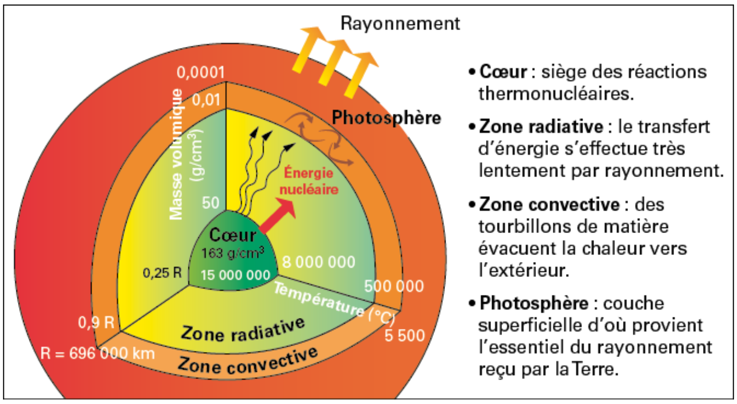
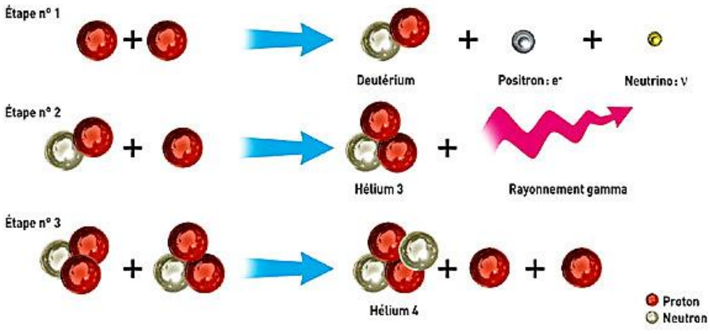
Le rayonnement solaire

I Le Soleil et la fusion nucléaire

1) La fusion nucléaire au cœur du Soleil



Chaîne « proton-proton » :



Vidéo : La fusion au cœur des étoiles : https://youtu.be/1aKLyPoDjVE

1) Sous quel état se trouve la quasi-totalité de la matière de l'Univers ? **Sous forme de plasma.**
2) De quoi est composée chaque étoile ? **De plasma, un mélange de protons et d'électrons.**
3) Quelle est la force qui fait s'effondrer le nuage de gaz lors de la formation d'une étoile ? **La gravité.**
4) Quelle est la température au centre d'une étoile comme le Soleil ? **15 millions de degrés.**
5) Quel est le carburant majeur des étoiles ? **L'hydrogène.**
6) Combien faut-il de réactions successives pour former l'hélium 4 ? **3 réactions.**
7) Quelle puissance dégage chaque centimètre cube du Soleil ? **300 microwatts.**
8) Comment une étoile compense-t-elle cette faible production d'énergie ? **Par son énorme masse.**
9) Compléter les réactions nucléaires suivantes formant la chaîne « proton-proton » :

Etape n°1 : $^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow \boldsymbol{{}^{2}_{1}\mathrm{H}} + {}^{0}_{1}\mathrm{e}^{+} + \text{neutrino}$

Etape n°2 : $^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow \boldsymbol{{}^{3}_{2}\mathrm{He}} + \text{rayonnements gamma}$

Etape n°3 : $^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{3}_{2}\mathrm{He} \longrightarrow \boldsymbol{{}^{4}_{2}\mathrm{He}} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}$

C'est la fusion nucléaire des atomes d'hydrogène en hélium qui est à l'origine de la très grande quantité d'énergie rayonnée par le Soleil.
Cette fusion s'effectue au cœur du Soleil, où règne une température d'environ 15 millions de degrés.

2) Principe d'équivalence masse-énergie

Le bilan des différentes étapes de fusion de l'hydrogène en hélium 4 peut se résumer ainsi :

$$4\ {}^{1}_{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 2\ {}^{0}_{1}\mathrm{e}^{+}$$

Données : • Masse $^{1}_{1}\mathrm{H}$: $1{,}672\ 62 \times 10^{-27}$ kg • Masse $^{4}_{2}\mathrm{He}$: $6{,}646\ 48 \times 10^{-27}$ kg
• Masse positron : $9{,}109 \times 10^{-31}$ kg

1) Déterminer la masse des réactifs composé des 4 atomes d'hydrogène.

$m(\text{réactifs}) = 4 \times m({}^{1}_{1}\mathrm{H}) = 4 \times 1{,}672\ 62 \times 10^{-27} = \underline{6{,}690\ 48 \times 10^{-27}\ \text{kg}}$

2) Déterminer la masse des produits composé de l'atome d'hélium et des deux positrons.

$m(\text{produits}) = m({}^{4}_{2}\mathrm{He}) + 2 \times m(\text{positon}) = 6{,}646\ 48 \times 10^{-27} + 2 \times 9{,}109 \times 10^{-31} = \underline{6{,}648\ 30 \times 10^{-27}\ \text{kg}}$

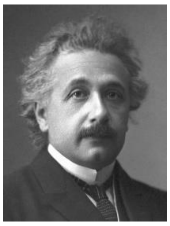
3) Que remarque-t-on ? Comment expliquer cette observation ?

La masse des produits est inférieure à la masse des réactifs (contrairement à une réaction chimique). La matière manquante a été transformée en énergie.

En 1905, Einstein postule qu'une particule au repos, du fait de sa masse, possède une énergie appelée énergie de masse E, telle que :

$$\boxed{E = m \times c^2}$$

E : Energie en joule (J)
m : masse en kilogramme (kg)
c : célérité de la lumière dans le vide ≈ $3{,}00 \times 10^8$ m.s^{-1}



Albert Einstein

Lors d'une réaction nucléaire, une quantité très importante d'énergie est libérée. D'après la relation d'équivalence entre la masse et l'énergie, une **libération d'énergie notée $E_{libérée}$** s'accompagne d'une **perte de masse notée Δm**, c'est-à-dire que la masse des produits est inférieure à la masse des réactifs.

L'énergie libérée par la réaction nucléaire et la perte de masse d'un système sont liées par la relation suivante :

$$\boxed{E_{libérée} = \Delta m \times c^2} \quad \text{ou} \quad \boxed{\Delta m = \frac{E_{libérée}}{c^2}}$$

Remarque : Pour obtenir une valeur positive de $E_{libérée}$, la perte de masse Δm doit être positive !

Exercice : Le soleil rayonne une puissance P = $3{,}85 \times 10^{26}$ W.

$$\boxed{E = P \times \Delta t}$$

Energie en joule (J) — Puissance en watt (W) — Durée en seconde (s)

1) Calculer l'énergie E rayonnée par le Soleil en 1 seconde.
$E = P \times \Delta t = 3{,}85 \times 10^{26}\ W \times 1\ s = \underline{3{,}85 \times 10^{26}\ J}$

2) Calculer la masse perdue par le Soleil chaque seconde à cause de son rayonnement.
$\Delta m = \frac{E_{libérée}}{c^2} = \frac{3{,}85 \times 10^{26}}{(3{,}00 \times 10^8)^2} = \underline{4{,}28 \times 10^9\ \text{kg par seconde}}$

Calcul à connaître !! Très souvent demandé en épreuve.

Le Soleil perd chaque seconde plus de 4 milliards de kilogrammes, soit une masse voisine de celle de la pyramide de Khéops !!

3) Proxima du Centaure est l'étoile la plus proche du système solaire. Cette étoile, beaucoup plus petite et plus froide que notre Soleil, rayonne une puissance d'environ $6{,}9 \times 10^{23}$ W.
   a) Calculer l'énergie rayonnée chaque seconde par Proxima du Centaure.
   $E = P \times \Delta t = 6{,}9 \times 10^{23}\ W \times 1\ s = \underline{6{,}9 \times 10^{23}\ J}$
   b) Calculer la masse équivalente perdue chaque seconde par Proxima du Centaure.
   $\Delta m = \frac{E_{libérée}}{c^2} = \frac{6{,}9 \times 10^{23}}{(3{,}00 \times 10^8)^2} = \underline{7{,}67 \times 10^6\ \text{kg par seconde}}$

II Rayonnement émis par le Soleil

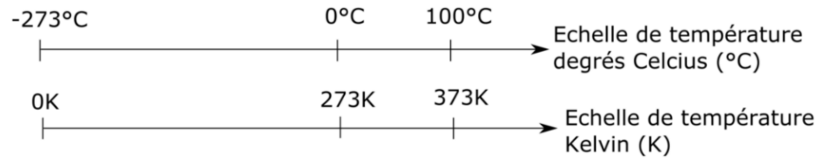
1) Unité de la température absolue : le kelvin

La température la plus basse possible dans l'Univers est – 273°C, c'est une limite, appelée le « **zéro absolu** ». En revanche, la température peut être aussi élevée que l'on veut !
On compte les températures à partir de ce plancher, cela permet de ne pas avoir de température négative. On obtient une nouvelle unité de mesure de la température : le **kelvin** (symbole : K). C'est l'unité « officielle » de la température.

C’est la même échelle que celle des degrés Celsius mais décalée vers le bas de 273 unités. **0 K vaut – 273°C**
Une augmentation de 1 K correspond à une augmentation de 1 °C.
Conversion d’une température θ (thêta) en degré Celsius (°C) en une température T en kelvin (K) :

$$\boxed{T(K) = \theta(°C) + 273}$$

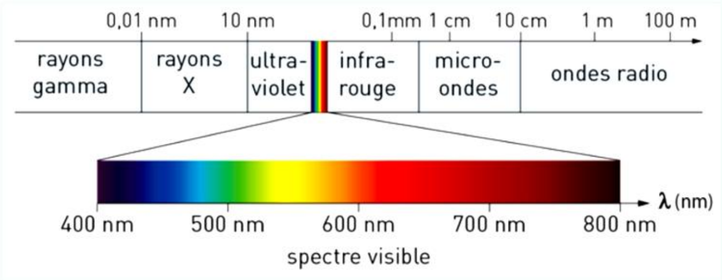
Exemples :
Pour θ = 25°C, T = 25 + 273 = 298 K
Pour T = 500 K, θ = 500 – 273 = 227°C



2) La longueur d’onde

Le Soleil émet de l’énergie sous forme d’ondes électromagnétiques.

Ces ondes sont caractérisée par leur **longueur d’onde**, notée λ (lettre grecque lambda).
Elle se mesure en mètre (m), mais on utilise souvent le nanomètre (1 nm = 10^{-9} m) ou le micromètre (1 µm = 10^{-6} m).



L’œil humain n’est sensible qu’à des ondes électromagnétiques dont la longueur d’onde est comprise entre **400 nm** (violet) et **800 nm** (rouge). Il s’agit du **domaine visible** des ondes électromagnétiques.
Dans le domaine du visible, à chaque longueur d’onde correspond une couleur.

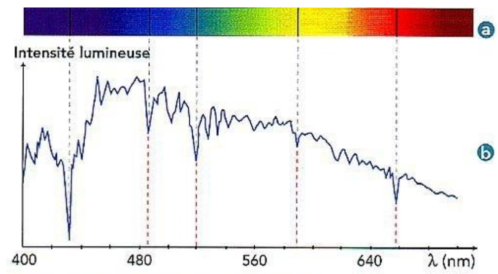
3) Le rayonnement thermique

Tous les corps émettent un rayonnement électromagnétique appelé rayonnement thermique. Le spectre de ce rayonnement est continu et ne dépend que de la température du corps. En émettant ce rayonnement, ils perdent de l’énergie.

Ce rayonnement thermique existe quelle que soit la température du corps, même s’il est plus facile de l’appréhender pour des corps portés à haute température.

Exemples : filament d’une lampe, lave d’un volcan, coulée d’acier ou de verre, barre métallique chauffée, surface gazeuse d’une étoile, …

Toutes les longueurs d’onde dans le spectre de ce rayonnement thermique ne sont pas présentes avec la même intensité. Certaines couleurs « dominent » plus que d’autres.
Il est possible de tirer du spectre le **profil spectral**, c’est-à-dire le graphique représentant l’intensité lumineuse du rayonnement en fonction de la longueur d’onde.



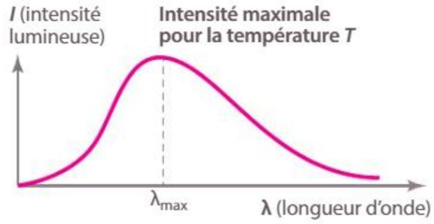
Spectre (a) et profil spectral du Soleil (b)

4) Le profil spectral d’un corps noir

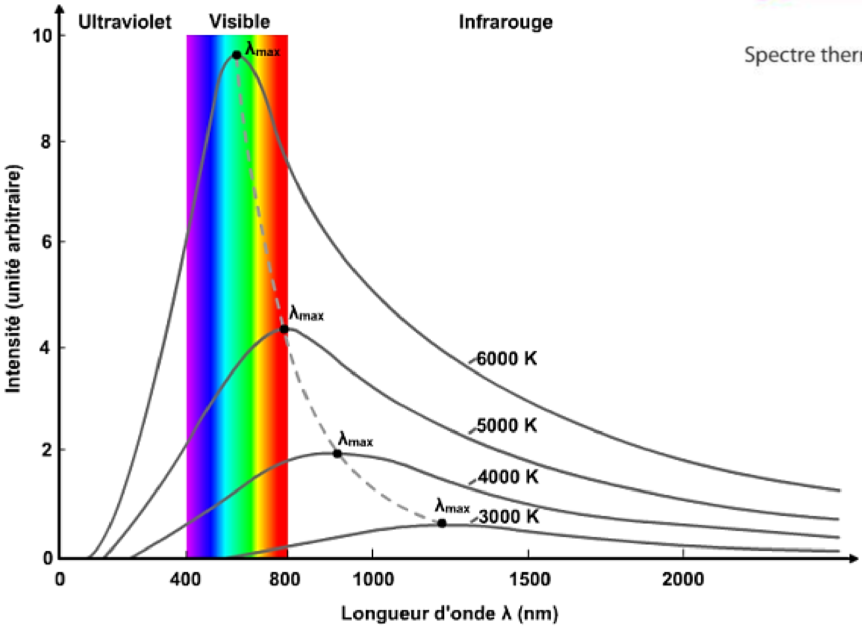
Un **corps noir** en physique est un corps « idéal » qui absorberait tout le rayonnement qu’il reçoit, sans le réfléchir ni le transmettre. Un tel corps émet un rayonnement qui ne dépend que de sa température.
On peut considérer que les étoiles, le Soleil ou le filament d’une lampe à incandescence, se comportent comme des corps noirs.

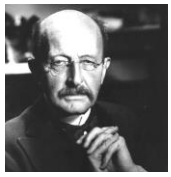
Remarque : il ne faut pas confondre le corps noir avec un objet de couleur noire qui absorbe le rayonnement visible.

On peut tracer le profil spectral d'un corps noir à différentes températures. On observe toujours une courbe en forme de cloche dont l'équation a été calculée par Max Planck.
Le profil spectral présente un **maximum d'intensité** pour une longueur d'onde précise notée λ_{max}.



Spectre thermique d'un corps à température T





Max Planck

1) Quelle est approximativement la valeur de λ_{max} pour un corps noir de température 3 000 K ? Pour un corps noir de température 5 000 K ? Pour un corps noir de température 6 000 K ?

Pour 3 000 K : λ_{max} = 1250 nm **Pour 5 000 K : λ_{max} = 800 nm** **Pour 6 000 K : λ_{max} = 600 nm**

2) Comment évolue λ_{max} lorsque la température T du corps noir augmente ?

Plus la température T du corps noir augmente, plus λ_{max} diminue.

3) En utilisant l'animation suivante, compléter le tableau ci-dessous.
https://phet.colorado.edu/sims/html/blackbody-spectrum/latest/blackbody-spectrum_fr.html

T (K)	3 000	4 000	5 000	5 800	7 000	8 000	9 000	10 000
λ_{max} (µm)	**0,966**	**0,724**	**0,580**	**0,500**	**0,414**	**0,362**	**0,322**	**0,290**
$\lambda_{max} \times$ T (µm.K)	**2 898**	**2 896**	**2 900**	**2 900**	**2 898**	**2 896**	**2 898**	**2 900**

4) Que remarque-t-on ? Calculer la moyenne du produit $\lambda_{max} \times$ T en m.K.

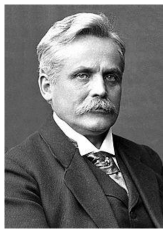
Le produit $\lambda_{max} \times$ T est presque constant.

Moyenne : $\lambda_{max} \times T = \frac{2898 + 2896 + 2900 + 2900 + 2898 + 2896 + 2898 + 2900}{8} = 2\,898{,}25$ µm.K

$\lambda_{max} \times T = 0{,}00290$ m.K $= 2{,}90 \times 10^{-3}$ m.K. **On obtient la loi de Wien.**

m	dm	cm	mm			µm			nm
0,	**0**	**0**	**2**	**8**	**9**	**8**	**2**	**5**	

5) La loi de Wien



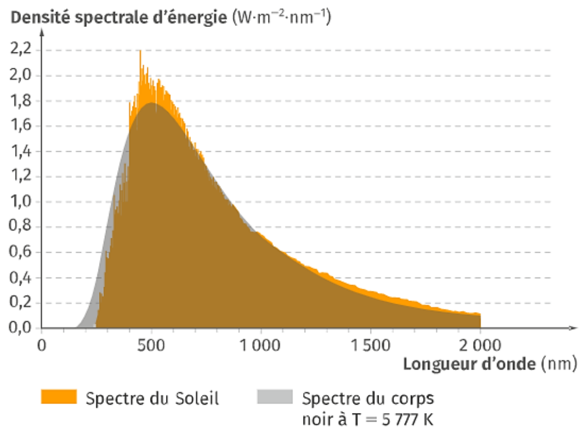
Wilhem Wien

Wilhelm Wien, physicien allemand, énonce que la longueur d'onde du maximum d'émission λ_{max} du rayonnement d'un corps noir est inversement proportionnelle à sa température T. Cette relation est la loi de Wien.
Il obtient le prix Nobel de physique en 1911 pour ses travaux.

Loi de Wien : $\lambda_{max} = \dfrac{2{,}90 \times 10^{-3}}{T}$ ou $T = \dfrac{2{,}90 \times 10^{-3}}{\lambda_{max}}$

λ_{max} : longueur d'onde correspondant au maximum d'intensité en mètre (m)
T : température en kelvin (K)

Remarque : Attention : la notation λ_{max} ne représente pas une valeur maximale pour λ, mais la valeur de longueur d'onde λ correspondant au maximum de l'intensité lumineuse.



Les étoiles, dont le Soleil, se comportent de manière assez similaire à un corps noir. Il est donc possible de **déduire leur température de surface à partir de leur spectre**.

Le spectre du Soleil suivant permet d'estimer sa température de surface : 5 777 K.

Exercices :

1) Rigel est une étoile bleutée de la constellation d'Orion. La longueur d'onde correspondant au maximum de son émission est dans le domaine ultraviolet et vaut λ_{max} = 210 nm. Donner une estimation de la température de surface de cette étoile.

$$T = \frac{2{,}90 \times 10^{-3}}{\lambda_{max}} = \frac{2{,}90 \times 10^{-3}}{210 \times 10^{-9}} = 13\,810 \text{ K}$$

$$\theta = T - 273 = 13\,810 - 273 = 13\,536°\text{C, soit environ } 13\,500°\text{C}$$

2) Un souffleur de verre sort la pâte de silice fondue du four à la température de 1 550°C. Calculer la longueur d'onde λ_{max} du maximum d'intensité. λ_{max} appartient-il au domaine visible ? Pourquoi une partie du rayonnement émis est-il quand même visible ?

$$T = \theta + 273 = 1\,550 + 273 = 1\,823 \text{ K}$$

$$\lambda_{max} = \frac{2{,}90 \times 10^{-3}}{T} = \frac{2{,}90 \times 10^{-3}}{1\,823} = 1{,}59 \times 10^{-6} \text{ m} = 0{,}00000159 \text{ m} = 1590 \text{ nm.}$$

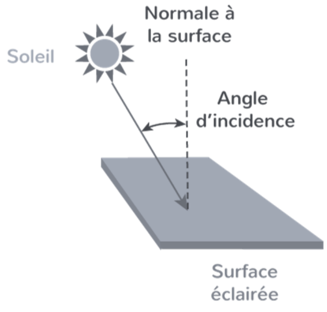
Cette longueur d'onde n'appartient pas au domaine visible (400 nm – 800 nm).
De la lumière visible est quand-même émise, car λ_{max} n'est pas la seule longueur d'onde émise.

III Rayonnement solaire reçu par la Terre

1) Puissance radiative reçue du Soleil

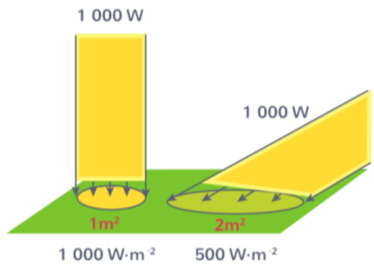
Pour capter l'énergie transportée par le rayonnement solaire, on peut installer des panneaux solaires.

- Plus **l'aire du panneau solaire est grande**, plus l'énergie captée chaque seconde sera grande.
- Cette surface doit être orientée convenablement par rapport aux rayons du Soleil : le **panneau solaire doit être perpendiculaire** à ces rayons pour capter la totalité du rayonnement. Dans le cas contraire, on ne capte qu'une fraction de ce rayonnement.



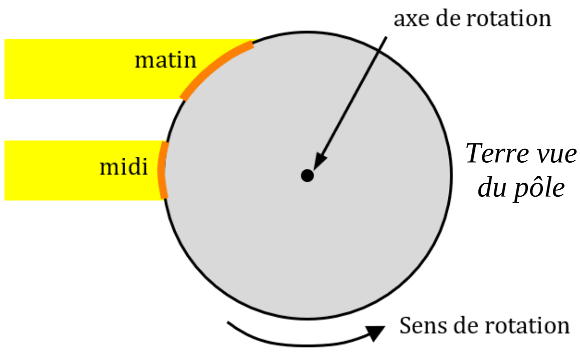
La puissance radiative reçue du Soleil par une surface dépend de son aire et de son inclinaison par rapport aux rayons du Soleil.
L'inclinaison est mesurée par l'angle entre la normale à la surface et les rayons lumineux provenant du Soleil.

Plus les rayons sont inclinés, plus la puissance radiative reçue du Soleil est petite. En effet, l'énergie solaire « s'étale » sur une plus grande surface.
Cette dépendance à l'inclinaison des rayons explique les variations de température au cours de la journée, de saisons et de climat que l'on observe sur Terre.



2) Variation diurne

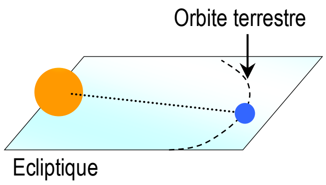
Le matin et le soir, les rayons du Soleil arrivent plus inclinés à la surface de la Terre qu'en milieu de journée.

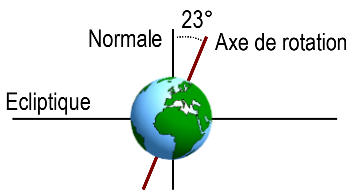


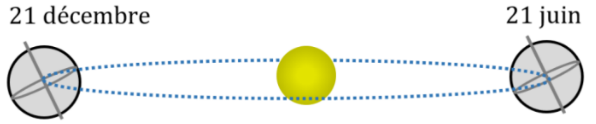
La puissance radiative reçue dépend de l'heure. C'est la variation diurne. L'ensoleillement est maximal à midi heure solaire.

3) Variation saisonnière

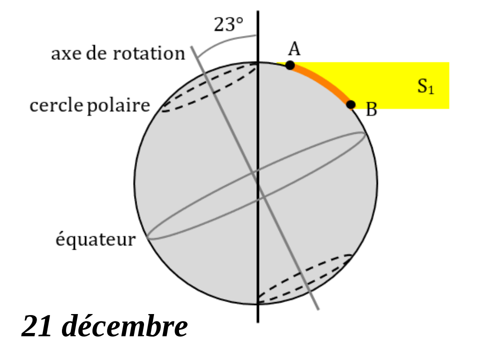
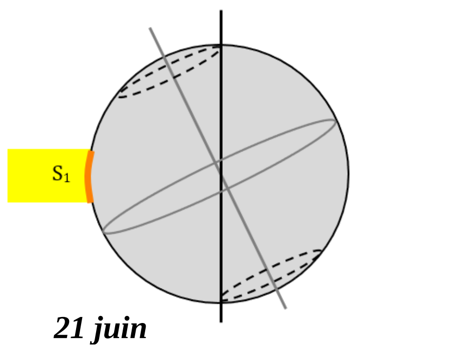
L'axe de rotation de la Terre est incliné d'un angle d'environ 23° par rapport au plan de l'écliptique (plan dans lequel la Terre tourne autour du Soleil). Ceci explique les variations **saisonnières** de température.







Orientation de la Terre aux solstice d'hiver et d'été
(le schéma n'est pas à l'échelle !)

 ***21 décembre***	Le 21 décembre, c'est l'hiver dans l'hémisphère Nord (et l'été dans l'hémisphère Sud). Dans l'hémisphère Nord, les rayons arrivent plus inclinés le 21 décembre que le 21 juin. La puissance radiative reçue du Soleil est donc plus faible en hiver, la surface terrestre reçoit moins d'énergie, il y fait plus froid.	 ***21 juin***

La puissance radiative reçue dépend du moment de l'année. C'est la variation saisonnière. Dans l'hémisphère Nord, l'ensoleillement est plus important l'été.

4) Zonation climatique

On voit également sur le schéma du 21 décembre que plus la latitude est élevée (plus on se rapproche du pôle Nord), plus les rayons solaires arrivent inclinés par rapport au sol, plus la puissance radiative est faible.
Au niveau du point A, les rayons solaires arrivent très inclinés par rapport au sol. Au niveau du point B, c'est toujours l'hiver, mais les rayons arrivent moins inclinés qu'en A. Il fera donc moins froid en B qu'en A.
Ceci explique que le climat est plus froid aux latitudes élevées (zone tempérée, zone arctique) qu'aux faibles latitudes (zones tropicales).

La puissance radiative reçue dépend de la latitude. Plus elle est élevée (plus on se rapproche des pôles), plus l'ensoleillement est faible . C'est la zonation climatique.