

Activité 1 : La température du Soleil

1 Quelques repères historiques sur l'étude du rayonnement thermique*

L'étude du rayonnement thermique vient de la volonté des scientifiques de déterminer la température du Soleil.

1879

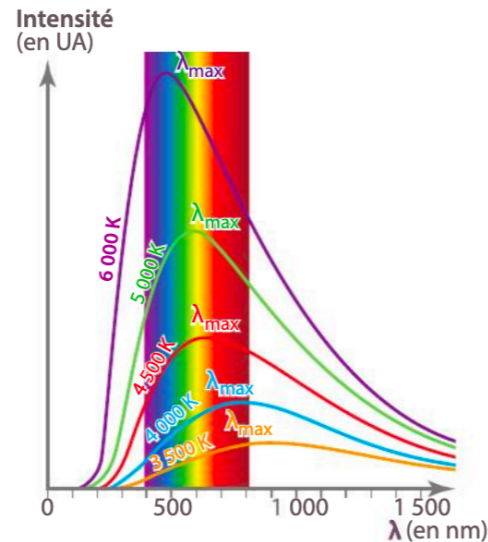
Le physicien austro-hongrois **Jožef Stefan** (1835-1893) propose une loi reliant la puissance totale rayonnée par un corps à sa température. En l'appliquant au Soleil, il détermine sa température de surface, comprise entre 6 000 °C et 11 000 °C.

1884

Ludwig Boltzmann (1844-1906), physicien autrichien et élève de Jožef Stefan, démontre théoriquement cette loi, aujourd'hui appelée « loi de Stefan-Boltzmann ».

1881

Un détecteur sensible aux très faibles variations de température est mis au point par l'astrophysicien américain **Samuel Langley** (1834-1906). Il devient dès lors possible de tracer le spectre d'émission thermique* d'un corps chauffé à différentes températures. Les travaux sur les spectres thermiques montrent un lien entre la position du pic de la courbe (correspondant à la longueur d'onde maximale λ_{\max}) et la température T .



1893

Les travaux du physicien allemand **Wilhelm Wien** (1864-1928) le conduisent à énoncer que la température T (en kelvins) d'un corps et la longueur d'onde λ_{\max} (en mètres) sont liées par la relation :

$$\lambda_{\max} \times T = 2,90 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

1900

Le physicien allemand **Max Planck** (1858-1947) établit une formule théorique décrivant entièrement le spectre thermique d'un corps « idéal » appelé corps noir*.

Après 1910

À partir de 1910, les progrès instrumentaux démontrent que les lois de Planck, de Wien et de Stefan-Boltzmann donnent en définitive la même valeur de la température de la surface du Soleil.



VOCABULAIRE

Corps noir : objet théorique qui absorbe toutes les radiations lumineuses qu'il reçoit et qui émet un rayonnement thermique lorsqu'il est chauffé.

Rayonnement thermique : rayonnement électromagnétique produit par un corps sous l'effet de la température.

Spectre d'émission thermique : représentation graphique de l'intensité I du rayonnement en fonction de la longueur d'onde λ pour différentes températures.

À SAVOIR

Dans le système international, la température T s'exprime en kelvins, avec $T(\text{en K}) = \theta(\text{en } ^\circ\text{C}) + 273$.

- Nommer le premier physicien à avoir déterminé la température du Soleil. A-t-il obtenu un résultat précis ?
- De quelle grandeur dépend la longueur d'onde λ_{\max} ?
- Recopier et compléter le tableau suivant en utilisant le spectre thermique du **document 1**.

T (en K)	3 500	4 000	4 500	5 000	6 000
$1/T$ (en K^{-1})					
λ_{\max} (en m)					

- Montrer que λ_{\max} est proportionnelle à $1/T$, puis retrouver la loi de Wien.

$$\beta = 2,90 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

1 Bételgeuse est une étoile de type supergéante rouge environ 1 000 fois plus grosse que notre Soleil. Son spectre, en faisant l'hypothèse qu'elle peut être considérée comme un corps noir, présente un maximum à $8,06 \times 10^{-7} \text{ m}$.



5 Loi de Wien

Le spectre d'émission thermique de l'étoile Arcturus présente une longueur d'onde au maximum d'intensité $\lambda_{\text{max}} = 675 \text{ nm}$.

► Calculer la température de surface de cette étoile en appliquant la loi de Wien : $\lambda_{\text{max}} \times T = 2,90 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$.

Déterminez la température de surface de Bételgeuse en kelvin (K).

11 R136a1

R136a1 est l'étoile la plus massive jamais observée.

Située à environ 165 000 années-lumière de la Terre, sa température est dix fois supérieure à celle du Soleil, qui pourtant vaut $T_{\text{Soleil}} = 5 800 \text{ K}$.



1. Déterminer, en utilisant la loi de Wien, la longueur d'onde à laquelle est situé le maximum d'intensité du spectre thermique de R136a1.

2. Ce maximum appartient-il au domaine des longueurs d'onde visibles ?

2

LA MESURE DE LA PUISSANCE RADIATIVE DU SOLEIL

OBJECTIF
Déterminer expérimentalement la puissance radiative du Soleil

Le système climatique de notre planète est contrôlé en partie par la puissance radiative reçue du Soleil.

Comment déterminer la puissance radiative du Soleil?

Protocole expérimental

- Fixer le boîtier contenant la masse en laiton sur une potence et l'orienter perpendiculairement aux rayons du Soleil.
- Insérer la tige du thermomètre dans l'orifice de la masse de laiton.
- Relever la température initiale t_i puis déclencher le chronomètre.
- Au bout de dix minutes, relever la température finale t_f .

Matériel

- Un dispositif orientable pour maintenir une masse en laiton peinte en noir
- Un chronomètre et un thermomètre



Observations



FORMULE

- La puissance radiative P du Soleil se calcule en utilisant la formule suivante :

$$P = \frac{m \times c \times (T_f - T_i)}{\Delta t}$$

Annotations:
 - P : en W
 - m : en kg
 - c : en $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
 - $(T_f - T_i)$: en $^{\circ}C$ ou en K
 - Δt : en s

✓ DONNÉES

- Capacité thermique massique du laiton : $c = 418 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
- Masse en laiton : $m = 197 g$
- Surface exposée au Soleil : $S = 20,25 cm^2$

QUESTIONS

- 1 Comment évolue la température de la masse en laiton au cours de l'expérience?
- 2 À partir des mesures réalisées, calculer la puissance radiative P du Soleil au niveau du sol.
- 3 Déterminer alors la puissance radiative par unité de surface P_S , exprimée en $W \cdot m^{-2}$.
- 4 Formuler des hypothèses quant aux paramètres expérimentaux qui influencent la valeur de la puissance radiative calculée.

➔ Pour approfondir : ex. 17 p. 85

3

LA VARIATION DE LA PUISSANCE RADIATIVE REÇUE SUR TERRE

OBJECTIF

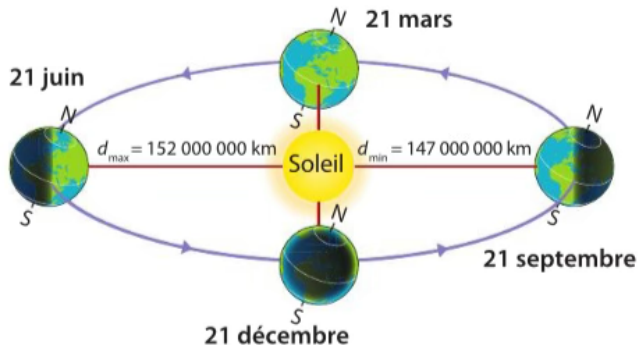
Identifier les paramètres dont dépend la puissance solaire

QUESTION

À partir des documents et en utilisant vos connaissances, rédiger un texte argumenté pour expliquer les différences de climats et de saisons observées sur Terre.

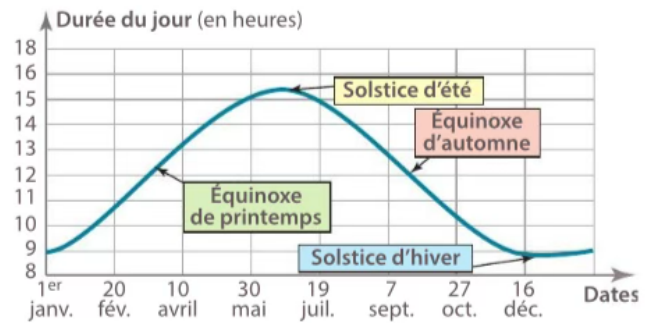
1 La distance Terre-Soleil

La Terre tourne autour du Soleil sur une trajectoire qui n'est pas parfaitement circulaire mais elliptique. La distance qui sépare notre planète du Soleil varie entre 147 et 152 millions de kilomètres.



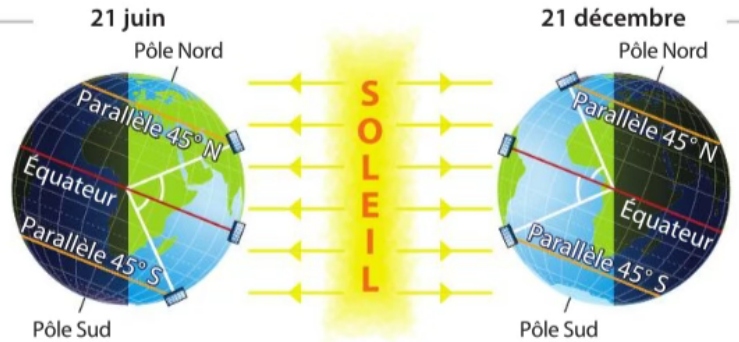
2 La durée d'ensoleillement dans l'hémisphère nord

Sous nos latitudes (environ 45° nord), la durée d'ensoleillement varie en fonction du jour de l'année.



3 La puissance solaire reçue par la Terre

La Terre étant sphérique, le rayonnement solaire reçu par une même surface dépend de la latitude à laquelle se situe cette dernière. Il dépend aussi de l'inclinaison de la Terre, qui varie au cours d'une année.



4 Modélisation de la puissance radiative

L'expérience photographiée ci-dessous montre comment il est possible de modéliser la puissance radiative reçue par une même surface en fonction de son orientation.



4

LA SOURCE D'ÉNERGIE DU SOLEIL

Satisfaire les besoins de l'humanité en énergie sans polluer la planète est une question au centre des débats sur la « transition énergétique ». Un moyen pour y parvenir serait de reproduire dans des centrales les réactions qui se produisent au cœur du Soleil.

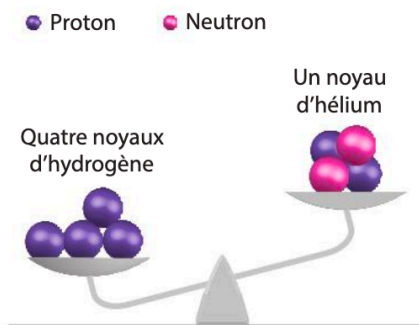
OBJECTIF

Déterminer la masse du Soleil transformée chaque seconde en énergie

Quel phénomène est à l'origine de l'énergie solaire? Pourra-t-on le reproduire sur Terre?

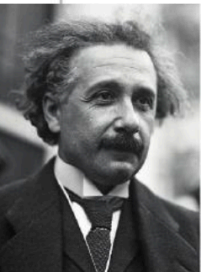
1 La production d'énergie dans les étoiles

En 1920, le physicien anglais Francis William Aston (1877-1945) découvre expérimentalement qu'un noyau d'hélium ${}^4\text{He}$ (2 protons et 2 neutrons) est plus léger que quatre noyaux d'hydrogène ${}^1\text{H}$ (1 proton et 0 neutron).



Comme le noyau d'hélium est le résultat de la fusion de quatre noyaux d'hydrogène, Francis Aston en déduit qu'une partie de la masse initiale disparaît lors de la fusion nucléaire.

L'explication de cette observation repose sur l'équivalence entre la masse perdue m et l'énergie obtenue E , formulée en 1905 par le physicien d'origine allemande Albert Einstein (1879-1955).



$$E = m \times c^2$$

Énergie en joules (J) ←

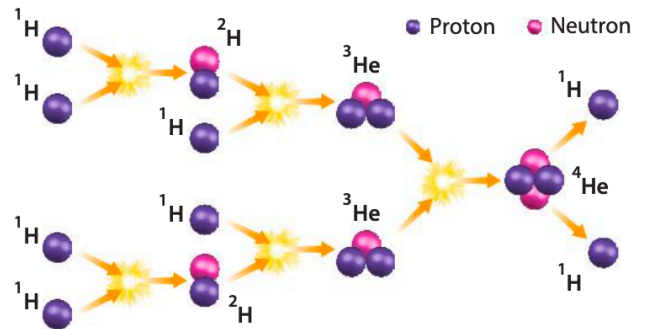
Différence de masse en kilogrammes (kg) ↓

← Célérité de la lumière dans le vide ($3,0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Comme dans toute étoile, il se produit dans le Soleil des réactions de fusion nucléaire stellaire qui transforment les noyaux d'hydrogène en hélium et entretiennent ainsi une température centrale de l'ordre de 15 millions de degrés.

2 Les réactions nucléaires au sein du Soleil

Dans le Soleil, constitué essentiellement d'hydrogène, se produisent différentes réactions nucléaires. Du deutérium ${}^2\text{H}$ et de l'hélium ${}^3\text{He}$ se forment aux étapes intermédiaires, ces derniers réagissant pour aboutir à la formation d'hélium ${}^4\text{He}$.



Le bilan final est la transformation de quatre noyaux d'hydrogène ${}^1\text{H}$ en un noyau d'hélium ${}^4\text{He}$.

3 Une conséquence surprenante de la formule d'Einstein

Si la perte de masse qu'entraîne la transformation des noyaux d'hydrogène en noyaux d'hélium est infime à l'échelle microscopique, elle devient énorme à l'échelle du Soleil. Cette conséquence avait été formulée dès 1905 par Einstein : « Si un corps dégage une énergie E sous forme de radiation, sa masse m diminue de $m = E/c^2$. »

Grâce aux différentes mesures de la puissance radiative du Soleil effectuées au fil des siècles, d'abord au sol, puis en ballon et enfin par satellite, les astronomes connaissent précisément la puissance totale rayonnée par le Soleil : elle est colossale et vaut $P_{\text{totale}} = 3,87 \times 10^{26} \text{ W}$.

Cela signifie qu'en une seconde le Soleil libère une énergie $E_{\text{totale}} = 3,87 \times 10^{26} \text{ J}$.

On peut ainsi calculer que, du fait de son rayonnement, le Soleil « maigrit » chaque seconde d'environ quatre millions de tonnes !

QUESTIONS

- 1 Quelle réaction se produit au sein du Soleil?
- 2 Pourquoi cette réaction s'accompagne-t-elle d'une perte de masse? Qu'entraîne-t-elle?
- 3 Démontrer la conclusion du document 3 : « Le Soleil perd quatre millions de tonnes par seconde. »

FORMULE

$$E = P \times t$$

en joules (J) ←

← en secondes (s)

en watts (W) ↑

4 Maîtriser la puissance du Soleil? Le projet ITER

ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) est un projet de réacteur cherchant à reproduire sur Terre les réactions de fusion nucléaire se produisant au cœur du Soleil. Les scientifiques espèrent obtenir, grâce à ce réacteur, une puissance de 500 MW pour des périodes de 400 à 600 secondes.

Sa construction, financée par un consortium mondial de 35 pays (comprenant l'Union européenne, l'Inde, le Japon, la Chine, la Russie, la Corée du Sud, les États-Unis et la Suisse), a débuté fin 2007 sur le site de Cadarache, dans le département des Bouches-du-Rhône (13), sur un site de 42 hectares. Un prototype industriel de fusion pourrait être lancé vers 2045 et commencer à fonctionner entre 2055 et 2060.

La fusion nucléaire envisagée dans le réacteur ITER présente de nombreux avantages par rapport à la fission de l'uranium, actuellement utilisée dans les centrales électriques nucléaires. Son rendement est tout d'abord bien meilleur. Ensuite, elle utilise comme combustible du deutérium ^2H et du tritium ^3H , deux isotopes de l'hydrogène. Le deutérium est très abondant dans la nature : on le trouve dans l'eau de mer. Le tritium a quant à lui une très faible toxicité (sa

demi-vie, par exemple est de 12,3 années contre 4,5 milliards d'années pour l'uranium). Par ailleurs, la réaction de fusion ne présente aucun risque d'accident nucléaire de type Fukushima et génère des déchets très faiblement radioactifs.



5 ITER, un projet controversé



Le physicien français George Charpak (1924-2010) explique, dans un article paru en 2010 dans le journal *Libération*, que le projet ITER est « un rêve impossible ». Tout d'abord, le coût prévisionnel de construction d'ITER est passé de 5 à 15 milliards d'euros, et il est question d'en faire subir les conséquences aux budgets de financement de la recherche scientifique européenne. De plus, pour contrôler cette production d'énergie, il faut, entre autres, produire le tritium en quantités industrielles et inventer des matériaux capables de supporter des températures très élevées, de l'ordre de 150 millions de degrés pour contenir ces combustibles dans une enceinte de quelques milliers de mètres cubes.

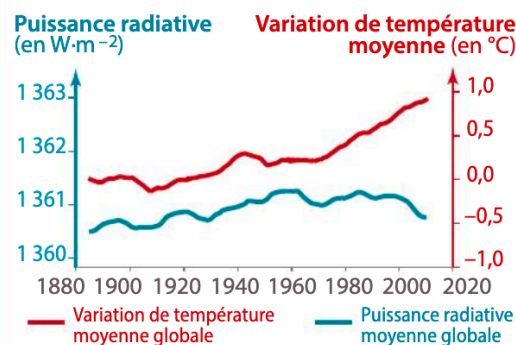
Penser la science

Comprendre que le savoir scientifique se distingue d'une croyance ou d'une opinion

Selon certains « climato-sceptiques », le changement climatique observé sur Terre ne proviendrait pas des activités humaines mais du Soleil lui-même : les variations de sa puissance radiative en seraient responsables.

Des mesures précises de la puissance radiative et de la variation de la température moyenne à la surface du globe en fonction du temps permettent de tester cette interprétation.

- Montrer que cette interprétation est discutable.



QUESTIONS

- 4 Quel est le but du projet ITER ?
- 5 La réaction nucléaire envisagée dans le réacteur ITER est-elle la même que celle se produisant au sein du Soleil ?
- 6 Les températures nécessaires pour réaliser la fusion nucléaire dans le réacteur de ITER sont-elles les mêmes qu'au cœur du Soleil ?
- 7 Lister les avantages et les inconvénients du projet ITER. Pourquoi des physiciens comme Georges Charpak s'élèvent-ils contre le projet ITER ?

➔ Pour approfondir : ex. 19 p. 85

➔ Comprendre la démarche scientifique, p. 17

9 Comparaison de la température de surface de deux étoiles

Bételgeuse et Rigel sont des étoiles appartenant à la constellation d'Orion. Ces deux étoiles se différencient, entre autres, par leur couleur : Rigel est une supergéante bleue alors que Bételgeuse est une supergéante rouge.

1 Bételgeuse



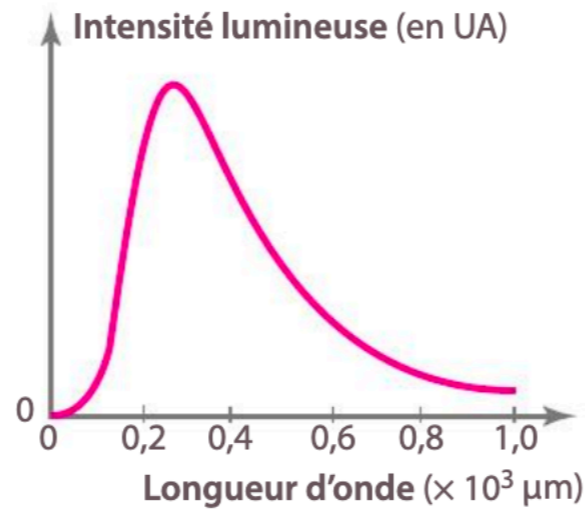
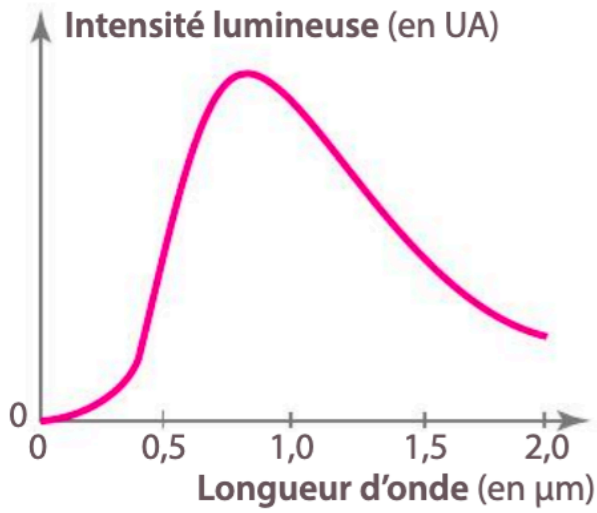
2 Rigel



FORMULE

Loi de Wien : la température T (en kelvins) d'un corps et la longueur d'onde λ_{\max} (en mètres) sont liées par la relation :

$$\lambda_{\max} \times T = 2,90 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$



1. À partir des spectres et en utilisant la loi de Wien, déterminer les températures de surface des étoiles Bételgeuse et Rigel.

2. Dans la vie courante, en peinture par exemple, le rouge est une couleur dite « chaude », contrairement au bleu. Ces qualificatifs s'appliquent-ils aux étoiles ?

8 Équivalence masse-énergie

Le Soleil produit un rayonnement dont la puissance totale est égale à $P_{\text{totale}} = 3,87 \times 10^{26} \text{ W}$.

► Calculer l'énergie dégagée par notre étoile chaque seconde et calculer la masse perdue correspondante.

RAPPEL

- $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Fiche révision Chapitre 3 - Soleil

- Lorsqu'un objet possède une certaine température T , il émet un rayonnement électromagnétique (de la lumière si suffisamment chaud)
- La loi de Wien permet de relier la température T d'un objet à la longueur d'onde du maximum d'émission λ :

$$m \quad \lambda_{max} \times T = \beta \quad \text{constante}$$

K

- L'unité SI de la température est le Kelvin, K.
- Savoir passer de Kelvin en degré Celsius et inversement (On vous donnera la relation : $T(K) = \theta(^{\circ}C) + 273$)
- L'énergie dégagée par le Soleil vient des réactions de **fusions nucléaires**.
- Au cours de ces réactions, une partie de la masse du Soleil est convertie en énergie selon **l'équivalence masse-énergie** énoncée par Albert Einstein en 1905.

$$\text{Joule (J)} \quad E = m \times c^2 \quad \text{célérité de la lumière}$$

Kg

$3,0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$J \quad E = P \times t$$

W

s

- Lien entre puissance et énergie : $E = P \times t$