

Cours de l'énergie solaire photovoltaïque

Partie I : Cellule, module et champ photovoltaïques

Taïb AJZOUL,
Professeur au Département de Physique (FS de Tétouan)

Chapitre I - Rappels sur le rayonnement solaire et l'Effet photovoltaïque

Chapitre II - Cellule, module et champ photovoltaïques

Chapitre III - Composants des installations photovoltaïques

Ce cours a été préparé en se basant sur plusieurs références. Particulièrement pour l'illustration par des figures et des images, on distingue l'utilisation du guide du photovoltaïque DGS, réalisée par EdiSun Power.

Chapitre I – Rappels sur le rayonnement solaire et l'Effet photovoltaïque

Taïb AJZOUL, Professeur au Département de Physique (FS de Tétouan)

Sommaire

I- Introduction : Le solaire et les énergies renouvelables

II- Le Gisement Solaire

II-1- L'origine de l'énergie solaire

II-2- Puissance dégagée par le Soleil

II-3- L'intensité du rayonnement au niveau de la Terre

II-4- Energie annuelle reçue par les continents

II-5- La densité du flux solaire en fonction de la période de l'année

II-6- Densité de flux solaire et localisation

II-7- Repérage du soleil dans le ciel

II-8- Effets atmosphériques sur le rayonnement

II-9- Effets de l'orientation et de l'inclinaison

Sommaire

III- L'effet photovoltaïque

III-1- Définition

III-2- Semi-conducteur dopé N et semi-conducteur dopé P

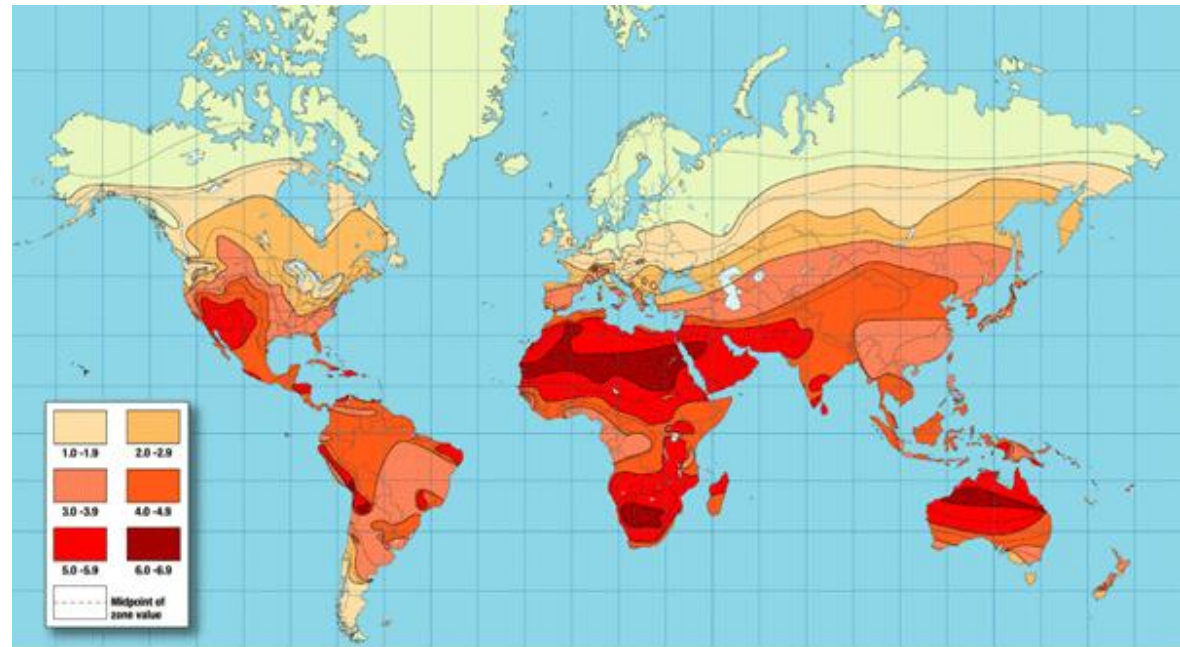
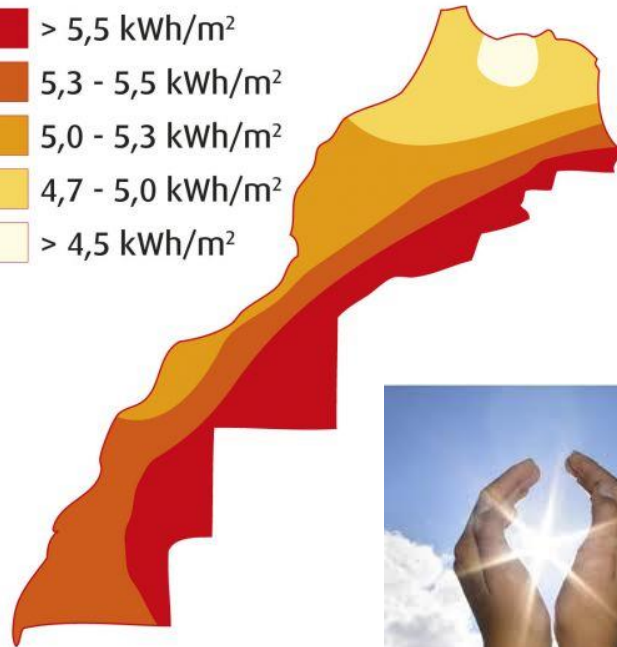
III-3- Structure électronique du silicium (Si), du phosphore (P) et du Bore (B)

III-4- Déplacement des charges et création d'un courant continu

III-5- De la cellule au champ photovoltaïque

Le gisement solaire

- > 5,5 kWh/m²
- 5,3 - 5,5 kWh/m²
- 5,0 - 5,3 kWh/m²
- 4,7 - 5,0 kWh/m²
- > 4,5 kWh/m²



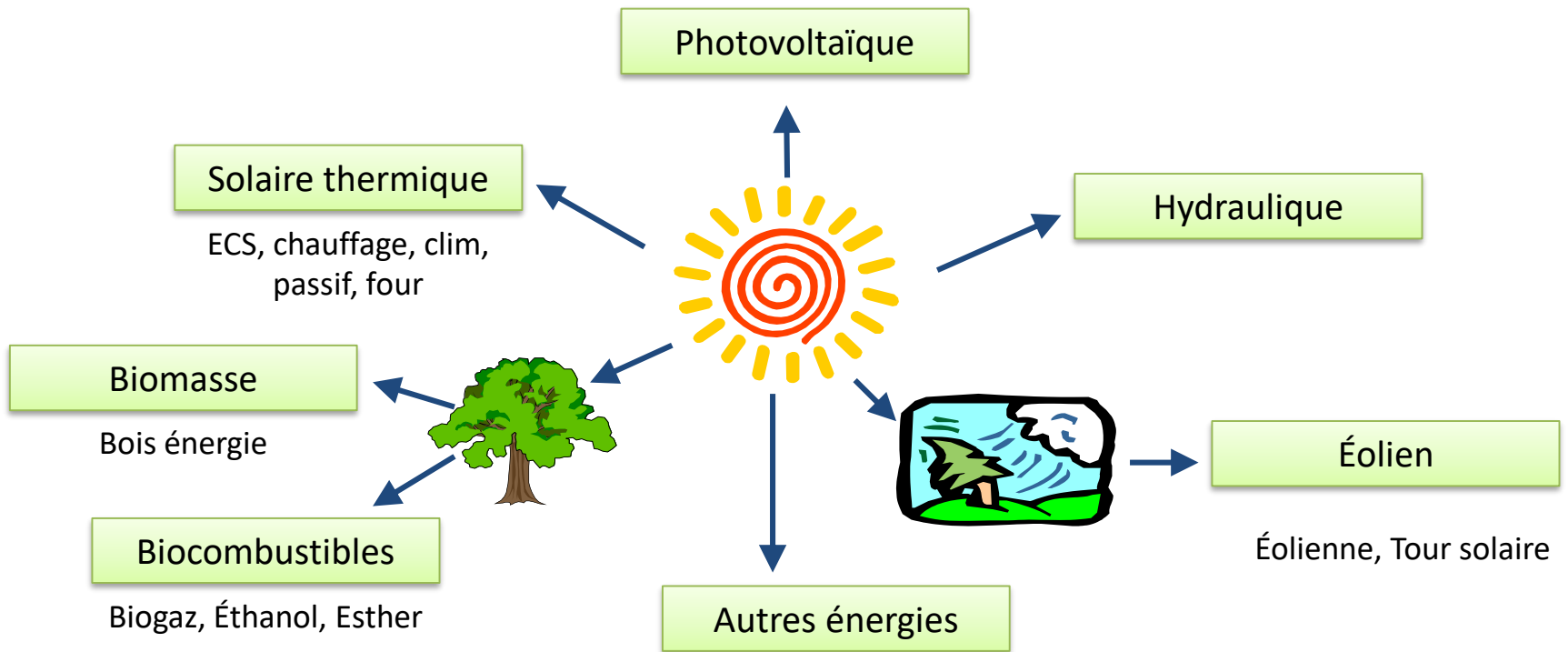
L'origine de l'énergie solaire



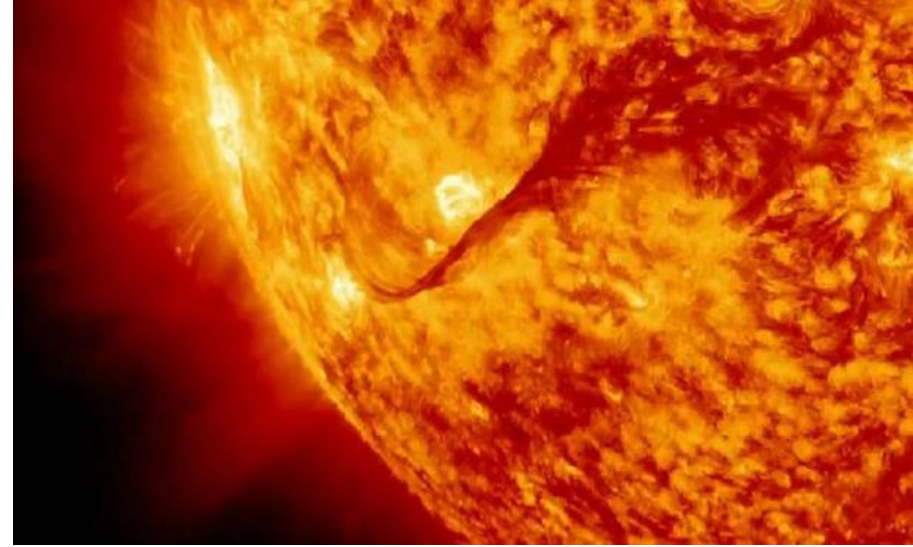
L'astre solaire est une étoile de 1 400 000 km de diamètre (110 fois celui de la Terre) au sein duquel se produit une réaction de fusion (fusion d'hydrogène en hélium) **générant d'énormes quantités d'énergie.**

Une toute **petite partie de cette énergie arrive sur la Terre**, par rayonnement électromagnétique.

Le soleil est à l'origine des énergies renouvelables et d'autres énergies



Puissance dégagée par un astre



Loi de Stefan-Boltzmann :

La puissance dégagée par un astre est proportionnelle à sa température de surface à la puissance 4 :

$$P_{\text{dégagée}} = S \times \sigma \times T^4$$

S : Aire de l'astre.

σ : Constante de Stefan – Boltzmann

$$\simeq 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

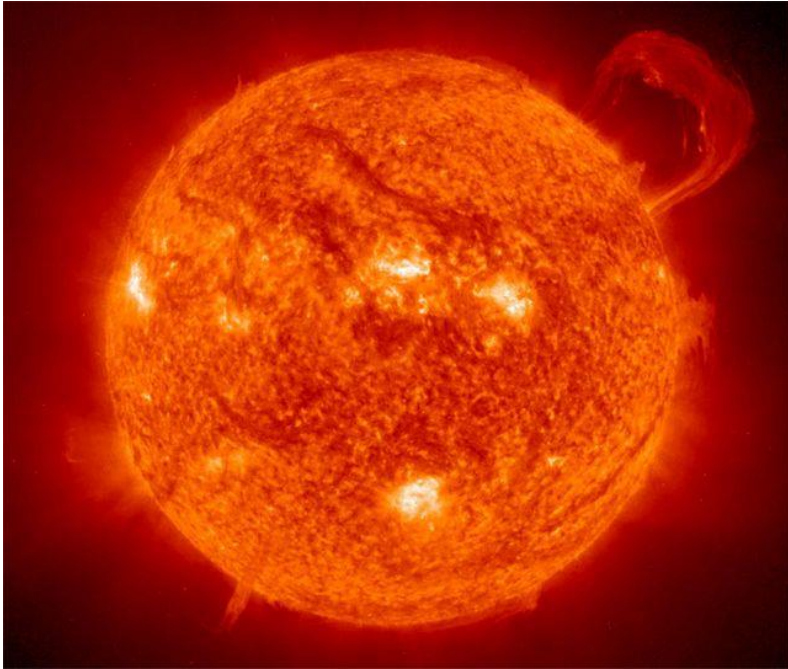


Jožef Stefan



Ludwig Eduard Boltzmann

Puissance dégagée par le Soleil



Aire de la surface du Soleil :

$$**S = 4\pi R^2**$$

Avec $R = 696\,342\,000\text{ m}$

Température du Soleil :

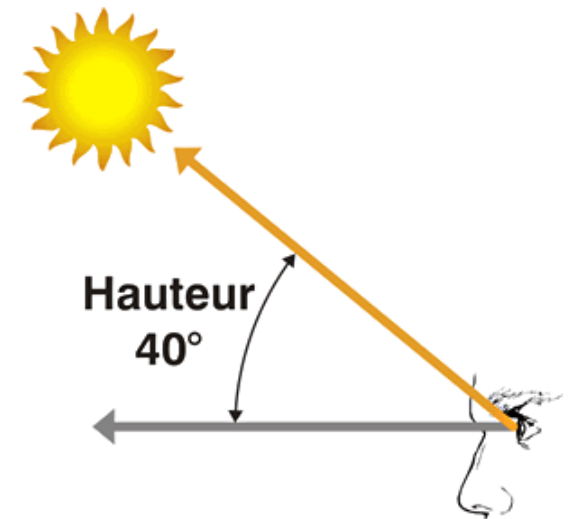
$$**T = 5778\text{ K (5505 °C).**$$

$$**P_{\text{dégagée par le Soleil}} \approx 3,85 \cdot 10^{26}\text{ W}**$$

L'énergie solaire reçue en un point du globe

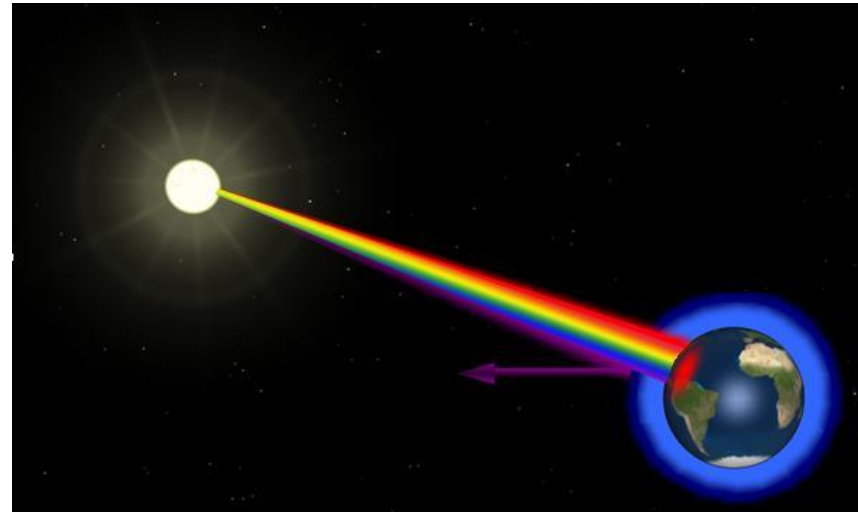
L'énergie solaire reçue en un point du globe dépend de :

- l'énergie solaire envoyée par le Soleil (fluctuations décennales, saisonnières, et ponctuelles).
- la nébulosité (nuages, brouillards, etc.).
- la latitude, la saison et l'heure, qui influent sur la hauteur du Soleil et donc sur l'énergie reçue au sol par unité de surface.



L'intensité du rayonnement au niveau de la Terre

L'intensité par m^2 du rayonnement au niveau de la terre est la puissance du soleil / l'aire de surface de la sphère de rayon Terre-soleil :



$$Intensité_{Terre} = 3,85 \times 10^{26} / (4\pi \times 149600000000^2) \simeq 1369 \text{ W/m}^2$$

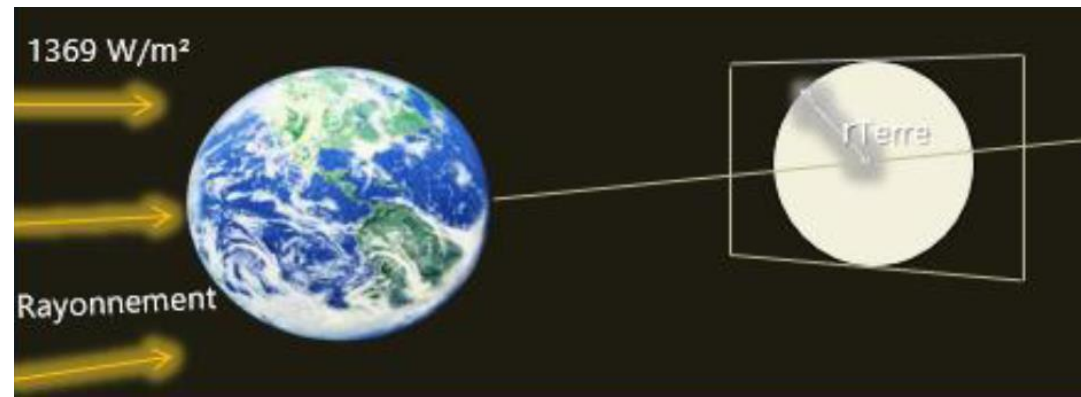
Puissance captée par la terre

Pour calculer la puissance totale reçue par la surface de la terre, on considère que le rayonnement solaire intercepté par la terre est approximativement le même que celui intercepté par un disque de même rayon que la terre et qui ferait face au rayonnement :

$$P_{\text{captée par la terre}} = 1369 \times \pi \times 6371000^2 = 17,4 \cdot 10^{16} \text{ W}$$

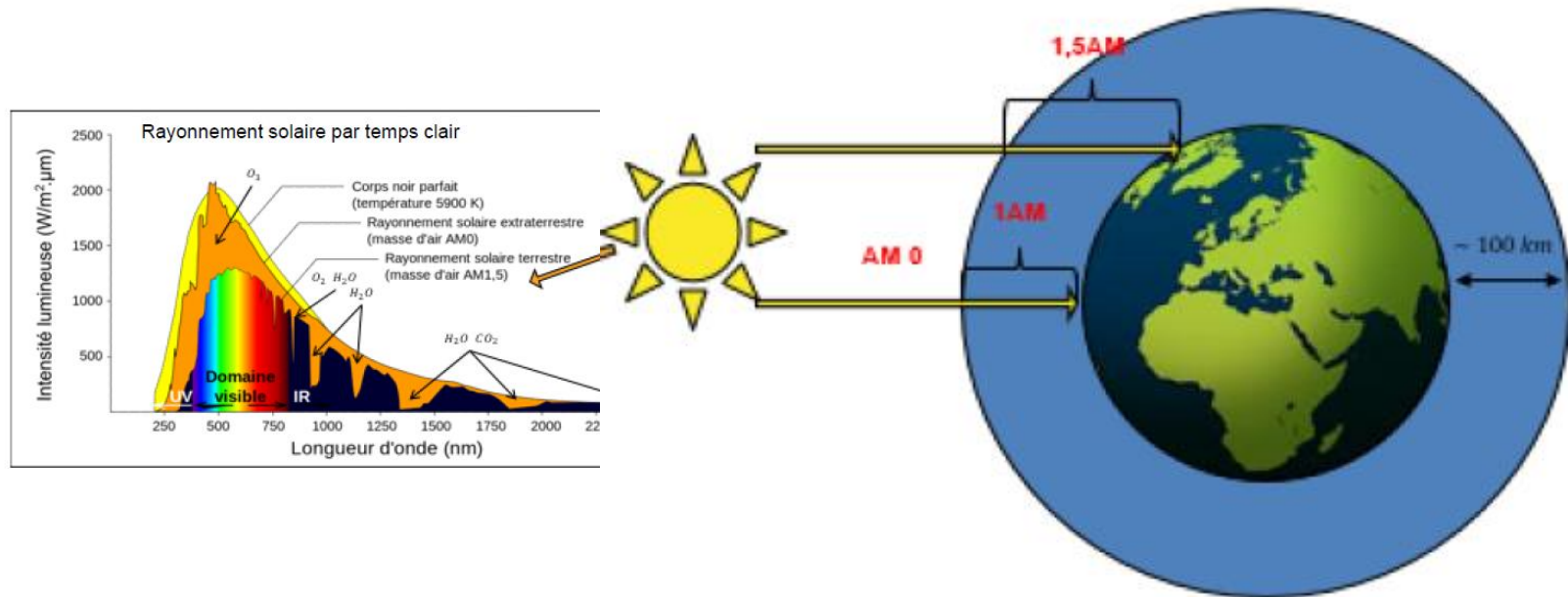
C'est la puissance captée par la terre avant de traverser l'atmosphère (Air Mass 0).

$$P_{\text{captée par la terre}} \ll P_{\text{dégagée_Soleil}} \approx 3,85 \cdot 10^{26} \text{ W.}$$



Spectre normalisé du soleil à 1,5 Air Mass

AM : Air Mass ou masse d'air : quantité d'atmosphère terrestre traversée par la lumière pour atteindre l'observateur



Plus AM est grand et plus l'atténuation est forte. Mais ça dépend aussi du Trouble de Linke (Trouble atmosphérique dû à la vapeur d'eau, la brume, aux fumées, aux poussières...).

Energie annuelle reçue par les continents

Presque la moitié du rayonnement initial est soit absorbé soit réfléchi atteignent la surface de la Terre.

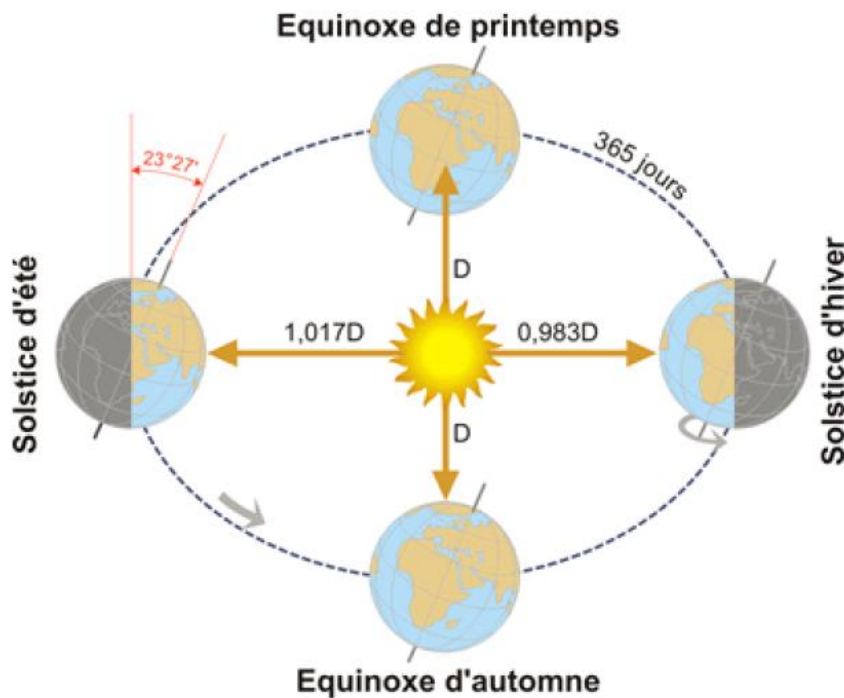
Seulement 29 % ($2,42 \cdot 10^{16}W$) arrive au terre ferme constituée par les continents.

$$\text{Energie annuelle reçue par les continents} = 2,42 \times 10^{16} \times 365 \times 24 \\ \simeq 210000 \times 10^9 \text{MWh}$$

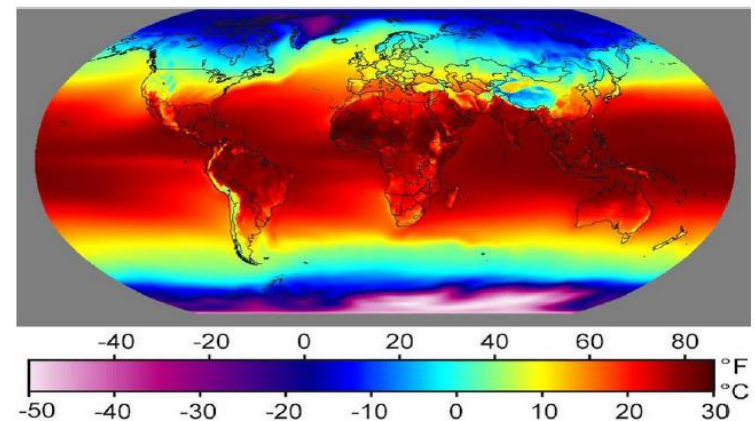
- Cette énergie est donc inépuisable et elle représente 1400 fois la consommation annuelle mondiale.
- Alors que les autres énergies ne font que diminuer (gaz, pétrole et charbon);
- C'est pourquoi l'être-humain s'intéresse beaucoup à cette énergie.

La densité du flux solaire dépend de la période de l'année

Le rayonnement solaire n'est pas uniforme au sol, il dépend de la période de l'année, de l'heure, de la localisation (longitude, latitude) et des conditions atmosphériques (Trouble de Link et météo).

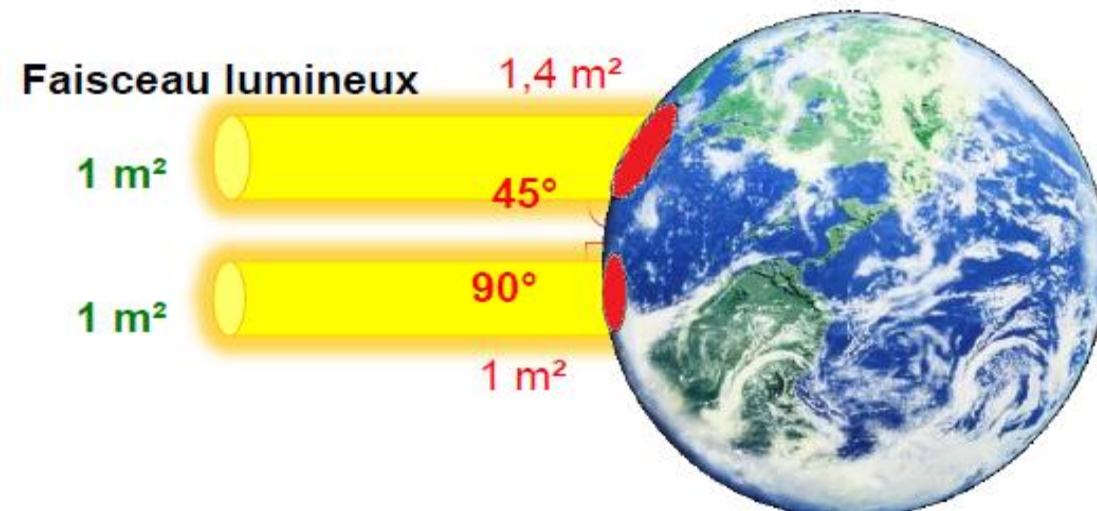


Carte de température moyenne annuelle



La densité du flux solaire dépend de la période de l'année

Plus on s'approche des pôles et plus le rayonnement est rasant, donc la surface à couvrir par la puissance est plus grande et le flux solaire par m^2 est plus réduit.



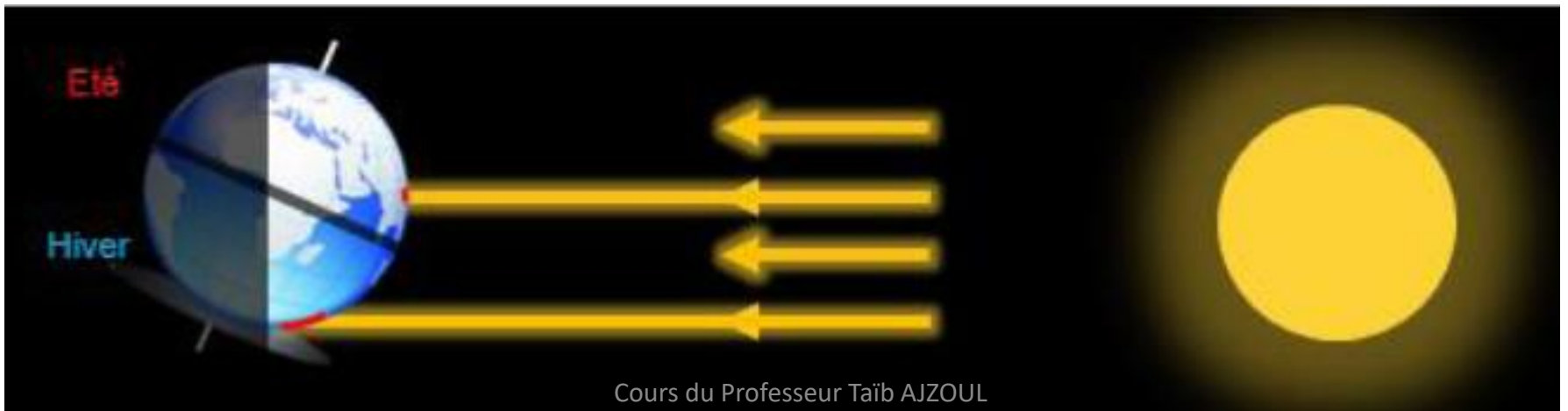
La densité du flux solaire dépend de la période de l'année, car suivant les saisons la quantité de rayonnement reçue change.

La densité du flux solaire dépend de la période de l'année

Pôle Nord incliné vers le soleil

La surface est plus petite dans l'hémisphère nord pour un rayonnement de même taille (il fait plus chaud au pôle nord)

➡ Eté au pôle nord et l'hiver au pôle sud.

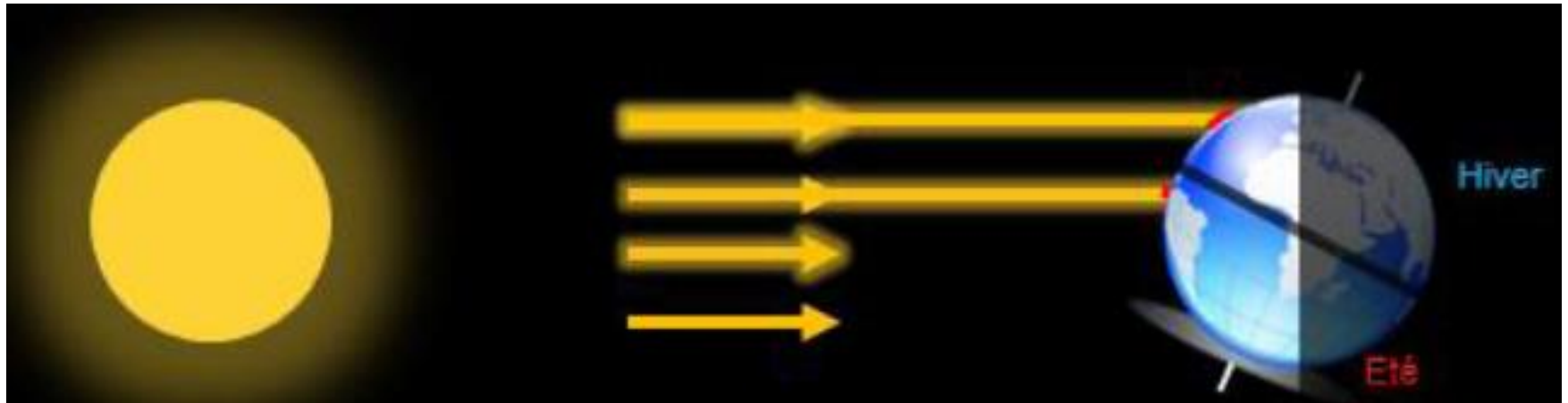


La densité du flux solaire dépend de la période de l'année

Pôle Sud incliné vers le soleil

La surface est plus grande dans l'hémisphère nord pour un rayonnement de même taille (il fait plus froid au pôle nord)

➔ Hiver au pôle nord et l'été au pôle sud



Densité de flux solaire et localisation

Pôle Nord incliné vers le soleil

Il fait nuit d'abord dans l'hémisphère sud, puis à l'équateur et enfin dans l'hémisphère nord.

C'est pour cette raison que les journées sont longues dans l'hémisphère nord, courtes dans l'hémisphère sud et durent 12h à l'équateur.

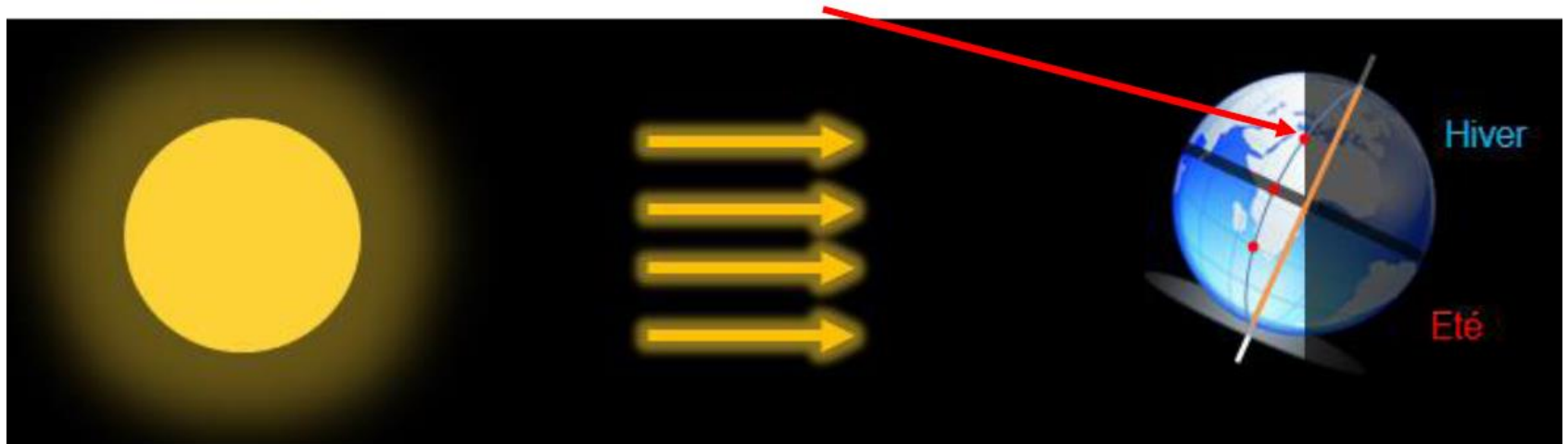
Le jour se lève d'abord dans l'hémisphère nord, puis à l'équateur et enfin dans l'hémisphère sud



Densité de flux solaire et localisation

Pôle Sud incliné vers le soleil : Il fait jour d'abord dans l'hémisphère sud, puis à l'équateur et enfin dans l'hémisphère nord. C'est pour cette raison que les journées sont longues dans l'hémisphère sud, courtes dans l'hémisphère nord et durent 12h à l'équateur.

La nuit apparaît d'abord dans l'hémisphère nord, puis l'équateur et enfin dans l'hémisphère sud.

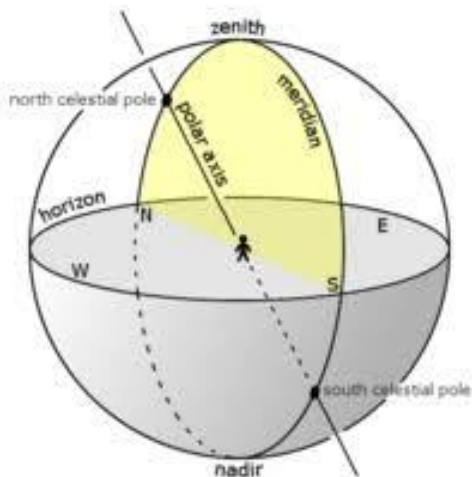


La densité du flux solaire dépend de la localisation, car suivant le lieu (Longitude, Latitude), le rayonnement reçu par jour change.

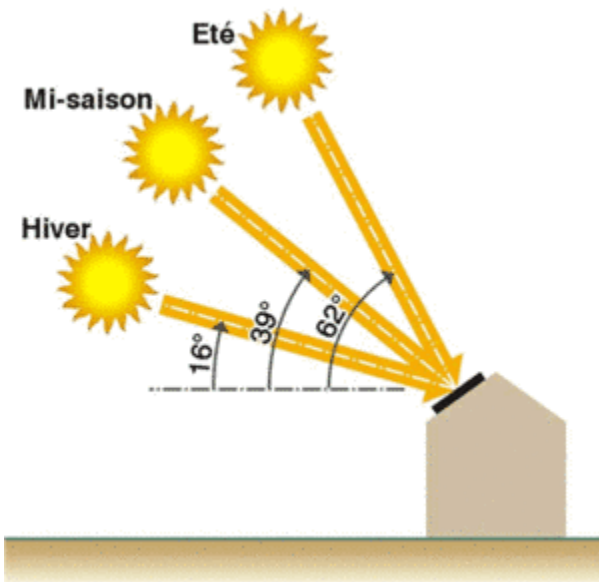
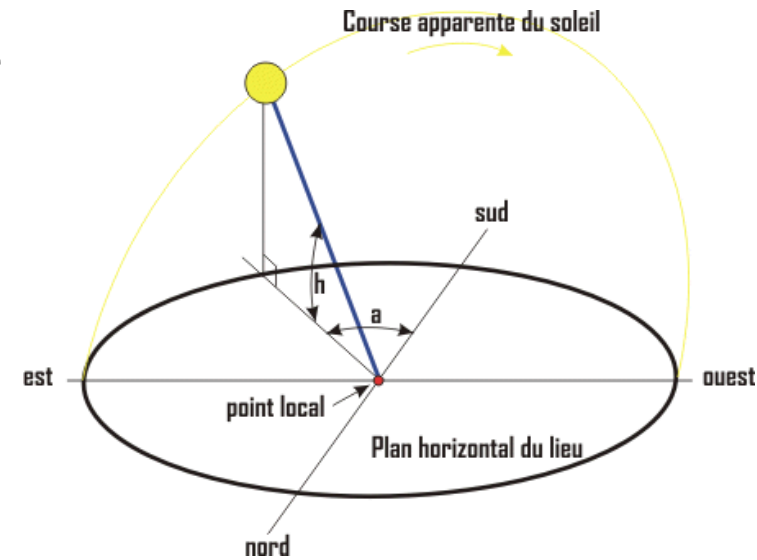
Repérage du soleil dans le ciel

Pour repérer la position du soleil dans le ciel, il est nécessaire d'utiliser deux coordonnées. Ce sont l'**azimut** et la **hauteur**.

L'**azimut solaire** est l'angle que fait le plan vertical du soleil avec le plan méridien du lieu. On le mesure à partir du Sud, vers l'Est ou vers l'Ouest (0° pour le Sud, 180° pour le Nord).



La **hauteur du soleil** est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan horizontal.



Effets atmosphériques sur le rayonnement

Trouble de Link : Trouble atmosphérique d'un ciel clair (pas de nuages) dû à la vapeur d'eau, de la brume, de la poussière, ...



La distance de visibilité donne une idée de la transparence de l'atmosphère.



*Visibilité
supérieure
à 350 km*



*Visibilité
comprise entre
200 et 350 km*



*Visibilité
comprise entre
130 et 170 km*



*Visibilité
comprise entre
60 et 100 km*



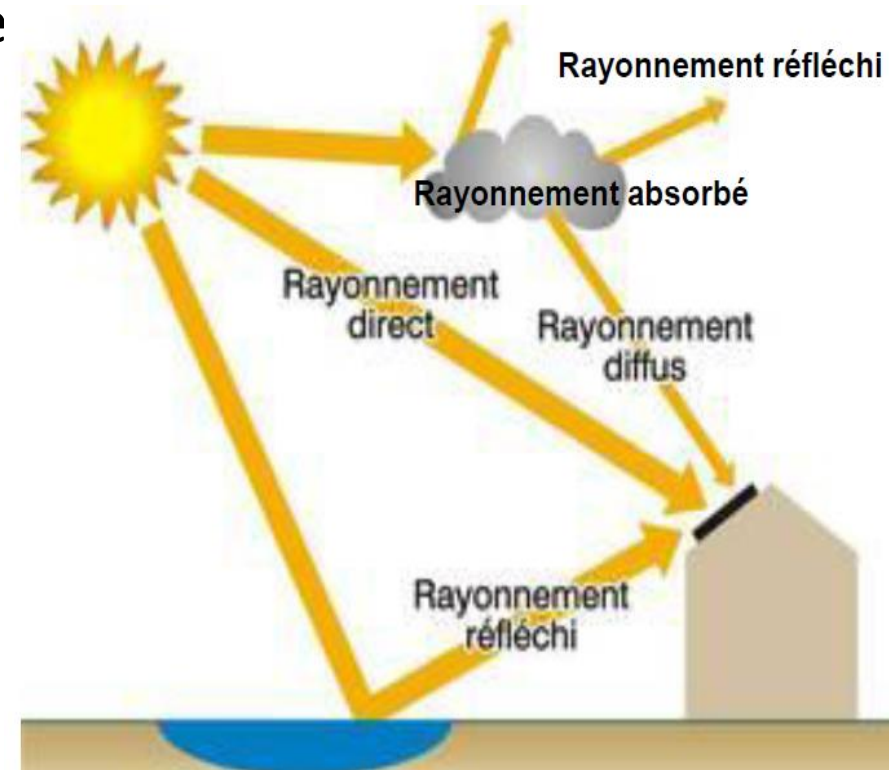
*Visibilité
inférieure
à 60 km*

Effets atmosphériques sur le rayonnement :

La météo

Le rayonnement solaire reçu par une surface inclinée (Rayonnement Global), c'est la somme des composantes suivantes :

- La composante directe (Beam) : Rayonnement reçu directement du soleil
- La composantes réfléchie : Rayonnement reçu par le sol, il dépend du type de sol (Albedo)
- La composantes diffus : Rayonnement reçu par le reste de la voûte céleste



<http://www.thinkovery.com/le-role-des-nuages-dans-le-rechauffement-climatique>

Effets atmosphériques sur le rayonnement :

La météo

Si la surface est horizontale, le rayonnement réfléchi est nul.

Valeur type d'albédo :

0.15 Champ cultivé, Bitume

0.20 Terre labourée, Pavés, Cailloux, Pierre

0.25 Sable sec, Prairies, Herbages, Sol ciment, Gravier

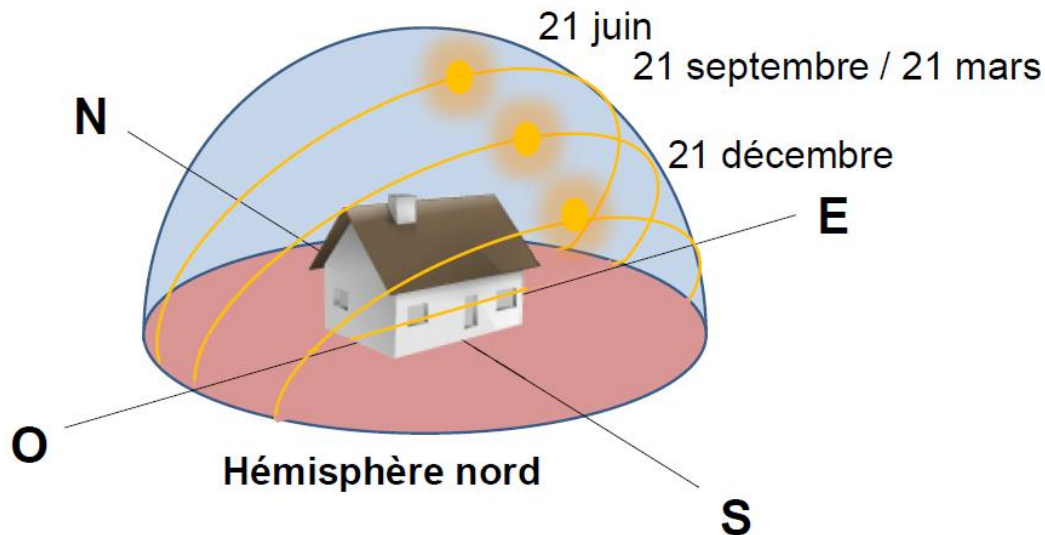
0.30 Désert, mer

0.60 Neige ancienne

0.80 Neige fraîche, Peinture blanche, Chaux, Plâtre blanc sec

Effets de l'orientation et de l'inclinaison

Un capteur PV produit le maximum, lorsqu'il est perpendiculaire aux rayons du soleil. Il doit être orienté plein sud dans l'hémisphère nord et plein nord dans l'hémisphère sud.



La position du soleil varie constamment en fonction de la période et de l'heure

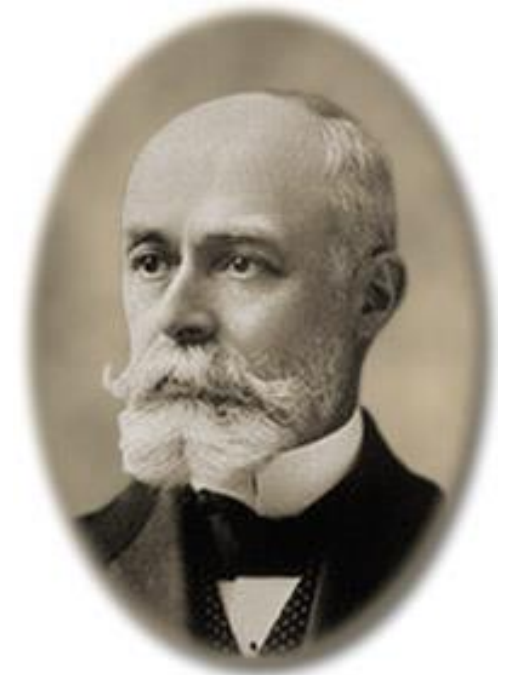
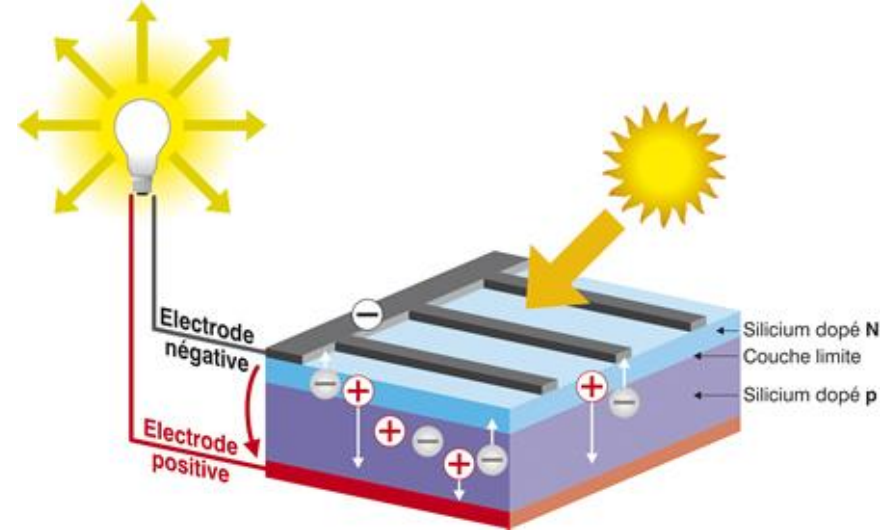
Pour avoir le maximum de production tout au long de l'année, il faut choisir aussi une inclinaison qui tienne en considération les différentes élévations du soleil mais sans oublier la quantité d'irradiation qui est proportionnelle à la hauteur solaire.

L'effet photovoltaïque

Définition

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés semi-conducteurs qui produisent de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière.

Il à été découvert en 1839 par le physicien français **Alexandre-Edmond Becquerel**.

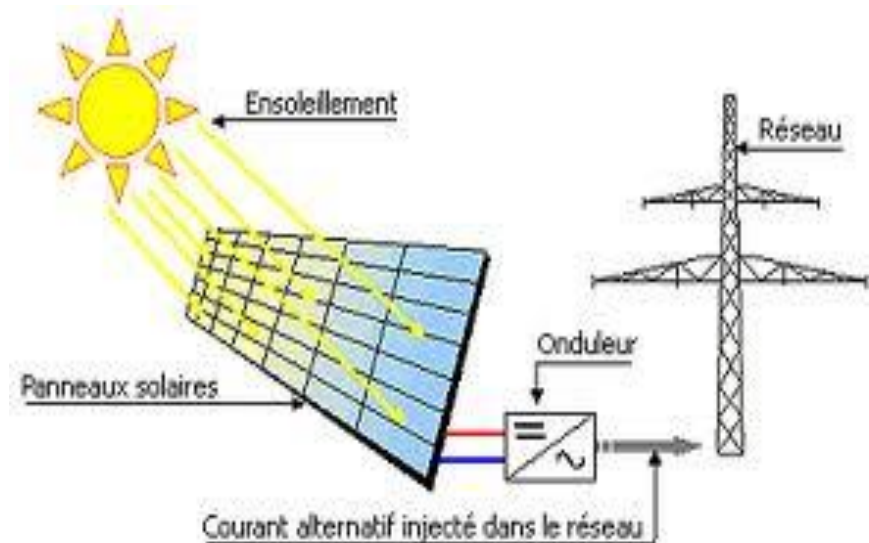


Alexandre Edmond Becquerel
(1820-1891)

L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été peu utilisé jusqu'au début des années 1960 où il a connu un développement important du fait de ses applications spatiales.

L'électricité photovoltaïque est aujourd'hui largement répandue notamment dans le domaine de l'injection au réseau électrique.



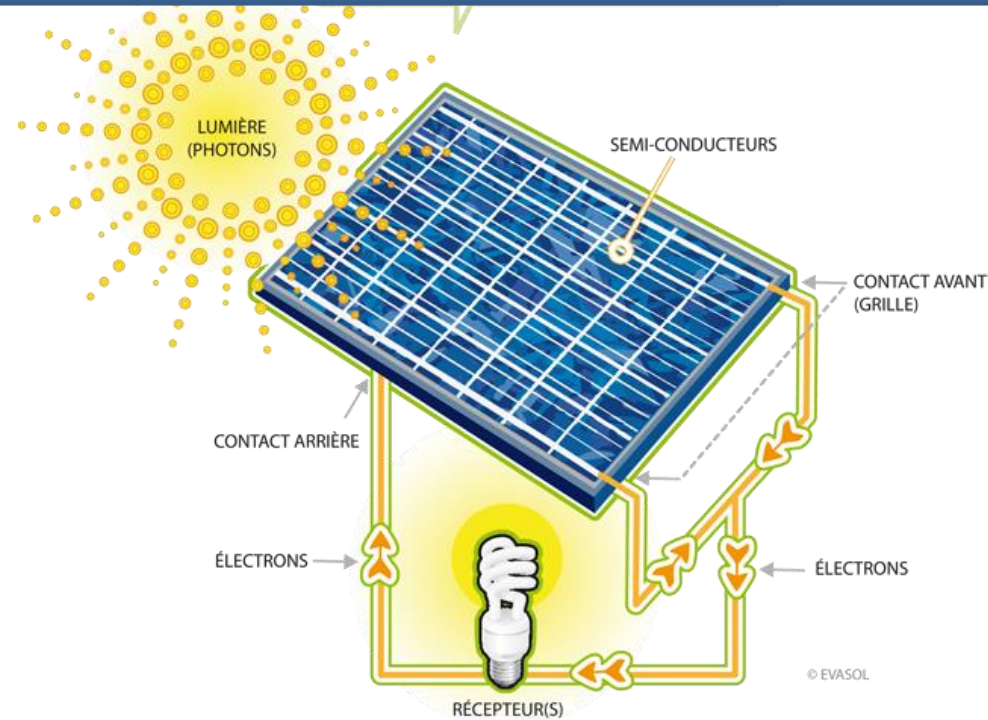
Histoire de l'effet photovoltaïque

- 1839 : effet photovoltaïque découvert par Edmond Becquerel
- 1877 : première cellule PV au sélénium
- 1922 : Einstein obtient le prix Nobel de physique pour ses travaux sur l'effet photo-électrique
- 1954 : premières cellules PV au silicium avec rendement plus élevé (4,5 % à 6%)
- 1955 : première commercialisation de cellules PV 14 mW.
- 1958 : satellite avec cellules PV

Définition l'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est la transformation de l'énergie solaire en énergie électrique, ce qui met en jeu trois phénomènes physiques liés et simultanés :

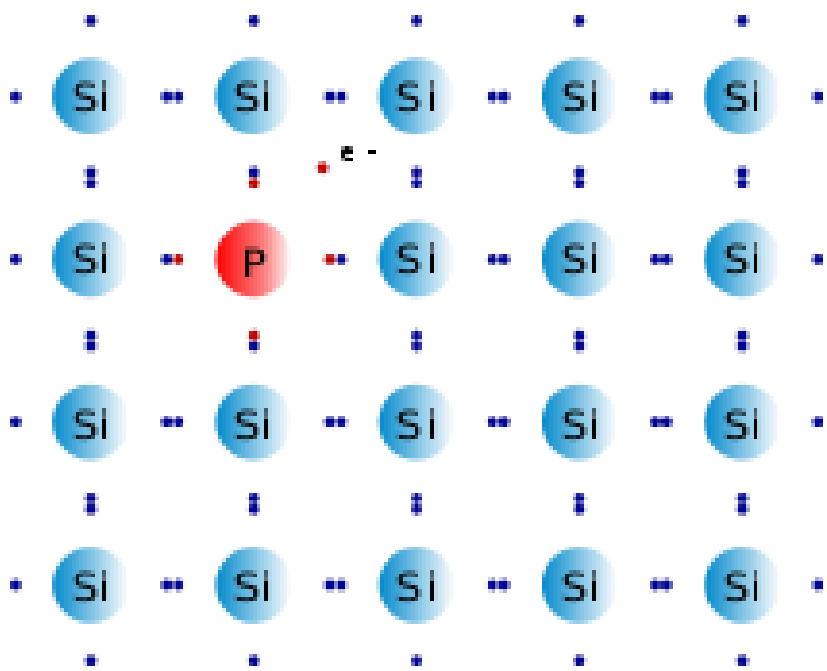
- l'absorption de la lumière dans le matériau,
- le transfert d'énergie des photons aux particules chargées électriquement
- la collecte des charges.



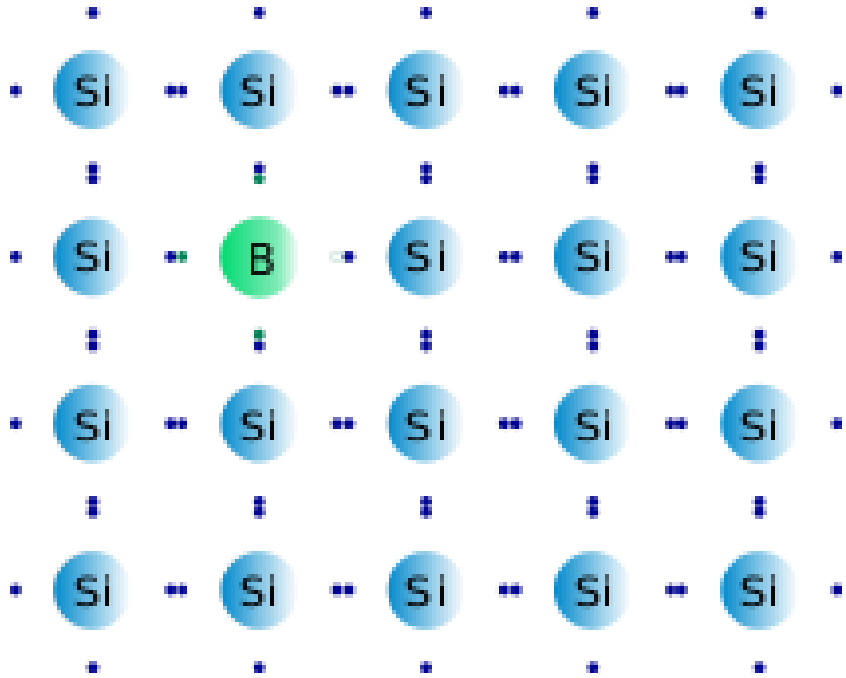
Semi-conducteur dopé N et Semi-conducteur dopé P

- Les panneaux sont un assemblage de cellules photovoltaïques, soudées les unes aux autres. Chacune de ces cellules est constituée de deux couches d'un matériau semi-conducteur, en général du silicium, qui est extrait de la silice.
- La couche supérieure de la cellule (Semi-conducteur dopé N) est dopée négativement grâce à un élément chimique qui contient plus d'électrons que le silicium (le phosphore par exemple).
- La couche inférieure (Semi-conducteur dopé P) dont la polarité est dopée positivement grâce à un élément chimique qui contient moins d'électrons que le silicium (le bore par exemple).

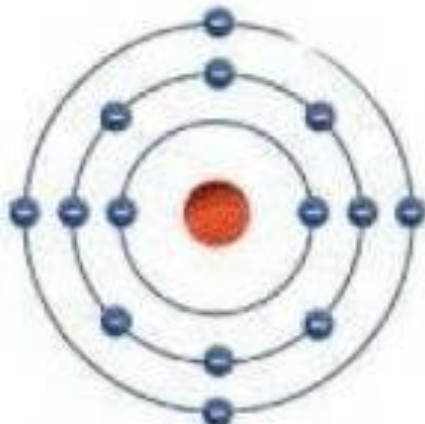
- **Dopage de type N**, qui consiste à produire un excès d'électrons, qui sont négativement chargés



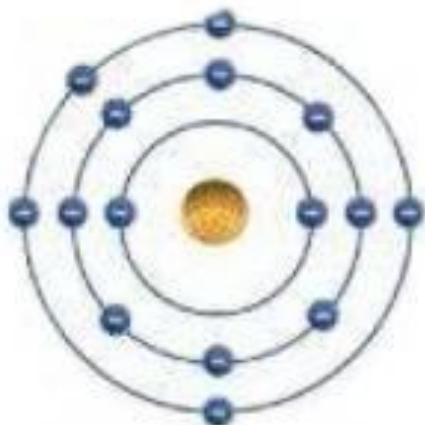
- **Dopage de type P**, qui consiste à produire un déficit d'électrons, donc un excès de trous, considérés comme positivement chargés



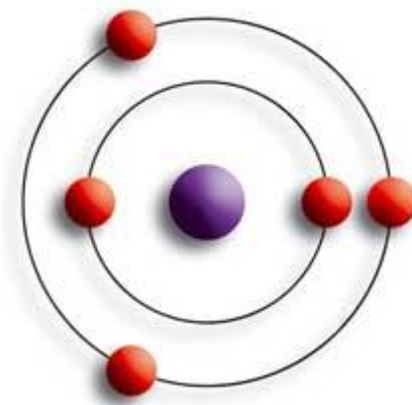
Structure électronique du silicium (Si), du phosphore (P) et du Bore (B)



Structure électronique du silicium (Si)
La couche de valence est alors constituée de 4 électrons célibataires pouvant former des liaisons

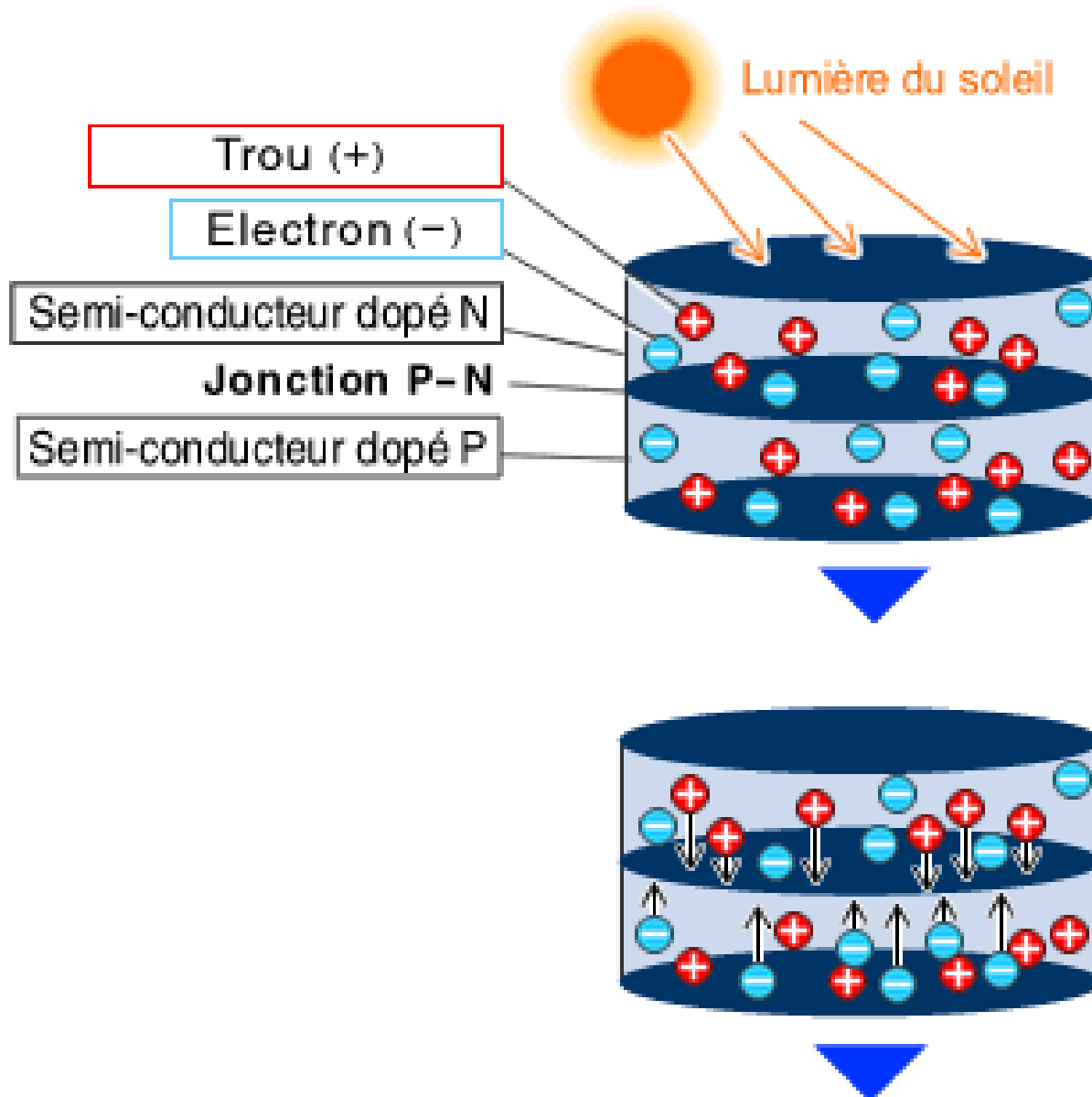


Structure électronique du phosphore (P)
La couche de valence est alors constituée de 5 électrons célibataires pouvant former des liaisons



Structure électronique du Bore (B)
La couche de valence est alors constituée de 3 électrons célibataires pouvant former des liaisons

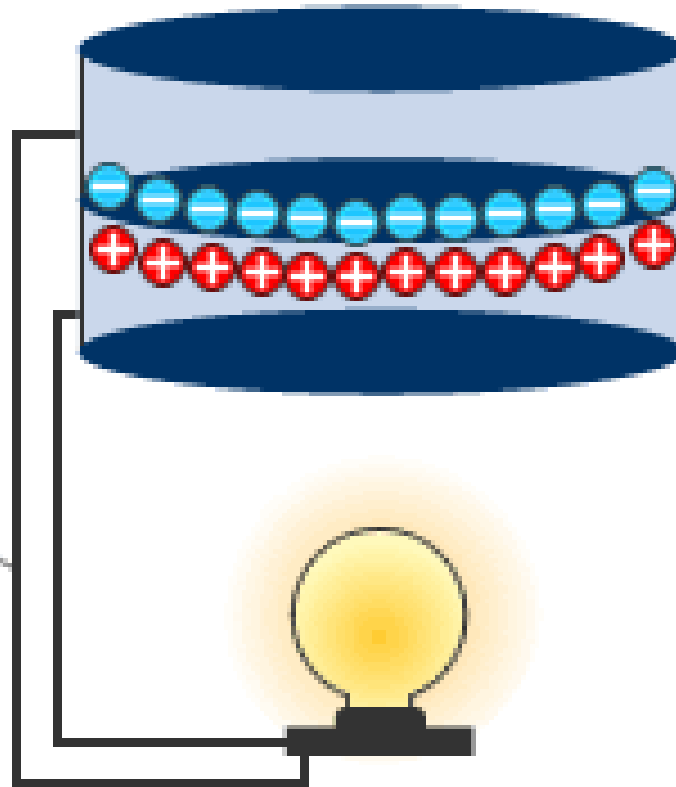
Déplacement des charges vers la jonction P-N



Sous l'action du rayonnement de la lumière du soleil, les électrons sont « décrochés » de leurs atomes.

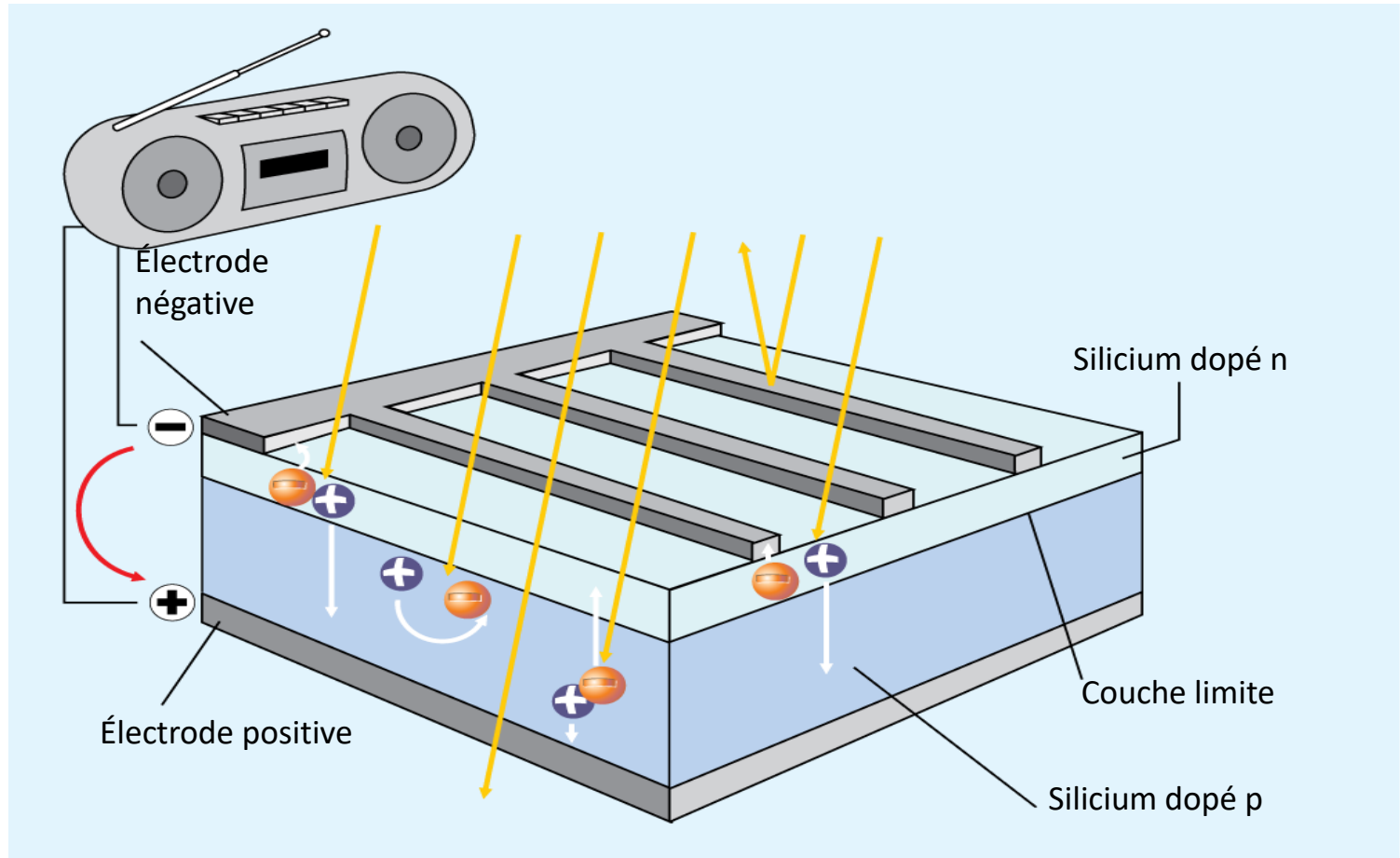
Les « trous » et les électrons commencent à se déplacer vers la jonction P-N.

Déplacement des charges et création d'un courant continu



Quand les trous rejoignent les électrons au niveau de la jonction P-N, une tension est générée. Si une connexion extérieure est établie, un courant électrique continu est créé.

Déplacement des charges dans une cellule photoélectrique



Vidéos sur le principe de fonctionnement de l'énergie solaire photovoltaïque

<https://www.youtube.com/watch?v=7BUjVyw5LaM>

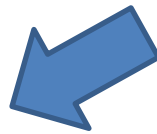
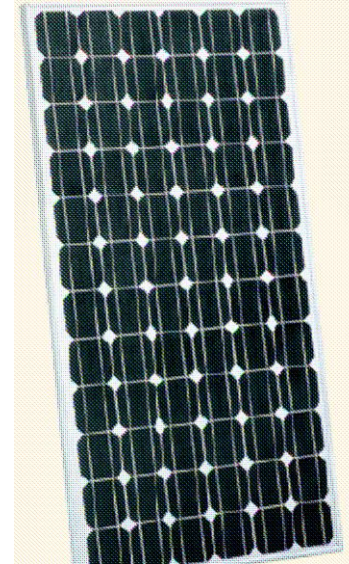
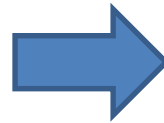
<https://www.youtube.com/watch?v=LyT-kWw0UXY>

[https://www.youtube.com/watch?v=23i- v tWTA](https://www.youtube.com/watch?v=23i-v_tWTA)

De la cellule au champ photovoltaïque



Cellule photovoltaïque.



Plusieurs cellules reliées entre elles forment un module (ou panneau ou un capteur) solaire photovoltaïque.

Plusieurs modules regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque.

Merci pour votre attention