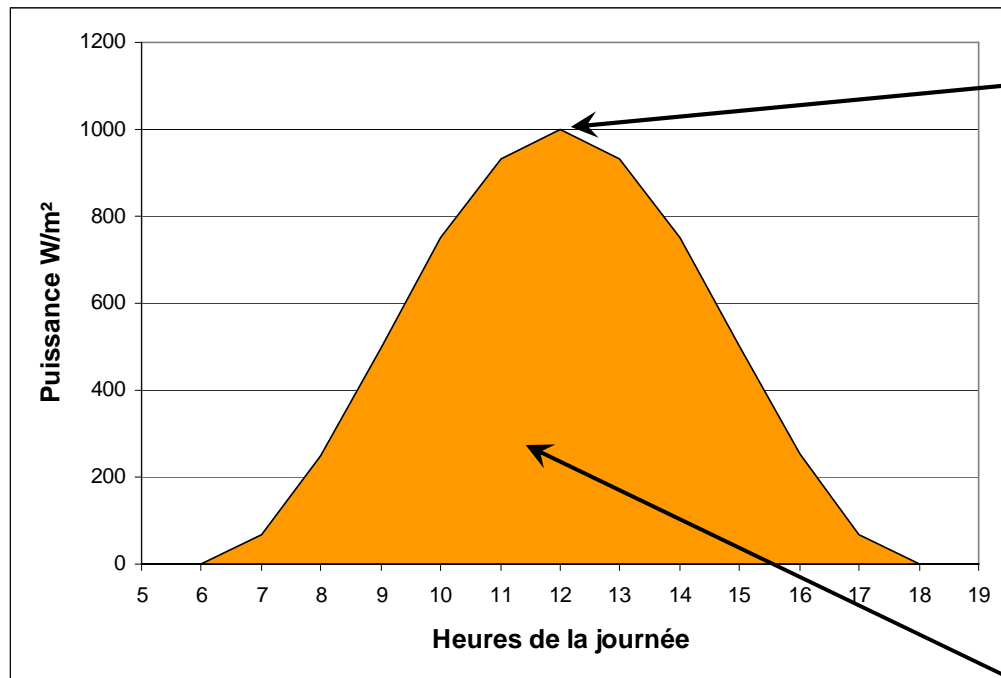
Inclinaison optimale

Latitude	Ville se situant à cette latitude	Inclinaison optimale des modules photovoltaïques(°)
58 ° NORD	Stockholm (Finlande)	39 °
53 ° NORD	Hambourg (Allemagne)	36 °
49 ° NORD	Paris (France)	35 °
45 ° NORD	Lyon (France)	34 °
43 ° NORD	Marseille (France)	34 °
38 ° NORD	Athènes (Grèce)	31 °

A Tunis, l'inclinaison optimale est autour de 31° (PVSYST)

Puissance solaire sur une journée, en W/m^2

Exemple d'une journée « théorique » de 12h, proche de l'équateur, sans nuage



Puissance solaire reçue au sol à différentes heures de la journée

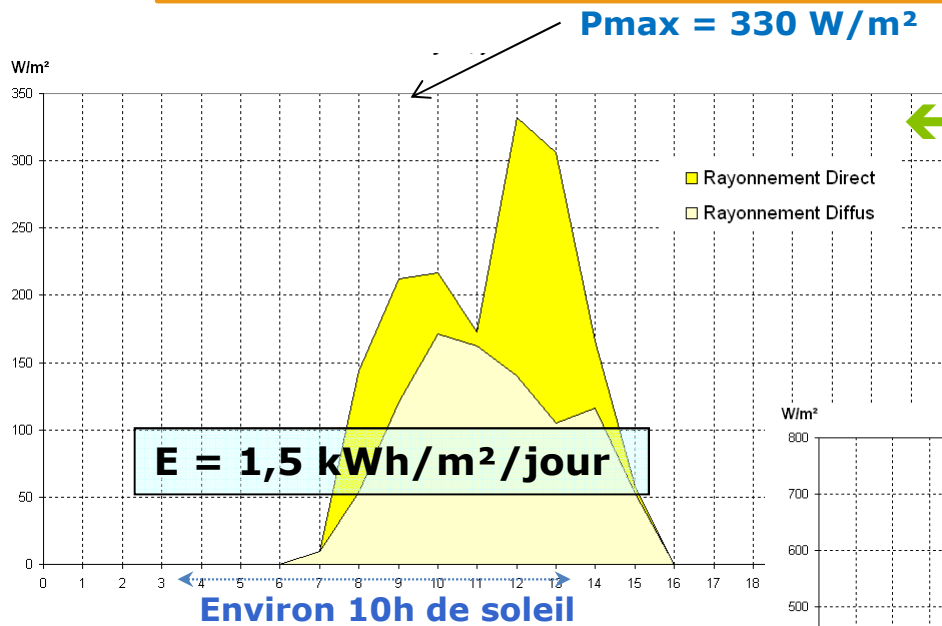
Le maximum de puissance est obtenu au midi solaire

On dépasse peu souvent $1000W/m^2$ sur terre

L'énergie solaire reçue pendant cette journée sera égale à la surface sous la courbe.

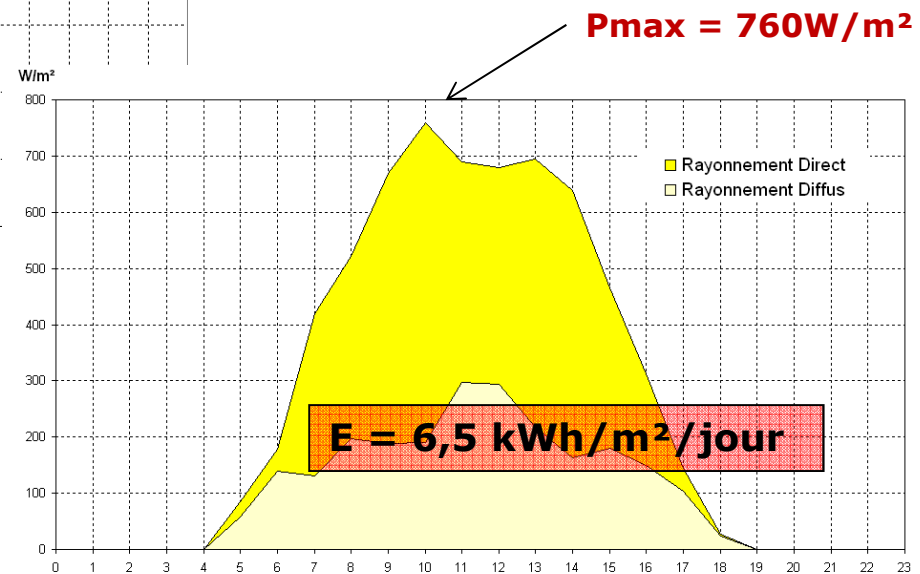
A comparer en Autoconsommation avec la courbe de charge

Conditions météorologiques, saisons, et heures de la journée: exemple à Lyon, dans le plan horizontal

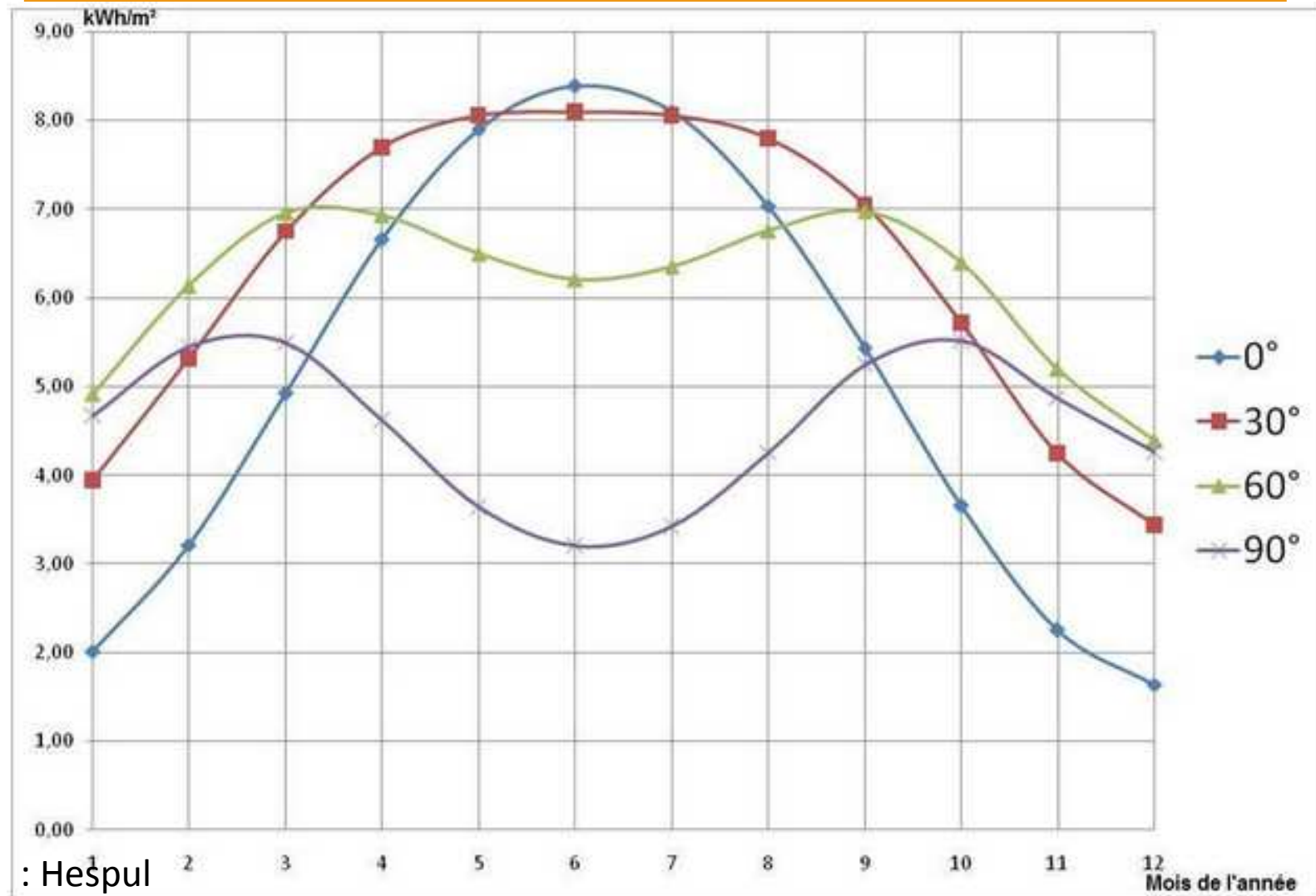


← Un jour d'hiver ordinaire par ciel assez couvert 75 % de diffus

Un beau jour d'été → 30% de diffus

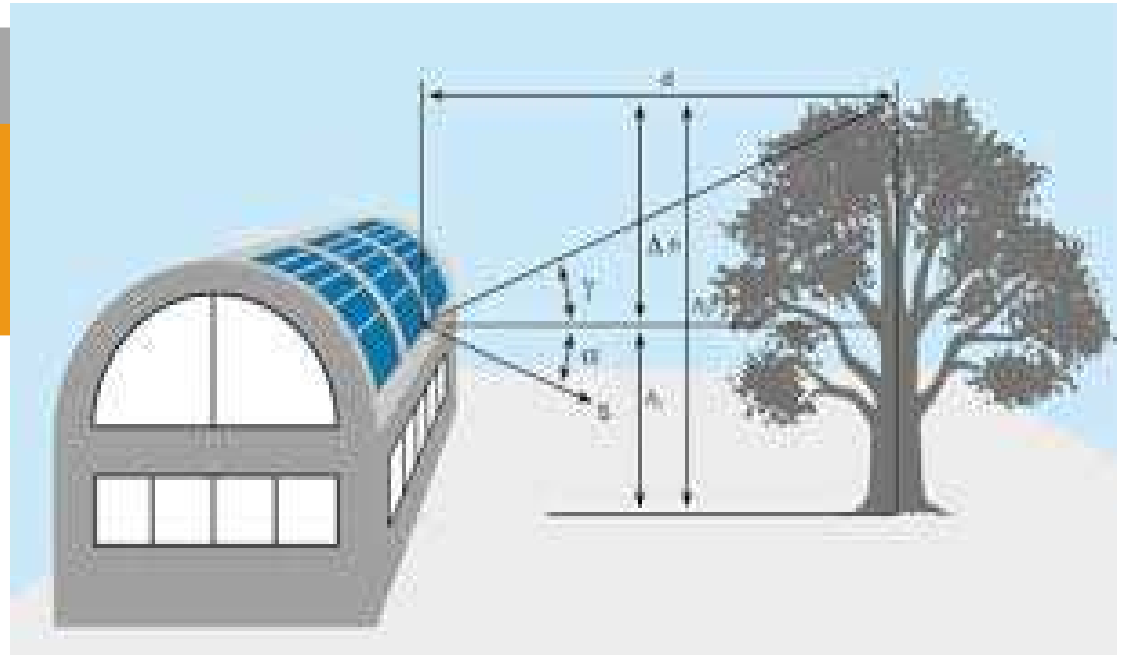


Production à Lyon (fonction de l'inclinaison)



Source : Hespul

Ombrages



- L'angle alpha est le complément à 90° de $34+23,5^\circ$ soit $32,5^\circ$. A Tunis (latitude 36°), à midi solaire, le soleil est au plus bas de l'année le 21/12 à 12h20 et le soleil est en élévation de 32° .
- On a $\tan \phi = (h-h_1)/d$
- Or $\tan (32^\circ) = 0.64$ et donc $d = (h-h_1) / 0.64$ et il vient $d = 1.6 (h-h_1)$ que l'on peut arrondir à :
 $d = 2 (h-h_1)$.

Les bases de données d'ensoleillement

- Les mesures
 - Pyranomètres, solarimètres, stations météorologiques
 - Mesures satellites
 - Les mesures dépendent des outils et de leur calibrage
- Les bases de données existantes
 - Il existe de nombreuses bases de données d'ensoleillement (Meteonorm, Meteostat, PVGIS, Nasa...) n'affichant pas toutes les mêmes résultats.
 - Plusieurs outils de calcul des effets de l'orientation et de l'inclinaison sont disponibles sur le web, auprès des fournisseurs, ou dans des logiciels spécifiques.
 - Attention: toujours considérer une marge d'incertitude