



POUR COMMENCER

Testez votre culture scientifique

Identifiez la bonne réponse

1. Le rayonnement solaire est produit par:

- a. les réactions de fusion qui ont lieu à l'intérieur de Soleil
- b. les jets de gaz chauds à la surface du Soleil
- c. les interactions entre le Soleil et les planètes

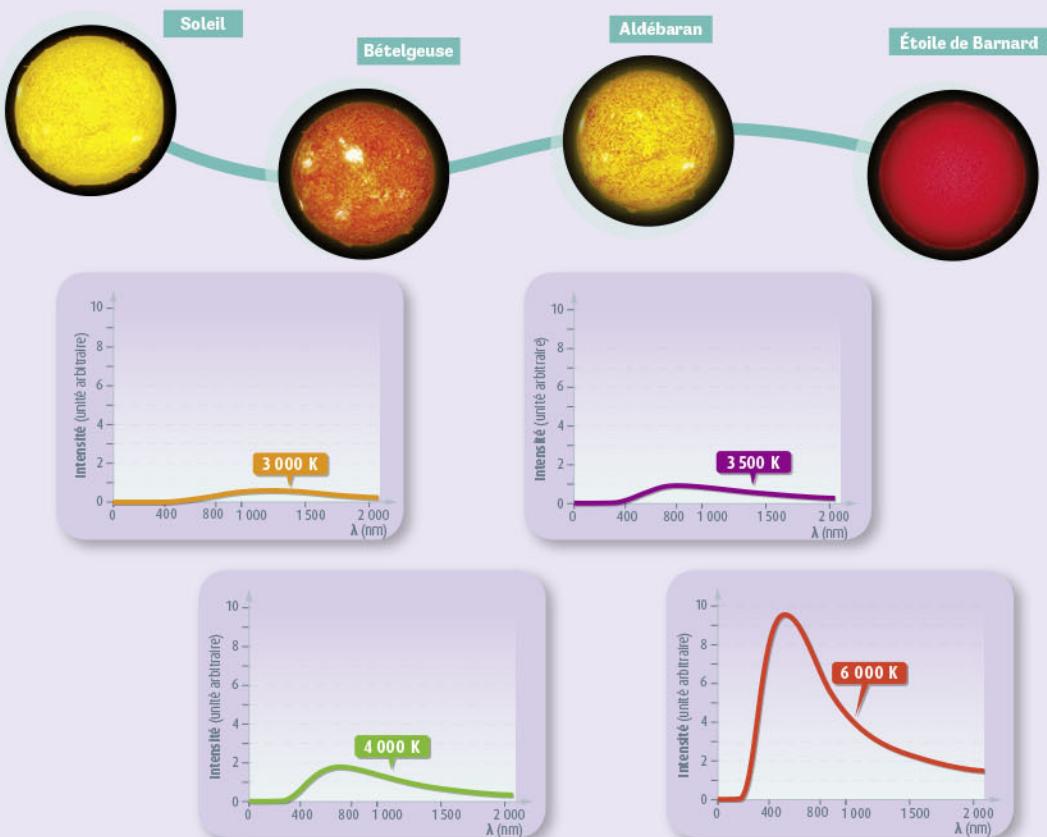
2. À une heure donnée, on reçoit plus de puissance solaire en été qu'en hiver car:

- a. la Terre est plus proche du Soleil
- b. le Soleil est plus haut dans le ciel
- c. il y a moins de nuages

Recherches Internet

Recherchez le type et la température de surface de chacune des étoiles ci-dessous.

Associez-leur alors le bon spectre et placez-les, avec leur spectre, sur une échelle de température.



Dans le désert à Margham
(Émirats arabes unis).

CHAPITRE

4

LE RAYONNEMENT
SOLAIRE

- 
- The background of the page is a photograph of a desert landscape. In the foreground, several camels are walking across the sand. Their long shadows are cast onto the large sand dunes behind them, creating a rhythmic pattern of light and dark stripes. The sand has a warm, golden-brown hue under the sunlight.
- UNITÉ 1** Le carburant du Soleil
 - UNITÉ 2** Température et couleur du Soleil
 - UNITÉ 3** L'ensoleillement terrestre

Le carburant du Soleil

Depuis sa naissance, le Soleil émet un rayonnement très puissant grâce aux réactions qui ont lieu dans son noyau.

Quelle est l'origine du rayonnement solaire ?

Aux origines du Soleil



DOC 1 Les nébuleuses d'Orion et de la tête de cheval.

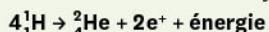
Grâce à l'observation stellaire et à des modèles théoriques, on pense que c'est dans des nébuleuses de ce type que naissent les étoiles, suite à l'effondrement de nuages de gaz et de poussières sous l'effet de la gravité. Les étoiles qui viennent de naître sont entourées d'un disque de gaz et de poussières dans lequel se forment les planètes et des météorites issues de collisions incessantes entre des «embryons de planètes» en formation.

Pratique scientifique



DOC 2 La météorite NWA 2364. Découverte en 2004, elle a été datée par radiochronologie (voir p. 149) à 4,568 milliards d'années. C'est la plus vieille météorite jamais découverte sur Terre. Les météorites fournissent une bonne datation du système solaire (et donc du Soleil) car elles se sont refroidies et solidifiées très rapidement après sa formation.

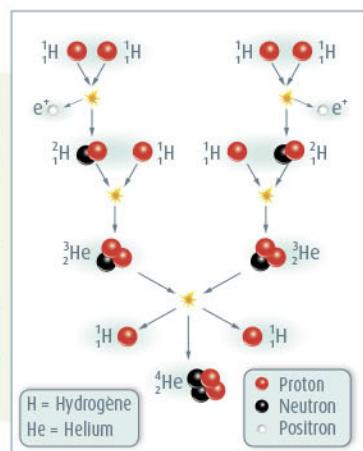
Lors de la formation d'une étoile, l'effondrement du nuage de gaz et de poussières s'accompagne d'une augmentation de température d'autant plus importante que la masse du nuage est importante. Lors de la formation du Soleil, l'augmentation de température a été telle que des réactions de fusion de l'hydrogène ont pu commencer :



Ces réactions se poursuivent aujourd'hui et le rayonnement solaire est une manifestation de l'énergie qu'elles libèrent.

	Atome d'hydrogène	Atome d'hélium	Positron (e^+)
Massé (kg)	$1,67262 \cdot 10^{-27}$	$6,64648 \cdot 10^{-27}$	$0,00091 \cdot 10^{-27}$

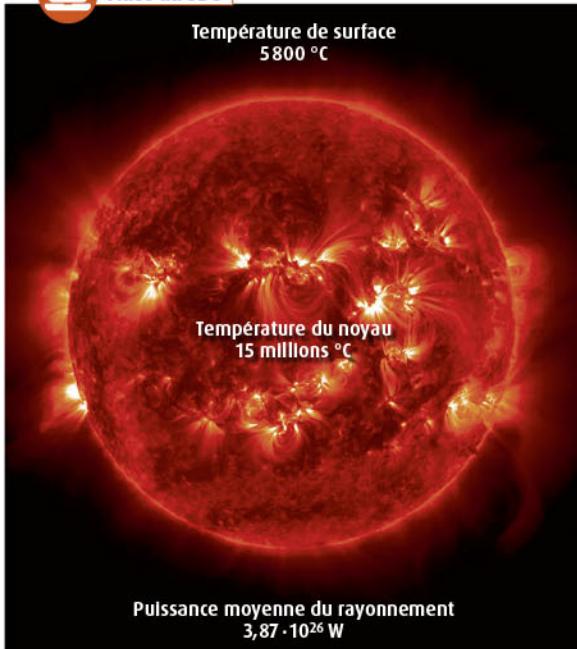
DOC 3 La réaction de fusion de l'hydrogène.



Le Soleil se consume



Vidéo du SDO



Pratique scientifique

DOC 4 Photo du Soleil prise par l'observatoire SDO.

L'énergie dégagée par les réactions de fusion de l'hydrogène maintient le Soleil à une température très élevée.

La température de sa surface a été déterminée à partir de l'étude du rayonnement qu'il émet (voir unité suivante), et la température de son noyau en étudiant les conditions de réalisation de la fusion de l'hydrogène. La puissance moyenne du rayonnement solaire a, quant à elle, été mesurée grâce à des appareils appelés bolomètres, embarqués à bord des satellites d'observation astronomique.

rappel

Relation entre puissance et énergie

$$P_{\text{moyenne}} = \frac{E}{\Delta t}$$

Avec

P_{moyenne} = puissance moyenne du phénomène exprimée en watts (W)
 E = énergie délivrée par le phénomène exprimée en joules (J)
 Δt = durée du phénomène exprimée en secondes (s)

Histoire des sciences

Albert Einstein est aujourd'hui considéré comme l'un des plus grands scientifiques de l'histoire. L'année 1905 est surnommée son *annus mirabilis* (année merveilleuse en latin) car ce fut l'année la plus productive de sa vie. Il découvrit notamment, cette année-là, la célèbre équation appelée équivalence masse-énergie. Cette relation exprime le fait que la masse d'un objet matériel peut fournir de l'énergie.

$$E = mc^2$$

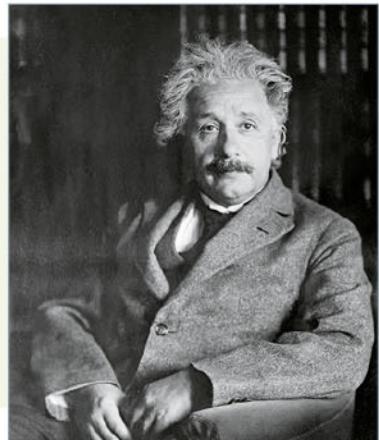
Avec E = énergie en joules (J)

m = masse en kilogrammes (kg)

c = vitesse de la lumière dans le vide

$$= 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

DOC 5 Einstein et l'équivalence masse-énergie.



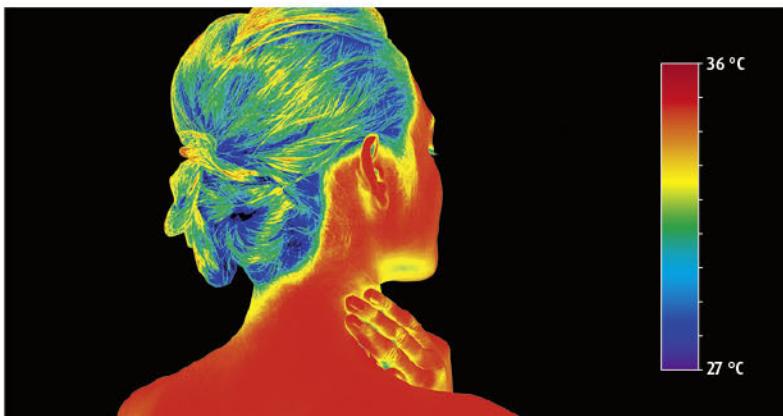
ACTIVITÉ GUIDÉE

- Calculez la masse perdue lors d'une réaction de fusion de noyaux d'hydrogène, puis en déduire, avec l'équivalence masse-énergie, l'énergie dégagée par cette réaction (DOC. 3 ET 5).
- Justifiez que l'énergie dégagée chaque seconde par le Soleil vaut $3,87 \cdot 10^{26} \text{ J}$ (DOC. 4).
- Avec l'équivalence masse-énergie, en déduire la masse perdue chaque seconde par le Soleil (DOC. 5).
- En utilisant l'âge du Soleil (en secondes), évaluez l'énergie dégagée par le Soleil depuis sa naissance (DOC. 2 ET 4).
- Avec l'équivalence masse-énergie, en déduire la masse perdue par le Soleil depuis sa naissance (DOC. 5).

Température et couleur du Soleil

Le Soleil étant très chaud, aucune sonde ne peut s'approcher suffisamment de lui pour mesurer sa température. Pour la connaître, les scientifiques sont donc passés par l'étude du rayonnement solaire.

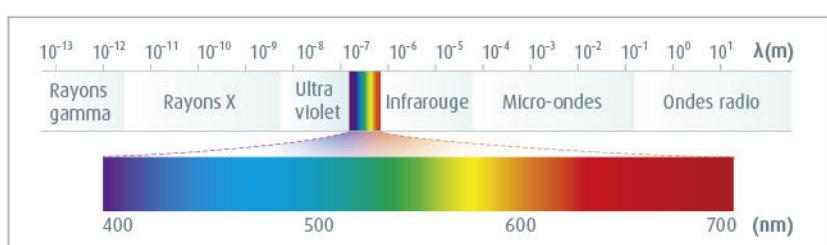
Comment détermine-t-on la température et la couleur de la lumière du Soleil ?



DOC 1 Corps humain photographié avec une caméra infrarouge. Tout corps de température non nulle émet un rayonnement thermique qui dépend de sa température. Celui des humains, qui correspond à des températures allant de 20°C à 40°C environ, peut être observé grâce à une caméra infrarouge.

DOC 2 Les domaines du spectre électromagnétique.

La lumière se propage sous forme d'ondes électromagnétiques. Le spectre de la lumière visible se limite, pour les humains, aux longueurs d'onde comprises entre 400 et 700 nm.



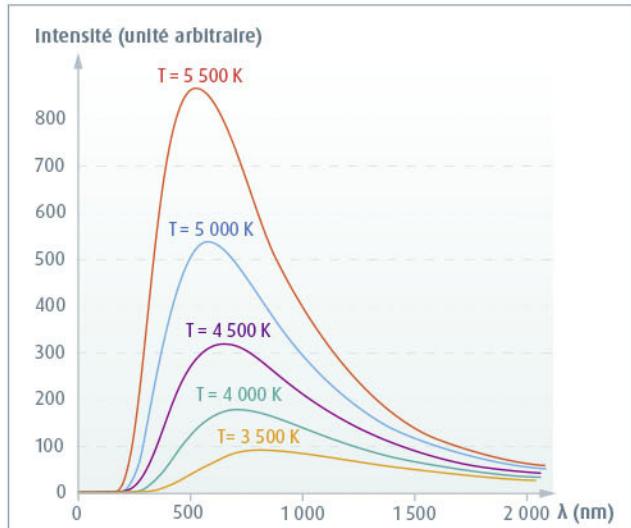
Histoire des sciences



À la fin du XIX^e siècle, la communauté scientifique ne parvient pas à expliquer le spectre du rayonnement solaire (l'intensité de la lumière émise par le Soleil en fonction de la longueur d'onde). Max Planck, physicien allemand, propose alors les éléments théoriques

qui permettent de résoudre ce problème. Il travaille sur un modèle physique : le corps noir, un objet qui absorbe toute la lumière qu'il reçoit. Planck énonce la loi qui porte son nom : le spectre du rayonnement d'un corps noir dépend uniquement de sa température de surface. Il obtient le prix Nobel de physique en 1918.

DOC 3 La loi de Planck.



DOC 4 Spectres de rayonnements de corps noirs à différentes températures. Ce graphe illustre la loi de Planck.

Histoire des sciences

Au cours du XIX^e siècle, les progrès scientifiques et l'étude de la thermodynamique permettent la fabrication de machines à vapeur qui modifient les conditions de transport et de production industrielle. Le développement de la métallurgie permet aussi d'observer la couleur des métaux, passant de rouge à blanc, à haute température. Wilhelm Wien, physicien allemand, énonce la loi portant son nom, qui stipule que la longueur d'onde du maximum d'émission du rayonnement

d'un corps noir est inversement proportionnelle à la température absolue de sa surface.
Wien obtient le prix Nobel de physique en 1911.

$$\lambda_{\max} = \frac{2,8989 \cdot 10^{-3}}{T}$$

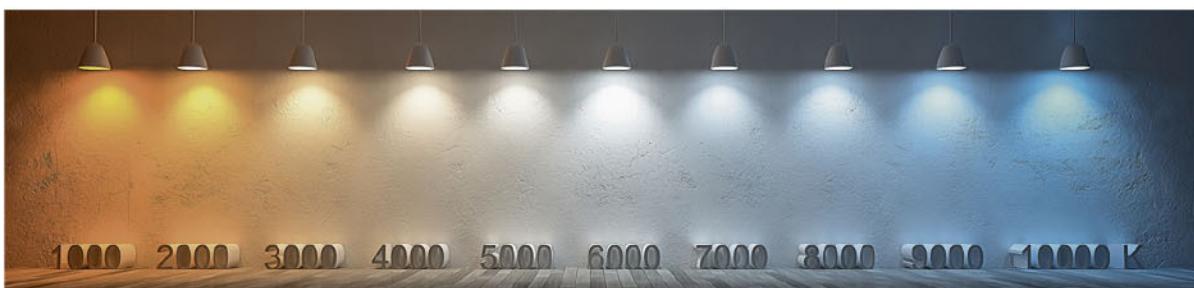
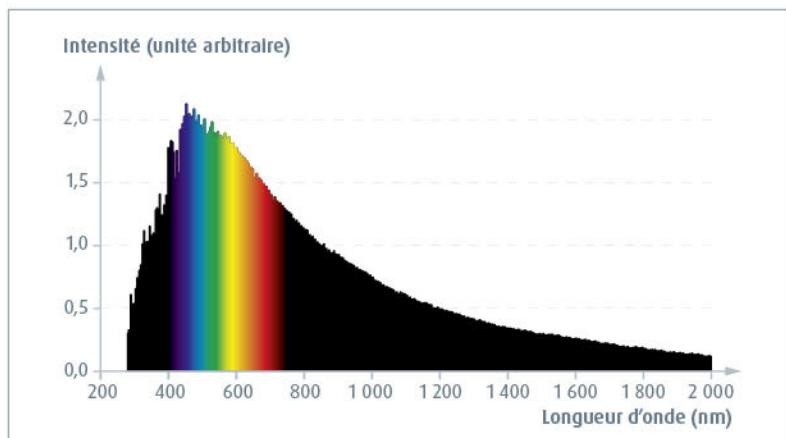
avec λ_{\max} = longueur d'onde du maximum d'émission en mètres (m)
et T = température absolue de surface en kelvin (K)

DOC 5 La loi de Wien.**rappel**

Lien entre degrés Celsius et kelvin

$$T(K) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15$$

La température en kelvin est dite température absolue.

DOC 6 Le spectre du rayonnement solaire. Le Soleil peut être assimilé à un corps noir.**DOC 7 Ampoules LED de différentes couleurs.**

La température marquée sous chaque lampe LED n'indique pas la température réelle de la lampe, car les LED ne sont pas des corps noirs. Elle correspond à la température d'un corps noir qui émettrait une lumière de cette couleur. Ainsi, un corps noir à 1 000 K émet une lumière orangée et un corps noir à 10 000 K une lumière bleutée.

ACTIVITÉ GUIDÉE

1. Grâce à la loi de Planck, trouvez graphiquement la longueur d'onde du maximum d'émission d'un corps noir dont la température est de 3 500, 4 000, 4 500, 5 000 ou 5 500 K (docs 3 et 4).
2. Vérifiez alors, pour chaque température, si cette longueur d'onde indique la couleur perçue du rayonnement (docs 2 et 7).
3. Vérifiez ensuite, pour chaque température, que la loi de Wien est respectée (doc. 5).
4. En utilisant la loi de Planck, puis la loi de Wien, calculez la température du Soleil (docs 4 à 6).
5. Proposez alors une explication au fait que le Soleil émet une lumière blanche (doc. 7).

L'ensoleillement terrestre

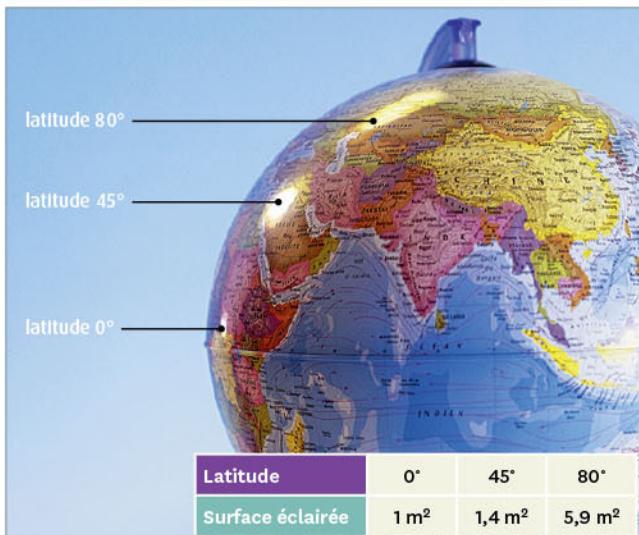
L'énergie solaire n'est pas distribuée équitablement à travers le monde. Pour en comprendre la raison, il faut étudier la configuration du système Terre-Soleil.

Comment l'énergie solaire reçue par la Terre varie-t-elle dans l'espace et dans le temps ?

EXPÉRIMENTATION

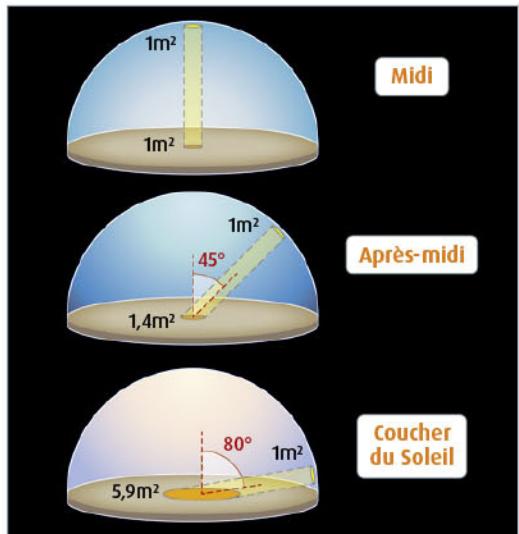


Protocole



DOC 1 Comparaison de la surface éclairée par un faisceau lumineux de même diamètre à différentes latitudes.

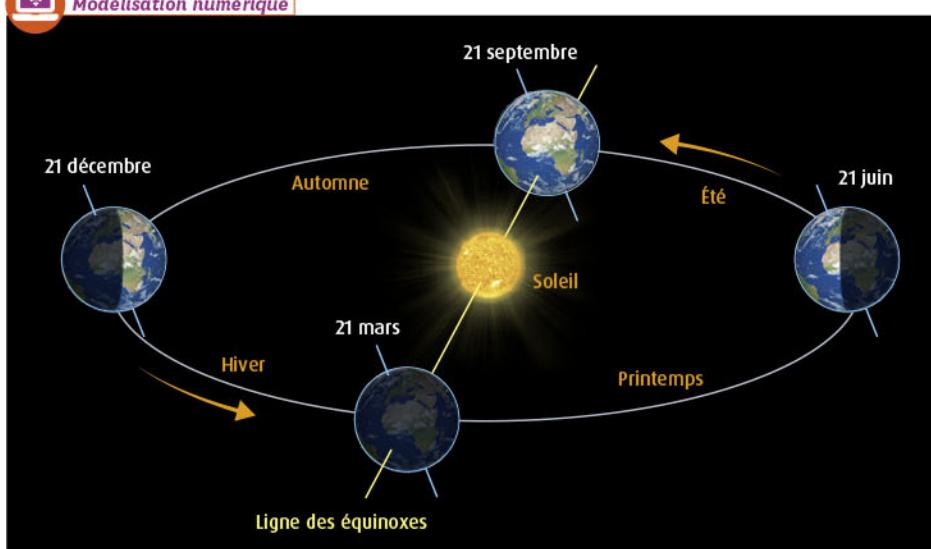
Le tableau donne la surface terrestre qui est éclairée, à différentes latitudes, par un faisceau lumineux dont la section fait 1 m².



DOC 2 Comparaison de la surface éclairée à l'équateur par un faisceau lumineux de même diamètre à différentes heures de la journée.

Entre son lever et son coucher, le Soleil décrit une trajectoire circulaire dans le ciel (voir DOC. 4). Aussi, l'angle entre les rayons solaires et la normale à la surface du sol varie.

Modélisation numérique



DOC 3 Les saisons dans l'hémisphère Nord.

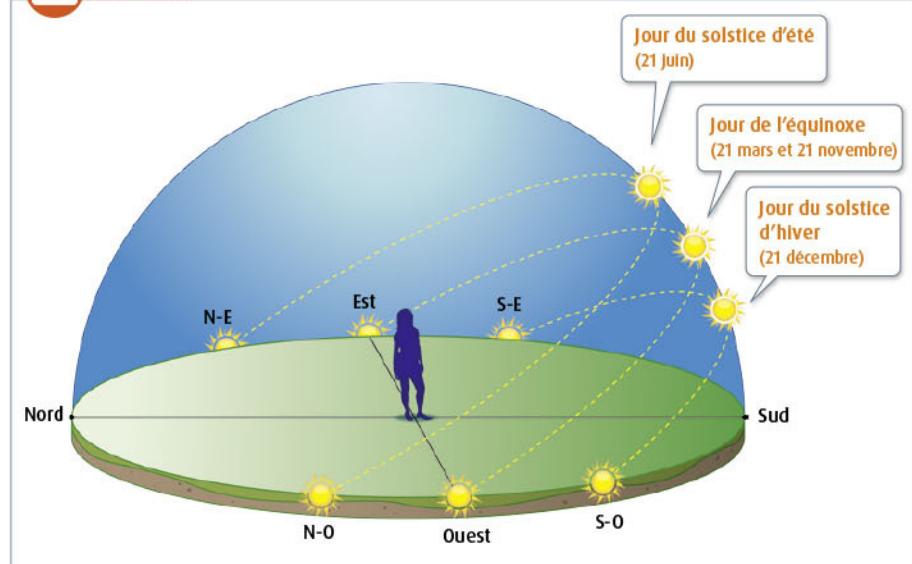
L'axe de rotation de la Terre est incliné de 23° par rapport à la perpendiculaire à son plan orbital. C'est cette inclinaison qui est à l'origine des saisons.



Animation

DOC 4 Trajectoire du Soleil dans le ciel de l'hémisphère Nord en fonction de la saison.

À midi, le Soleil atteint sa hauteur maximale dans le ciel le jour du solstice d'été et sa hauteur minimum le jour du solstice d'hiver. Ces hauteurs dépendent de la latitude du lieu.



Mois	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	JUIL.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Hémisphère nord												
Paris (°C)	2,9	8	11,3	11,9	17	21,8	22	20,9	16,4	15,1	8,8	6,3
Abu Dhabi (°C)	20,9	19,2	25,4	30,6	33,5	35,4	39,2	38,4	35,3	32	27,2	22
Moscou (°C)	-8,0	-4,8	2,5	5,6	10,9	14,7	18,2	19,0	13,4	5,0	-1,5	-6,2
Hémisphère sud												
Asuncion (°C)	29,1	28	27,0	22,8	21,2	18,8	20,8	22,9	22,4	24,3	24,6	28,1
Nairobi (°C)	20,7	21,8	22,7	21,6	20,3	19,5	19,1	19,6	19,7	21,7	20,1	20,7
Christchurch (°C)	17,0	17,1	15,2	12,4	8,2	6,7	5,9	8,3	10,5	12,2	13,9	15,8



DOC 5 Températures moyennes mensuelles et latitudes de six villes à travers le monde.

- Latitudes:
- Paris: 48,9° N
- Abu Dhabi: 24,5° N
- Moscou: 55,8° N
- Asuncion: 25,3° S
- Nairobi: 1,29° S
- Christchurch: 43,5° S

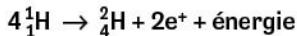
ACTIVITÉ GUIDÉE

1. Identifiez les trois facteurs temporels et géographiques qui déterminent l'ensoleillement reçu par un lieu sur Terre (docs 1 à 4).
2. Expliquez les variations de température en fonction du mois à Paris (docs 3 à 5).
3. Tracez les courbes de température moyenne en fonction du mois pour les différentes villes, puis calculez leurs températures annuelles moyennes (doc. 5).
4. À partir de leurs latitudes, expliquez les différences observées (docs 1, 3 et 5).



1. Le carburant du Soleil > UNITÉ 1

► Une étoile se forme à partir de l'effondrement gravitationnel de gaz et de poussière. Lorsque sa masse est suffisante, une réaction de fusion de l'hydrogène s'amorce :



► La masse des produits de cette réaction est plus petite que la masse des réactifs : la perte de masse est l'énergie libérée, selon l'équivalence masse-énergie d'Einstein :

$$E = mc^2$$

avec m : la masse perdue (en kg) ;

c : vitesse de la lumière dans le vide ($c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).

► L'énergie libérée par le Soleil provient de la perte de masse de celui-ci.

► La puissance libérée par le Soleil s'exprime en fonction de la quantité d'énergie libérée E pendant la durée Δt :

$$P_{\text{moyenne}} = \frac{E}{\Delta t}$$

2. La température du Soleil > UNITÉ 2

► Tout corps porté à une certaine température émet des ondes électromagnétiques : c'est le **spectre de rayonnement électromagnétique**. Lorsque la longueur d'onde de ce spectre est comprise entre 400 et 700 nm, il s'agit de lumière visible.

► Un **corps noir** désigne un objet qui absorbe parfaitement toute la lumière qu'il reçoit. La longueur d'onde du maximum de rayonnement λ_{max} d'un corps noir est donnée par la **loi de Wien** :

Rappel
 T (en K) = T (en °C) + 273,15

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2,8989 \cdot 10^{-3}}{T}$$

avec T : température absolue de la surface du corps, en kelvin (K).

► La couleur de ce maximum de rayonnement ne correspond pas à la couleur apparente de l'ensemble du rayonnement.

3. L'ensoleillement terrestre > UNITÉ 3

► L'éclairement reçu au sol dépend de la hauteur apparente du Soleil dans le ciel.

► Cette dernière dépend de :

- l'heure : l'ensoleillement est maximal à midi heure solaire
- la latitude : plus elle est élevée, c'est-à-dire plus on est proche des pôles, plus l'ensoleillement est faible
- la saison : dans l'hémisphère nord, l'ensoleillement est plus important l'été.

► La température moyenne reflète l'éclairement, mais pas uniquement.

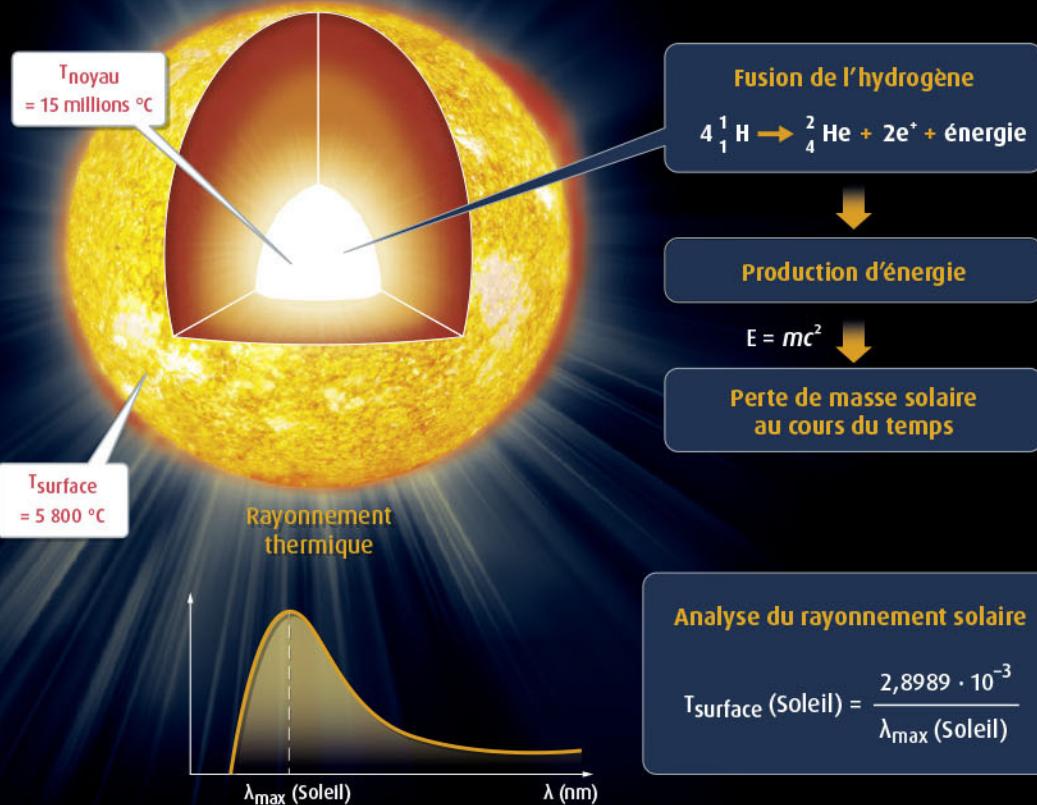
Les mots-clés du chapitre

Corps noir • Loi de Wien • Puissance • Spectre de rayonnement électromagnétique

► Lexique p. 251

l'essentiel par l'image

Production du rayonnement solaire



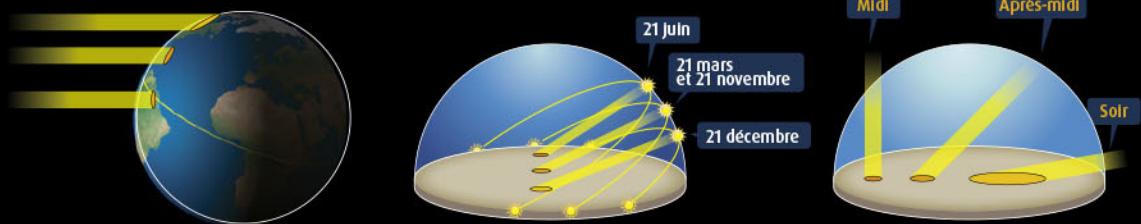
Puissance solaire reçue par unité de surface terrestre

Elle dépend de :

La latitude

La saison

L'heure



Tester ses savoirs

1 Vrai/Faux

Identifier les affirmations fausses et rectifiez-les.

- a. Les réactions de fusion de l'hydrogène dans le Soleil s'accompagnent d'une augmentation de sa masse.
- b. Les étoiles, dont le Soleil, perdent de l'énergie par rayonnement.

- c. La longueur d'onde du maximum d'émission d'un corps noir est proportionnelle à la température absolue de sa surface.
- d. L'ensoleillement ne dépend pas de l'heure de la journée.
- e. L'ensoleillement dépend de la latitude.

2 QCM

Pour chaque proposition, identifiez la bonne réponse.

1. Le Soleil:

- a. est plus léger qu'à sa naissance
- b. est plus lourd qu'à sa naissance
- c. a la même masse qu'à sa naissance

2. Sur le schéma ci-dessous, le rendement du panneau solaire est maximal dans:



- a. la 1^{re} configuration
- b. la 2^e configuration
- c. la 3^e configuration

3. La perte de masse d'une étoile, notée m , peut être calculée grâce à:

- a. l'énergie produite par l'étoile: $E = mc^2$
- b. la température de l'étoile: $m = \frac{1}{T^2}$
- c. la longueur d'onde du maximum d'émission de l'étoile: $\lambda_{\max} = \frac{2,8989 \cdot 10^{-3}}{m}$

3 Question de synthèse

Expliquez en quoi l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport à la perpendiculaire à son plan orbital a une influence sur la température terrestre.

● Critères de réussite

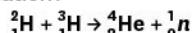
- ✓ J'ai présenté la puissance solaire reçue par unité de surface terrestre et j'ai identifié la situation pour laquelle la puissance reçue est maximale.
- ✓ J'ai réalisé un schéma saisonnier au cours de la rotation annuelle de la Terre.
- ✓ J'ai rédigé des phrases grammaticalement correctes et j'ai soigné l'orthographe.

4 Calculer

La fusion du deutérium et du tritium

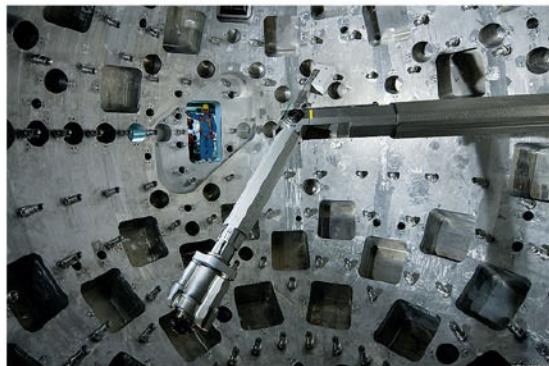
À l'intérieur de la chambre d'expérimentation du Laser Mégajoule (LMJ), les scientifiques du CEA (Commissariat à l'énergie atomique) essayent de réaliser une réaction de fusion à l'aide de puissants lasers.

Celle-ci a pour équation :



Noyau	Masse (kg)
Deutérium ${}^2\text{H}$	$3,34358 \cdot 10^{-27}$
Tritium ${}^3\text{H}$	$5,00736 \cdot 10^{-27}$
Hélium ${}^4\text{He}$	$6,64466 \cdot 10^{-27}$
Neutron 1n	$1,67493 \cdot 10^{-27}$

DOC 2 Les masses des éléments de la réaction de fusion.



DOC 1 À l'intérieur du LMJ.

QUESTIONS

- Calculez la quantité de masse perdue lors de la réaction de fusion d'un noyau de deutérium avec un noyau de tritium.
- Grâce à l'équivalence masse-énergie, calculez l'énergie libérée lors de cette réaction.
- Sachant que $E_{\text{mol}} = N_A \cdot E_{\text{libérée}}$, calculez l'énergie E_{mol} libérée par la réaction d'une mole de deutérium avec une mole de tritium.

AIDE

- $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- Vitesse de la lumière : $c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

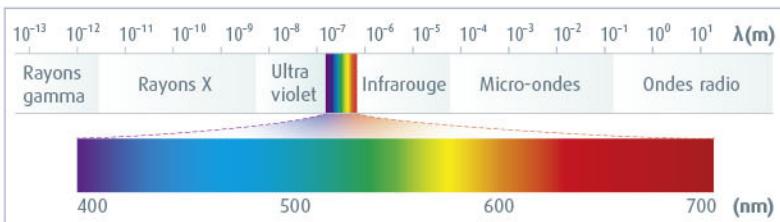
5 Calculer et raisonner

La couleur des étoiles

Un élève a préparé une étude astronomique pour un exposé, mais il a mélangé les températures des quatre étoiles étudiées.

Nom	Soleil	Sirius	Bételgeuse	Arcturus
Couleur	Bleu	Violet	Rouge	Rouge-Orange

DOC 1 La couleur de la longueur d'onde du maximum d'émission des étoiles de l'étude.



DOC 2 Les domaines du spectre électromagnétique.

Étoile	Température ('K)
1	3 500
2	9 940
3	6 070
4	4 290

DOC 3 Les températures de surface des étoiles de l'étude.

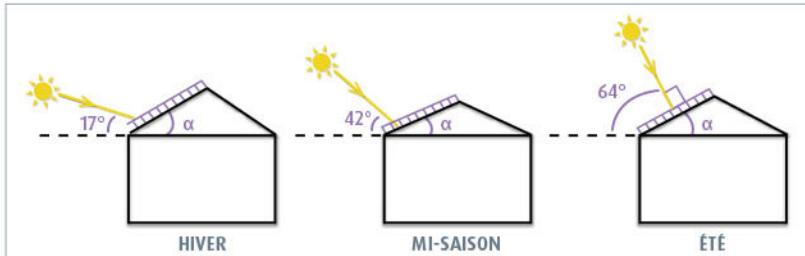
QUESTIONS

- Grâce à la loi de Wien (voir p. 71), calculez la longueur d'onde du maximum d'émission de chacune des étoiles de 1 à 4.
- Déterminez à quelle couleur correspond chacune de ces longueurs d'ondes.
- Associez alors à chaque étoile du doc 1 sa température.
- Expliquez si la couleur de la longueur d'onde du maximum d'émission est la couleur perçue de l'étoile.

6 Analyser des données et calculer

Inclinaison d'un panneau solaire

Lors de la pose d'un panneau solaire, il faut déterminer à quelle inclinaison on souhaite le poser afin de capter le maximum de puissance solaire selon son usage.



DOC 1 Inclinaison apparente du Soleil à Paris à midi selon les saisons.

« Si l'installation de panneaux solaires doit permettre de chauffer une maison, alors le capteur devra recevoir un maximum de puissance en hiver, quand le besoin de chauffage est le plus important. Pour qu'il reste efficace à mi-saison, l'inclinaison optimale sera d'environ 60°. »

DOC 2 Extrait d'une brochure commerciale.

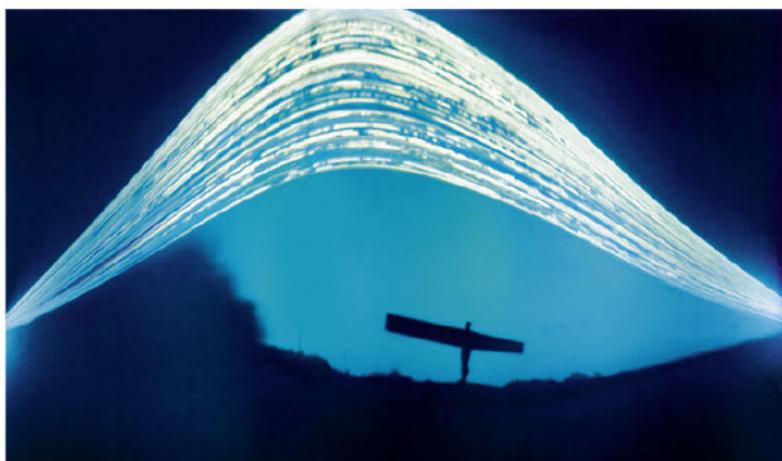
QUESTIONS

- Justifiez qu'avec l'inclinaison α choisie dans le document 1, le panneau solaire reçoit le maximum de puissance possible en été.
- Calculer la valeur de α dans cette configuration.
- Déterminez à quelle inclinaison α le panneau solaire devrait être pour recevoir le maximum de puissance à la mi-saison.
- Déterminez à quelle inclinaison α le panneau solaire devrait être pour recevoir le maximum de puissance en hiver.
- Discutez alors la pertinence de la brochure commerciale.

7 Raisonner, schématiser et rédiger

La hauteur du Soleil dans le ciel

Le photographe Justin Quinnell a capturé, sur une même photographie, toutes les trajectoires quotidiennes du Soleil du 19 décembre 2007 (trajectoire du bas) au 21 juin 2008 (trajectoire du haut).



DOC 1 Photo des trajectoires du Soleil dans le ciel.

AIDE

- Réaliser un schéma de la position du Soleil en fonction de l'heure de la journée.
- Réaliser un schéma de la position de la Terre par rapport au Soleil en fonction de la saison.

QUESTION

Expliquez la forme de la trajectoire du Soleil et pourquoi les trajectoires ont des hauteurs différentes selon le jour de l'année.

Conquête spatiale

L'alimentation en énergie de la Station spatiale internationale

La Station spatiale internationale (ISS), où a travaillé le spationaute français Thomas Pesquet en 2017, est alimentée en électricité grâce à la puissance solaire. Elle utilise pour cela huit panneaux solaires, mesurant chacun 34 mètres par 12. Un système automatique de contrôle permet à ces panneaux de s'orienter pendant le mouvement de la station, afin d'offrir toujours la plus grande surface possible au rayonnement solaire. Lorsque la station est éclairée par le Soleil, la puissance captée, environ 100 kW, est transformée en électricité, dont 40 % sont utilisés directement, et 60 % stockés dans des batteries rechargeables. Ainsi, lorsqu'elle se trouve dans l'ombre de la Terre, la station est alimentée en électricité grâce à ces batteries.



Pour en savoir plus [Site de la NASA](#)

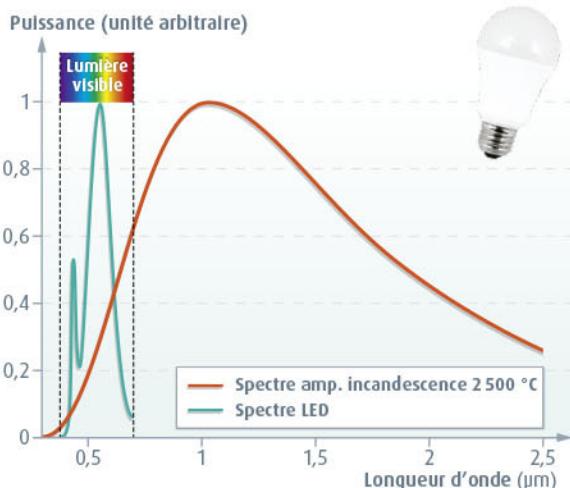
Menez l'enquête

Déterminez le nombre de logements individuels que l'on pourrait alimenter avec les panneaux de l'ISS.

Économies d'énergie

L'intérêt des ampoules LED

Les ampoules commercialisées au xx^e siècle produisaient de la lumière par incandescence d'un filament de tungstène (un métal). Leur spectre d'émission était donc relativement proche de celui d'un corps noir à 2 500 °C, température maximale avant que le tungstène ne commence à se dégrader. Une large partie de ce spectre se trouve dans l'infrarouge : la puissance électrique consommée par l'ampoule était donc convertie principalement en chaleur plutôt qu'en lumière. En revanche, une ampoule de type LED (Light Emitting Diode) a un spectre presque entièrement contenu dans le domaine visible : elle éclaire de manière beaucoup plus efficace. Depuis le début du xxi^e siècle, les ampoules à filament ont donc progressivement disparu au profit des LED.



Spectres d'émission d'une ampoule à incandescence et d'une LED.

Pour en savoir plus [Un blog du quotidien Le Monde](#)

Menez l'enquête

L'aire totale sous le spectre est proportionnelle à la puissance consommée. L'aire dans la partie visible est proportionnelle à la puissance lumineuse émise. En assimilant les courbes à des triangles, calculez les rendements des deux types d'ampoules. Interprétez alors la mention «11 W → 75 Watt» sur l'emballage d'une LED.