

Le rayonnement solaire

1. L'équivalence masse-énergie
2. Puissance et énergie
3. La couleur des étoiles
4. L'énergie solaire

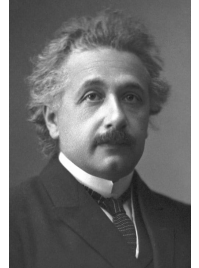
1. L'équivalence masse-énergie

En 1900, **Henry Poincaré** publie un article dans lequel il affirme qu'un rayonnement peut être considéré comme un fluide fictif de masse équivalente à $m = E/c^2$. La formule $E = mc^2$ apparaît pour la première fois.

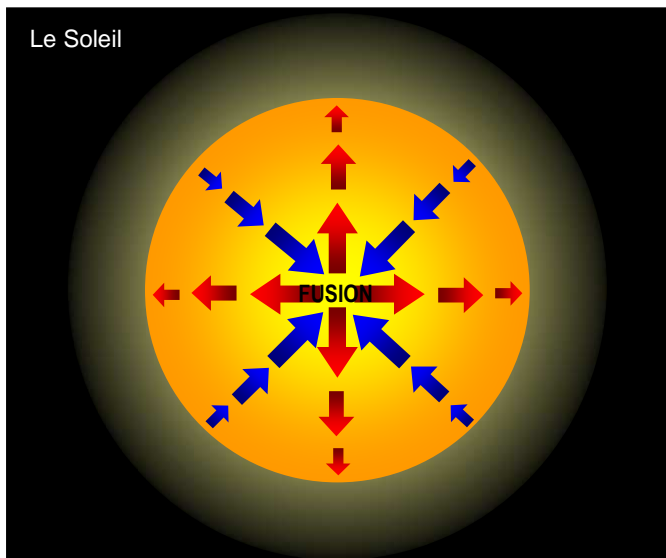
En 1905, **Albert Einstein** va plus loin et suggère que lorsqu'un corps matériel perd une énergie E par rayonnement ou par chaleur, sa masse décroît alors d'une valeur égale à E/c^2 .



⇐ Henry Poincaré (1854 – 1912)



Albert ⇒ Einstein (1879 – 1955)





1.1 Stabilité des étoiles

La gravité engendre, par effondrement gravitationnel d'un nuage de gaz et de poussière, une protoétoile : la matière s'agglomère en forme de sphère de plus en plus grosse.

Si la sphère devient suffisamment massive, les atomes d'hydrogène au cœur de celle-ci sont si chauds et si compactés qu'ils finissent par fusionner transformant la protoétoile en étoile.

Du fait de l'énorme énergie dégagée par l'amorçage des réactions thermonucléaires, l'étoile grossit dans un premier temps puis stabilise sa taille lorsque la pression due au poids des couches supérieures de l'étoile contrebalance exactement les forces d'explosions du cœur de l'étoile.

L'étoile entre dans sa « séquence principale ».

-  Forces dues à la gravité
-  Forces dues à la fusion

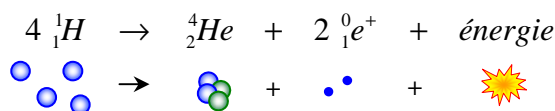
Exercice 1 :

- a. Que se passe-t-il s'il n'y a pas suffisamment de matière à agglomérer pour que la sphère se transforme en étoile ?
- b. Quelle est, de ces deux forces antagonistes, celle qui calque son intensité sur l'autre ? Pourquoi ?
- c. Déterminer en °C la température de la photosphère du Soleil sachant qu'elle est égale à 5770 K environ.

La fusion de l'hydrogène se produit vers 15 millions de °C (ou K) et 3 milliards d'atmosphères ($1 \text{ atm} = 1\,013 \text{ hPa} = 101\,300 \text{ Pa}$). C'est cette fusion qui se produit dans les étoiles comme le Soleil. Pour les étoiles plus massives, la fusion d'autres éléments chimiques prend le relais au cœur de l'étoile après celle de l'hydrogène. De ce fait, la température du cœur de ces étoiles devient bien plus importante et peut dépasser le milliard de kelvins.

1.2. Recherche du défaut de masse

La fusion de l'hydrogène 1 (protium) en hélium 4 s'effectue en plusieurs étapes (voir ci-contre). Le bilan de ces différentes étapes peut s'écrire :

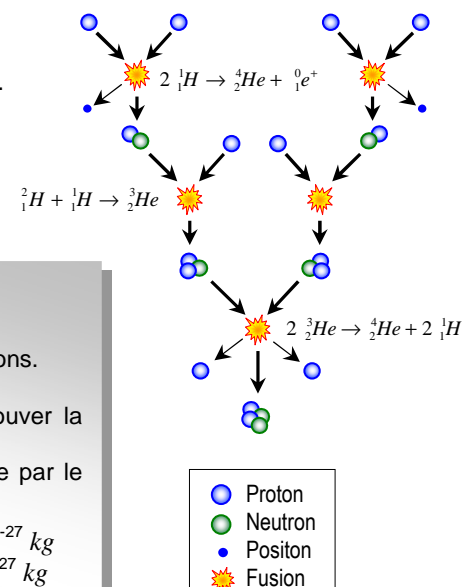


Exercice 2 :

- a. Déterminer la masse de l'ensemble composé des 4 protons de départ.
- b. Déterminer la masse de l'ensemble composé de l'atome d'hélium et des deux positrons.
- c. Que remarque-t-on ? Comment expliquer cette observation ?
- d. Sachant que chaque seconde le Soleil rayonne une énergie de $3,9 \cdot 10^{26} \text{ J}$, retrouver la masse qu'il perd chaque seconde.
- e. Le Soleil est âgé de 4,6 milliards d'années environ. Montrer que la masse perdue par le Soleil depuis sa naissance à cause de la fusion est négligeable.

Données :

- Masse solaire : $2,0 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
- Masse positon : $0,00091 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
- Masse proton : $1,67262 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
- Masse hélium : $6,64648 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$



2. Puissance et énergie

Exercice 3 :

Deux radiateurs électriques *A* et *B* disposent chacun d'une réserve d'énergie de $E = 20\,000\text{ J}$. Le radiateur *A* transforme complètement cette énergie en chaleur en 10 s alors que le radiateur *B* effectue cette opération en environ 1 min et 40 s .

- Quel est, de ces deux radiateurs, celui qui est le plus efficace et donc le plus puissant ? Justifier.
- Combien de joules sont convertis chaque seconde en chaleur par le radiateur *A* ?
- Sachant qu'un joule par seconde équivaut à 1 W (watt), déterminer la puissance en W du radiateur *A*.
- Faire de même pour le radiateur *B*. Conclure.
- En déduire la formule permettant de calculer la puissance P d'un appareil si l'on connaît l'énergie E qu'il consomme pendant une durée notée Δt .

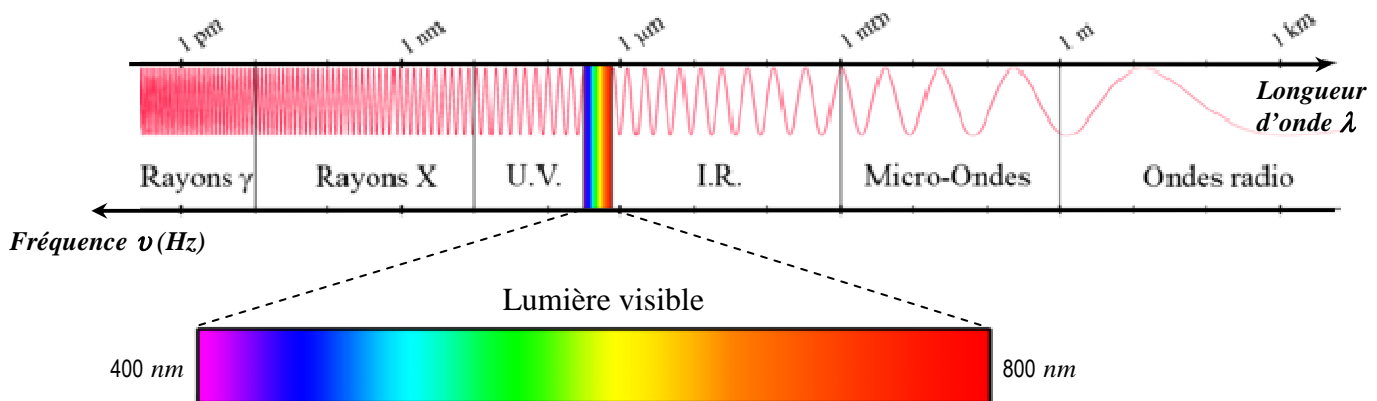
La puissance est la quantité d'énergie par unité de temps fournie par un système à un autre. Elle correspond à un débit d'énergie. La puissance et l'énergie sont liées par la relation :

$$P = \frac{E}{\Delta t} \quad \left| \begin{array}{l} P \text{ en W} \\ E \text{ en J} \\ \Delta t \text{ en s} \end{array} \right.$$

Question : Sachant que le Soleil émet une énergie de $3,9 \cdot 10^{26}\text{ J}$ chaque seconde, déterminer la puissance de son rayonnement.

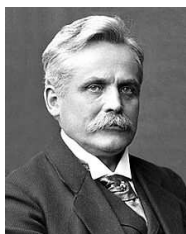
3. La couleur des étoiles

Les ondes électromagnétiques sont une fluctuation d'un champ électrique et d'un champ magnétique conjugués. Seule une très petite partie de ces ondes électromagnétiques sont visibles par l'œil humain : c'est la **lumière**.



Exercice 4 :

- Sachant que l'énergie E transportée par un rayon de lumière est donnée par la relation $E = h\nu$ (avec h une constante et ν la fréquence) quel type de rayonnements électromagnétiques contient le plus d'énergie ?
- Quelle est, entre la lumière rouge et la lumière violette, celle qui est la plus énergétique ?
- Quel est l'ordre de grandeur de la longueur d'onde λ de la partie visible des ondes électromagnétiques ?
- Donner les limites en longueur d'onde du domaine du visible.



Loi de Wien :

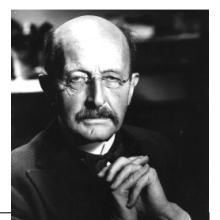
$$\phi = \frac{A}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\left(\frac{B}{\lambda T}\right)}}$$

Wilhelm Wien (1864 – 1928), physicien allemand, est célèbre pour ses travaux sur le rayonnement des corps chauffés. Il étudia la répartition spectrale du rayonnement du corps noir et découvrit en 1893 que sur chaque spectre, l'intensité du rayonnement passe par un maximum pour une certaine longueur d'onde inversement proportionnelle à la température du corps chauffé générant ce spectre.

C'est la fameuse loi de Wien, formule empirique, publiée en 1896. Wien obtiendra en 1911 le prix Nobel de Physique pour ses travaux.

Malheureusement cette première version de la loi donne des valeurs fausses lorsque le maximum d'intensité se situe dans les grandes longueurs d'onde. De plus, elle implique que l'intensité de rayonnement reste limitée avec l'augmentation de la température, ce que contredit aussi l'expérience.

Pour remédier à cela, Max Planck, autre physicien allemand, proposa en 1900 une nouvelle formule à partir de celle de W. Wien (loi de Planck).



Loi de Planck :

$$\phi = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\left(\frac{h \cdot c}{k \cdot \lambda \cdot T}\right)} - 1}$$

Une version simplifiée de la loi de Planck dans le système d'unité international peut s'écrire :

Loi du déplacement de Wien :

$$\lambda_{\max} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{T}$$

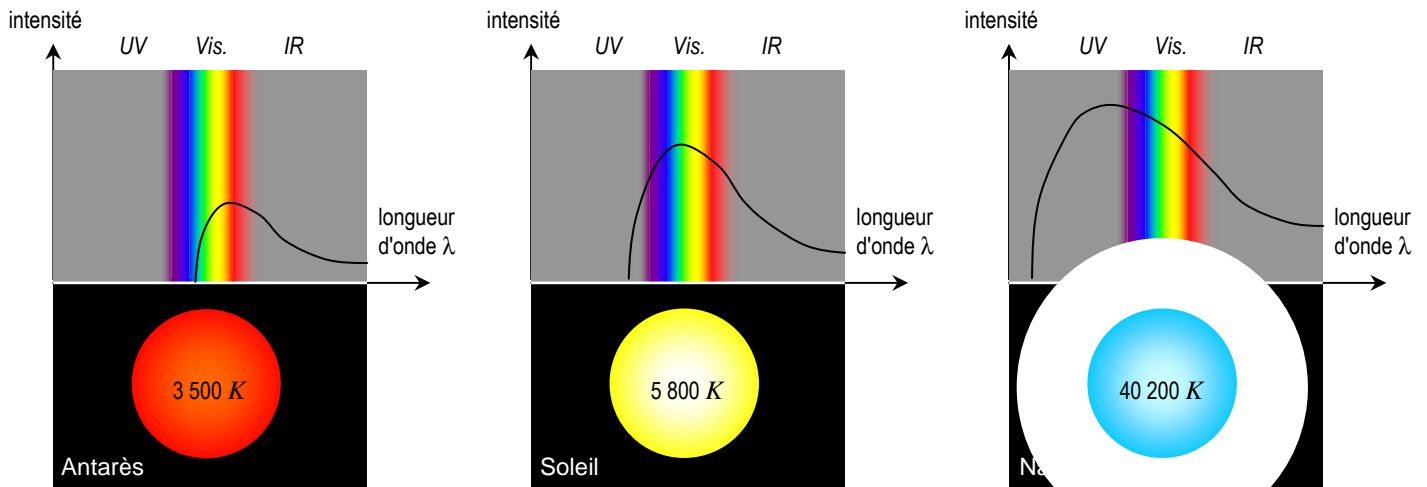
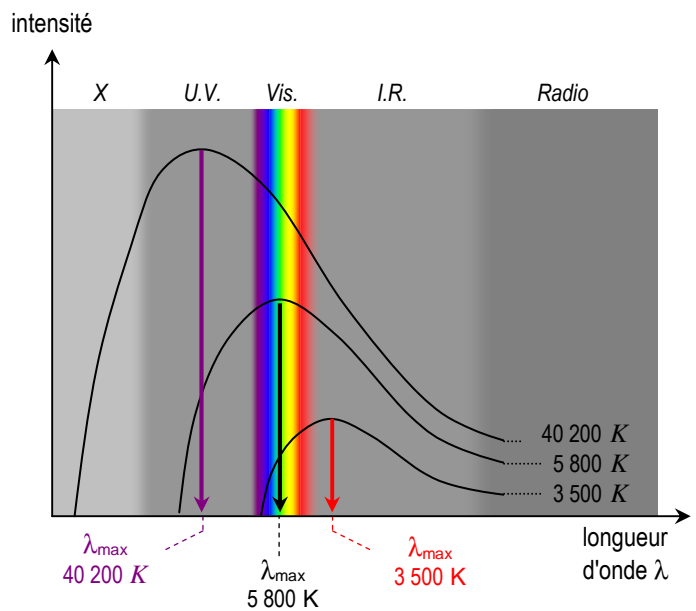
λ en m
 T en K (kelvin)

A noter : T (en K) = θ (en $^{\circ}\text{C}$) + 273,15

Un corps chaud émet de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques. Plus le corps est chaud, plus il peut émettre d'ondes de hautes fréquences (et donc de faibles longueurs d'ondes).

La surface lumineuse d'une étoile est appelée **photosphère**. La couleur de cette photosphère dépend directement de la température à la surface de l'étoile.

Classe	Température	Couleur	Exemple
O	> 25 000 K	Bleue	Naos
B	10 000 à 25 000 K	Bleue	Rigel
A	7 500 à 10 000 K	Blanc-Bleue	Sirius
F	6 000 à 7 500 K	Blanche	Canopus
G	5 000 à 6000 K	Blanc-Jaune	Soleil
K	3 500 à 5 000 K	Orange	Antares
M	< 3 500 K	Rouge	Betelgeuse



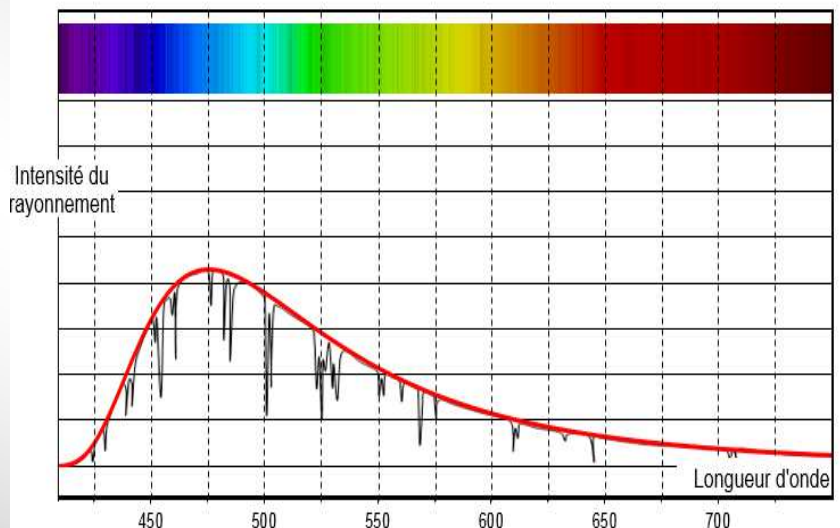
Exercice 5 :

- Quelle est, de ces trois étoiles, celle qui émet l'intensité la plus forte dans le rouge (700 nm) ?
- Justifier alors la couleur de cette étoile.
- Que faudrait-il pour qu'une étoile apparaisse blanche ?
- Le Soleil apparaît blanc lorsqu'on l'observe en dehors de l'atmosphère terrestre. Expliquer pourquoi.
- Quelle est ici l'étoile la plus lumineuse ? Justifier.
- Donner, en degrés Celsius, la température de la photosphère solaire, ainsi que les températures de fusion et d'ébullition de l'eau.

Exercice 6 :

On dispose de l'intensité du rayonnement dans le spectre solaire en fonction de la longueur d'onde (courbe noire).

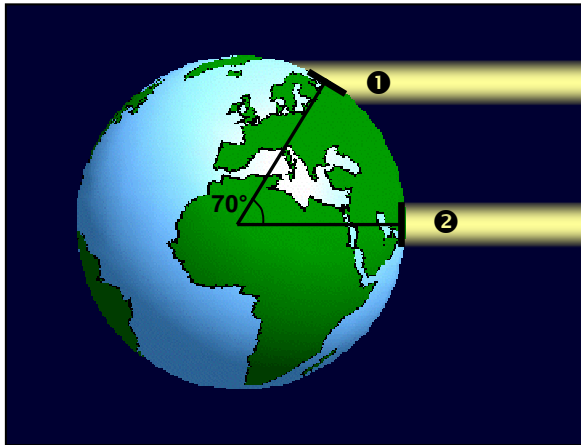
- A quoi correspond la courbe rouge ?
- A l'aide de la courbe rouge, déterminer la température de la photosphère solaire.
- Expliquer l'allure très irrégulière de la courbe noire.
- A quelle condition une étoile pourrait-elle avoir une courbe spectrale parfaitement superposable à sa courbe rouge ? Une telle situation est-elle possible ?
- Quelles sont, des géantes bleues et des géantes rouges, les étoiles les plus chaudes en surface ? Justifier.
- La température de la photosphère de l'étoile du pistolet avoisine les 30 000 K. Déterminer la longueur d'onde pour laquelle cette étoile émet le plus de lumière.



4. L'énergie solaire

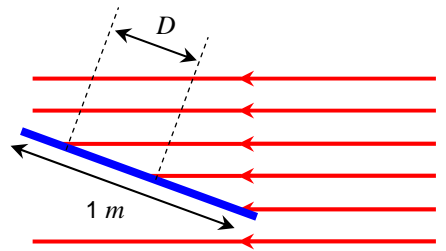
4.1. Influence de la latitude

Considérons deux faisceaux de lumière (❶ et ❷) de mêmes intensités arrivant du Soleil vers la Terre.



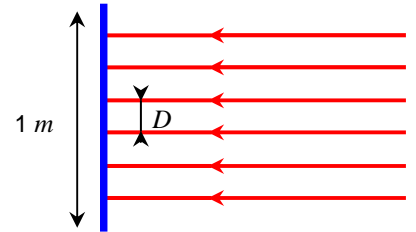
Situation 1 :

Les rayons arrivent très inclinés par rapport à la surface. Ils sont très espacés et donc relativement peu nombreux à percuter une surface de 1 m^2 .



Situation 2 :

Les rayons sont perpendiculaires à la surface. Ils sont peu espacés et donc plus nombreux à percuter la même surface.



A l'équateur (latitude 0°), un faisceau de lumière de section 1 m^2 s'étale sur la Terre sur une surface de 1 m^2 .
Pour une latitude de 70° , un faisceau de lumière de section 1 m^2 s'étale sur la Terre sur une surface d'environ 5 m^2 .

Exercice 7 :

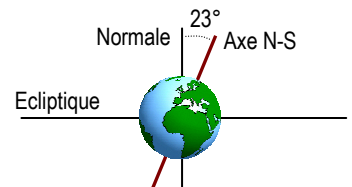
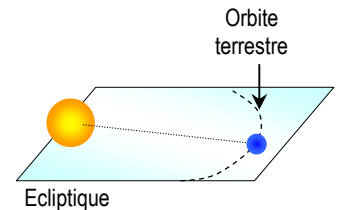
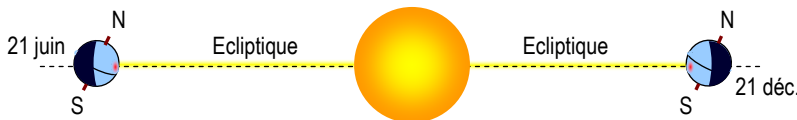
On considère un panneau solaire de surface $3,2 \text{ m}^2$ destiné à l'alimentation d'une installation électrique à l'équateur terrestre.

- Quelle surface de panneaux solaires faut-il installer horizontalement au sol à une latitude de 70° pour pouvoir alimenter la même installation ? Quels autres facteurs peuvent réduire l'éclairement reçu par les panneaux à une telle latitude ?
- Pour quelle raison la puissance solaire reçue par un panneau solaire varie-t-elle en fonction de l'heure de la journée ?

4.2. Influence des saisons

L'axe de rotation Nord-Sud de la Terre sur elle-même garde une direction constante. Cet axe est incliné de 23° par rapport à la normale à l'écliptique.

De ce fait, vers le 21 juin, les rayons solaires frappent l'intégralité de l'hémisphère Nord en étant quasiment perpendiculairement sur une grande partie de cet hémisphère. L'hémisphère Sud, quant à lui, n'est pas entièrement éclairé, et les rayons sont rasants. C'est le début de l'été dans l'hémisphère Nord et de l'hiver dans l'hémisphère Sud. Six mois plus tard, c'est l'inverse.



Exercice 8 :

- Comment se nomme le jour du 21 juin dans l'hémisphère Nord ? Dans l'hémisphère Sud ?
- Quel nom donne-t-on au 21 mars et au 21 septembre partout sur la Terre ? Quelle est la particularité de ces deux jours ?
- Que se passe-t-il au-delà des cercles polaires en été et en hiver ? Justifier.

4.3. Températures moyennes

Exercice 9 :

On donne les températures moyennes mensuelles de trois villes.

Ville	Latitude	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Paris	48.9°	2.9	8.0	11.3	11.9	17	21.8	22	20.9	16.4	15.1	8.8	6.3
A.Dhabi	24.5°	20.9	19.2	25.4	30.6	33.5	35.4	39.2	38.4	35.3	32	27.2	22
Christchurch	-43.5°	17	17.1	15.2	12.4	8.2	6.7	5.9	8.3	10.5	12.2	13.9	15.8

- Calculer la moyenne annuelle des températures dans chaque ville.
- Comment expliquer que cette moyenne soit plus élevée à Abu Dhabi qu'à Paris ?
- Quelle particularité observe-t-on pour les températures de Christchurch ? Expliquer cette différence.
- Bordeaux et Québec sont deux villes à la même latitude. Pourquoi leur climat est-il néanmoins assez différent ?