

Thème 2 - Le soleil, notre source d'énergie	Chapitre 3 - Le rayonnement solaire	1ère Enseignement scientifique
<u>Sommaire et Savoirs-faire exigibles</u>		

Introduction

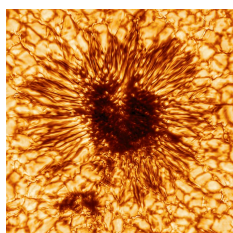
Dans ce chapitre, nous verrons, l'origine de l'énergie rayonnée par le Soleil et sa perte de masse associée, avec la relation d'équivalence masse-énergie d'Einstein. Nous nous intéresserons également aux spectres d'émissions des étoiles, modélisés grâce au modèle du corps noir et à la loi de Planck. La loi de Wien permet d'obtenir une relation entre la longueur d'onde d'émission maximale λ_{max} et la température de surface de l'étoile qui rayonne de l'énergie. Finalement, nous étudierons la puissance radiative du Soleil reçue par une planète ; qui dépend de l'heure (variation diurne), du moment de l'année (variation saisonnière) et de la latitude (zonation climatique).

Sommaire

- un QCM introductif pour vous remettre à jour sur les notions à maîtriser pour ce chapitre,
- le cours sur le rayonnement solaire
- une fiche sur le mécanisme à l'origine de l'énergie solaire
- une fiche sur le lien entre la température d'une étoile et son spectre d'émission
- les exercices du chapitre

Ce qu'il faut savoir faire (partie physique chimie) :

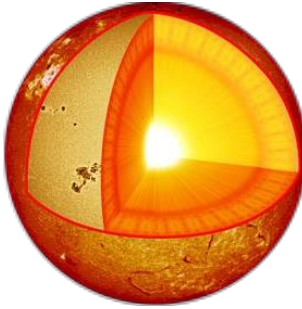
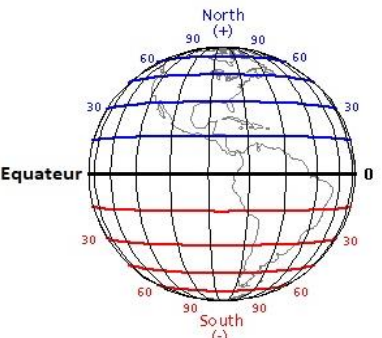
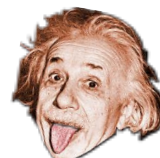
Savoir-faire	Fiche	Exercice(s)
Déterminer la masse solaire transformée chaque seconde en énergie à partir de la puissance rayonnée par le Soleil (avec l'équivalence masse-énergie).	Fiche 1	1
A partir d'une représentation graphique du spectre d'émission du corps noir à une température donnée, déterminer la longueur d'onde d'émission maximale.	Fiche 2	2
Appliquer la loi de Wien pour déterminer la température de surface d'une étoile à partir de la longueur d'onde d'émission maximale.	Fiche 2	2
Sur un schéma, identifier les configurations pour lesquelles la puissance reçue par une surface est maximale ou minimale.	Cours	5 et 6
Analyser, interpréter et représenter graphiquement des données de températures. Calculer des moyennes temporelles de températures. Comparer des distributions temporelles de températures.	Cours	3, 4 et 5



*Tache solaire imagée par le télescope **Inouye** le 28 janvier 2020. Les détails sans précédent révèlent la structure interne d'une tache sombre. Celle-ci mesurait quelque 16.000 kilomètres de diamètre. ©NSO, Aura, NSF*

Thème 2 - Le soleil, notre source d'énergie	Chapitre 3 - Le rayonnement solaire	1ère Enseignement scientifique
QCM introductif		

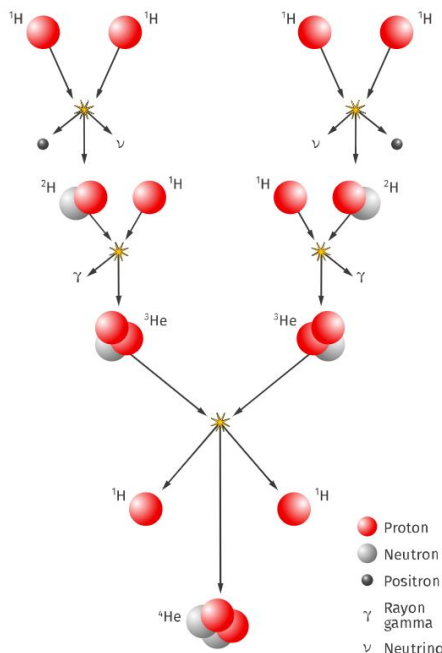
Pour chacune des propositions suivantes, entourer la ou les bonne(s) réponse(s) :

1. Le rayonnement solaire est produit par : a. Les réactions de combustion b. Les réactions de fusion au coeur du Soleil c. Les jets de gaz chauds à la surface du Soleil d. Les interactions entre le Soleil et les planètes.	2. A 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 d. La surface éclairée est plus petite.
3. Un corps chaud incandescent émet un spectre : a. De raies d'émission b. Continu c. De raies d'absorption d. Qui ressemble à un arc-en-ciel	
4. Etudier le spectre d'une étoile comme le soleil permet : a. D'en connaître la taille b. D'en connaître la température c. D'en connaître les éléments présents dans son atmosphère (chromosphère) d. De savoir si elle se rapproche ou s'éloigne de la Terre.	
5. Selon Max Planck (fin XIXème), un corps noir est :  a. Un modèle physique b. Un objet qui n'absorbe aucune lumière c. Un objet qui absorbe toute la lumière qu'il reçoit d. Un objet dont le spectre ne dépend que de sa température.	6. Le Soleil émet de la lumière a. Blanche b. Uniquement visible c. Résultant de la synthèse de toutes les couleurs de l'arc en ciel d. Visible et invisible
	7. Albert Einstein est un savant :  a. Du XVIIème siècle comme Galilée b. Du XXème siècle c. Qui a trouvé une équivalence entre masse et énergie. d. Qui a postulé qu'il n'y a pas plus rapide que la vitesse de la lumière et qu'elle est la même quel que soit le référentiel d'étude à savoir : $3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ dans le vide.
8. Parmi les unités de température ci-dessous, laquelle est celle du Système International (S.I.) ? a. Degré Celcius (°C) b. Degré Fahrenheit (°F) c. Kelvin (K) d. Degré centigrade (°C ^{ent})	10. La latitude : a. Est synonyme d'altitude b. Est une mesure angulaire c. Est l'angle entre l'équateur (0°) et la position étudiée. d. Est synonyme de longitude
9. Le Soleil, notre étoile : a. Perd de la masse au fil du temps b. Utilise du charbon comme combustible c. A une température en son cœur de 5000°C d. A une température en son cœur de plusieurs millions de degrés	

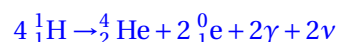
T2Ch3 - Le rayonnement solaire

I Le Soleil et la fusion

I.1 Fusion de l'hydrogène dans les étoiles



Le Soleil est siège de réactions nucléaires qui consomment l'hydrogène qu'il contient. Une grande quantité d'énergie est libérée par la formation de noyaux d'hélium $4\frac{4}{2}\text{He}$ qu'il est possible de former à partir de quatre noyaux d'hydrogène. L'équation bilan peut se résumer à :



où $\frac{0}{1}\text{e}$ représente un positron, γ un rayon gamma et ν un neutrino (particule de charge nulle et de masse très faible).

Remarque : La température du soleil est de quelques dizaines de millions de degrés Celsius en son coeur.

I.2 Équivalence masse-énergie

En 1920, Francis William Aston ¹ découvre qu'un noyau d'hélium 4 est plus léger que quatre noyaux d'hydrogène. On peut en conclure d'une certaine masse est perdue lors de la fusion précédemment décrite. Cette perte de masse avait déjà été introduite en 1905 par Albert Einstein ² grâce à l'**équivalence masse-énergie** :

Équivalence masse-énergie ♥

L'énergie E libérée par les réactions de fusion nucléaire est accompagnée de la perte d'une masse m (du Soleil ici) et dont les deux sont reliées par :

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

avec E en J, m en kg et la vitesse de la lumière dans le vide $c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

Ordre de grandeur : La puissance rayonnée par le soleil produite par les réactions de fusion est $P = 4 \times 10^{26} \text{ W}$ soit une énergie libérée en une seconde de $E = P \times \Delta t = 4 \times 10^{26} \times 1 = 4 \times 10^{26} \text{ J}$. Ainsi chaque seconde, le Soleil perd une masse m transformée en énergie rayonnée qui s'exprime :

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{4 \times 10^{26} \text{ (J)}}{(3 \times 10^8)^2 \text{ (m/s)}^2} \simeq 4 \times 10^9 \text{ kg} \quad \text{soit 4 millions de tonnes par seconde!}$$

1. Francis William Aston (1877-1945) : physicien anglais.

2. Albert Einstein (1879-1955) : physicien helvético-américain.

II Soleil et corps noir

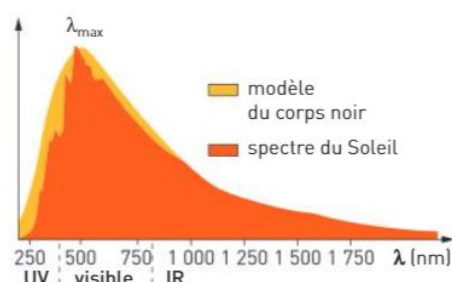
II.1 Spectre d'émission d'un corps

Tous les corps matériels et les étoiles notamment émettent des ondes électromagnétiques et donc perdent de l'énergie par rayonnement.

Du 19^e jusqu'au début du 20^e ème siècle, les scientifiques ont essayé de trouver un modèle permettant de décrire ce rayonnement, en espérant également trouver un lien entre ce dernier et la température de la surface du corps, pour déterminer la température de la surface du Soleil. Ceci a pu être réalisé grâce au modèle du corps noir.

Spectre d'un corps noir

Un **corps noir** est un corps idéal qui absorbe toutes les radiations électromagnétiques qu'il reçoit et qui émet un rayonnement « thermique » dès lors que sa température n'est pas nulle. En 1900, Max Planck ^a introduit la loi de « Planck » qui permet d'obtenir le spectre d'émission d'un corps noir, qui ne dépend que de la température du corps noir et pour lequel on voit la bonne correspondance avec le spectre d'émission du Soleil :



a. Max Planck (1858-1947) : physicien allemand.

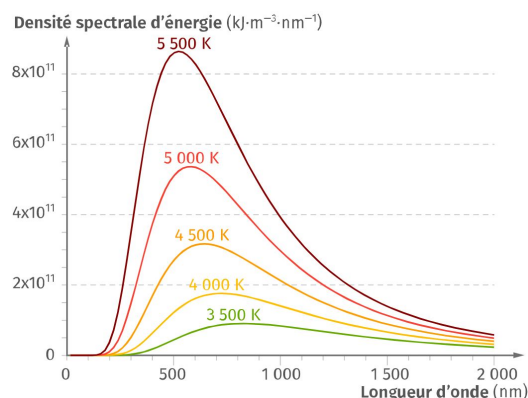
II.2 Loi de Wien

II.2.1 Longueur d'onde d'émission maximale $\lambda_{\max}$

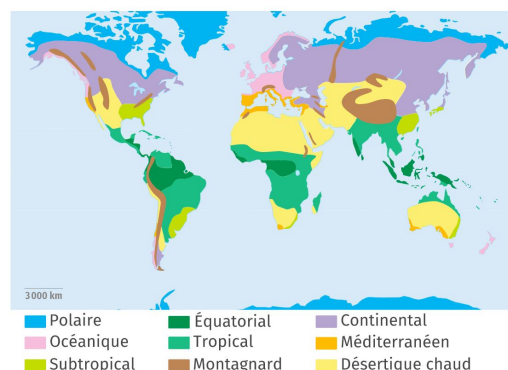
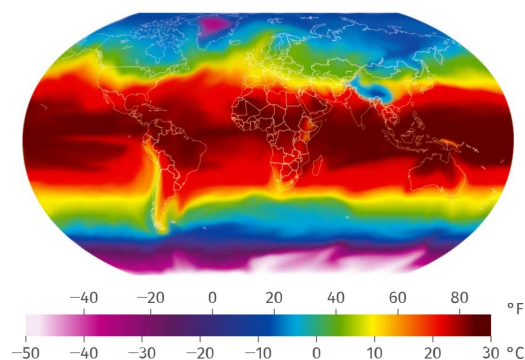
Longueur d'onde d'émission maximale $\lambda_{\max}$

On peut remarquer que le spectre d'un corps noir de dépend que de sa température. On appelle **longueur d'onde d'émission** $\lambda_{\max}$, la longueur d'onde pour laquelle l'émission est maximale.

On la mesure donc en repérant le pic correspondant au maximum d'énergie rayonnée.



Remarque : on constate alors que lorsque la température du corps noir augmente, alors la longueur d'onde d'émission maximale $\lambda_{\max}$ diminue, le maximum d'émission du spectre du corps noir est décalé vers la gauche.



III.2 Une répartition variable dans le temps

III.2.1 Variation de la puissance reçue en fonction des saisons

Animation - Vidéos sur la puissance reçue en fonction des saisons

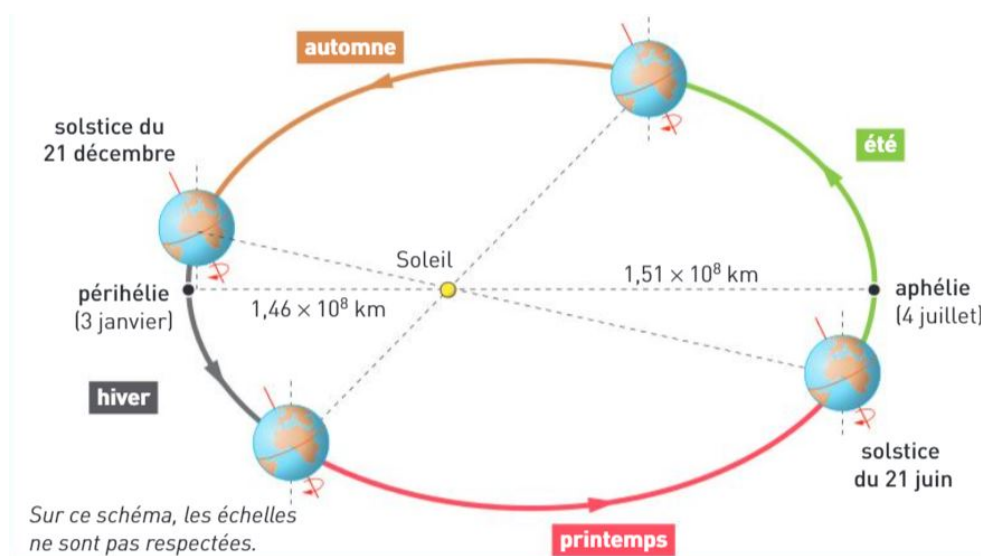


<https://www.youtube.com/watch?v=273fv8bancY8>



<https://www.youtube.com/watch?v=gpJaalC8k8>

L'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport à l'axe perpendiculaire au plan écliptique (contenant la Terre et le soleil) entraîne l'apparition de saisons; les hémisphères sont exposés aux rayons avec des angles d'inclinaison variables au cours de l'année.



III.2.2 Variation de la puissance reçue en fonction de l'heure

La puissance radiative reçue du Soleil par la Terre est bien plus importante le jour que la nuit.

Aussi, la Terre tournant sur elle-même, cela a pour effet, durant le jour, de modifier l'angle d'incidence des rayons solaire et donc la puissance radiative reçue.

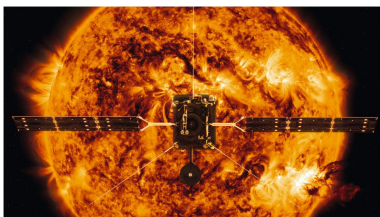
Thème 2 - Le soleil, notre source d'énergie	Chapitre 3 - Le rayonnement solaire	1ère Enseignement scientifique
Fiche 1 - La machine Soleil		

On sait depuis l'Antiquité que le Soleil est à l'origine de la vie telle qu'on la connaît sur Terre, mais ce n'est que depuis le début du 20^e siècle que l'on peut expliquer son fonctionnement.

Quel mécanisme est à l'origine de l'énergie émise par le Soleil?

Document 1 - Puissance rayonnée par le Soleil

Le Soleil est un objet incandescent : il émet de la lumière à cause de sa température. Cette lumière émise par le Soleil permet un transfert d'énergie jusqu'à la Terre. À partir de l'énergie reçue sur Terre, on peut calculer la puissance du rayonnement solaire. En moyenne, la puissance surfacique du rayonnement sur Terre est de 1360 W.m^{-2} , soit une puissance solaire $P_{\text{Soleil}} = 3,85 \times 10^{26} \text{ W}$.

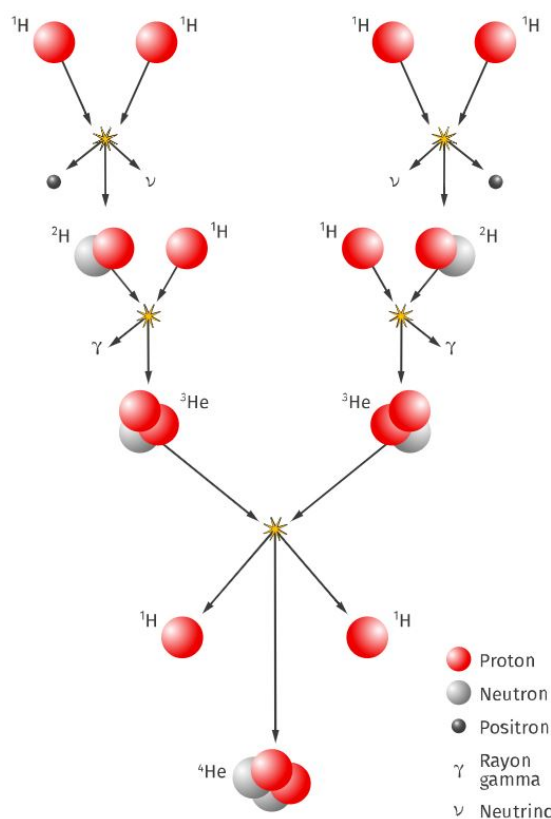


Document 3 - La relation d'Einstein

C'est peut-être la relation mathématique la plus célèbre du monde de la physique : $E = m \times c^2$ (avec E exprimée en J, m en kg et c en m.s^{-1}). La relation d'Einstein établit une équivalence entre énergie et masse. La variation de masse observée lors d'une transformation nucléaire est proportionnelle à l'énergie libérée (ou absorbée) avec un facteur de proportionnalité c^2 . Réciproquement, l'émission d'énergie par un système peut se traduire comme une diminution de la masse de ce système.

Document 2 - Les réactions nucléaires au sein du Soleil

Dans le Soleil, les conditions de pression et de température permettent aux noyaux d'hydrogène ^1_1H d'effectuer des réactions de fusion nucléaire pour former à terme des noyaux d'hélium ^4_2He . Ces fusions nucléaires libèrent une grande quantité d'énergie.



À l'aide des documents ci-dessus et de vos connaissances, répondre aux questions suivantes :

- Doc. 1.** Rappelez la relation permettant de calculer l'énergie transférée E en fonction de la puissance P et de la durée du transfert Δt .
- Doc.2.** Écrivez les équations de réaction nucléaire des trois réactions présentées.
- Doc. 1 et 3.** Quelle quantité d'énergie le Soleil rayonne-t-il chaque seconde? À partir de la relation d'Einstein, déterminez la diminution de masse à laquelle cette énergie émise correspond.
- En supposant que la fin du Soleil soit uniquement due à sa perte de masse, et que la masse actuelle pouvant subir la fusion (Doc.2.) est de $7,7 \times 10^{26} \text{ kg}$, vérifier que son espérance de vie est d'environ 5 milliards d'années.

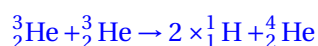
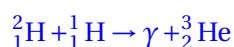
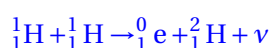
Thème 2 - Le soleil, notre source d'énergie	Chapitre 3 - Le rayonnement solaire	1ère Enseignement scientifique
<u>Fiche 1 - La machine Soleil</u>		

Réponses

1. La relation entre énergie et puissance est :

$$E = P \times \Delta t$$

2. Les équations nucléaires sont :



3. On peut utiliser la relation entre E et P de la première question :

$$E = P \times \Delta t = 3,85 \times 10^{26} \text{ (W)} \times 1 \text{ (s)} = 3,85 \times 10^{26} \text{ (J)}$$

Grâce à la relation d'Einstein, on peut déterminer la diminution de masse ou masse perdue :

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{3,85 \times 10^{26} \text{ (J)}}{(3,0 \times 10^8)^2 \text{ (m.s}^{-2})^2} = 4,3 \times 10^9 \text{ kg}$$

4. Tout d'abord la masse perdue par an est $m_{an} = 4,3 \times 10^9 \times 3600 \times 24 \times 365 = 1,4 \times 10^{17} \text{ kg}$. En suite on peut utiliser un produit en croix à partir du tableau suivant :

Durée (années)	1	T
Masse perdue (kg)	$1,4 \times 10^{17}$	$7,7 \times 10^{26} \text{ kg}$

$$\Rightarrow T = \frac{7,7 \times 10^{26}}{1,4 \times 10^{17}} \times 1 = 5,5 \times 10^9 \text{ années}$$

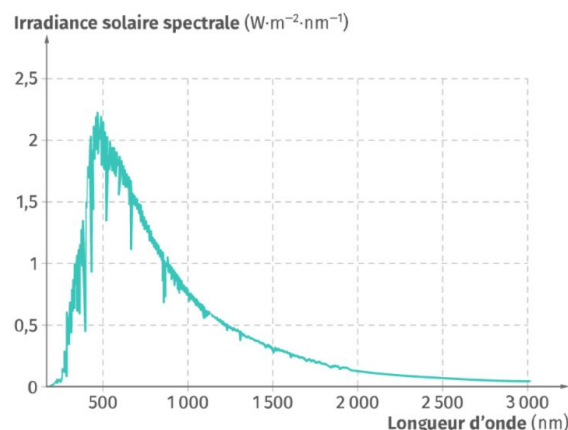
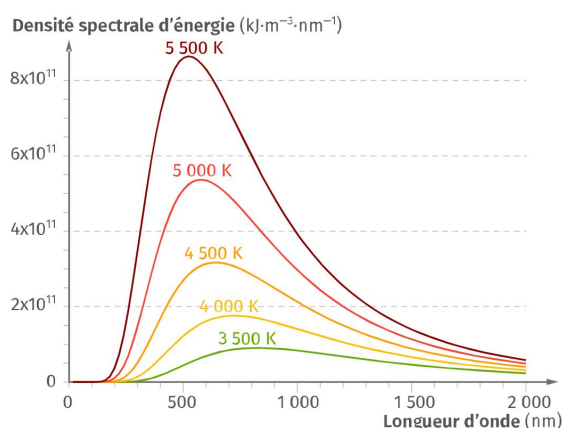
On retrouve bien une espérance de vie d'environ 5 milliards d'années.

Thème 2 - Le soleil, notre source d'énergie	Chapitre 3 - Le rayonnement solaire	1ère Enseignement scientifique
Fiche 2 - A la surface du Soleil		

Le Soleil comme tout corps matériel émet des ondes électromagnétiques. Ces dernières sont interceptées par la surface de la Terre. Leur étude permet de déterminer la température de surface de notre étoile.

Comment l'étude du spectre d'émission du Soleil permet de déterminer sa température de surface?

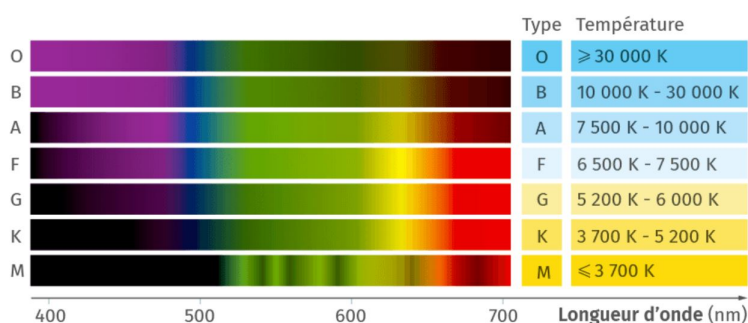
Document 1 - Spectre d'émission d'un corps et loi de Wien



Lorsque l'on trace le spectre d'émission d'objets incandescents de différentes températures (présenté à gauche) on constate que plus l'objet est chaud, plus la longueur d'onde correspondant au maximum d'intensité est faible.

La loi de Wien permet de traduire cette observation. Cette loi s'écrit sous la forme : $\lambda_{\text{max}} = \frac{2,898 \times 10^{-3} \text{ m.K}}{T}$, où T est la température exprimée en K. Pour exprimer T en kelvins, on utilise : $T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15$.

Document 2 - Classification spectrale des étoiles



L'étude du spectre d'émission d'une étoile illustre le lien entre sa température de surface et sa couleur. La classification de Harvard, créée au XX^e siècle, organise les différentes étoiles selon leur spectre d'émission. Les principaux types spectraux sont notés O, B, A, F, G, K et M; chaque type spectral possédant lui-même 10 sous-catégories. Au fur et à mesure de la découverte de nouvelles étoiles, la classification a été étendue à 8 autres types.

A l'aide des documents ci-dessus et de vos connaissances, répondre aux questions suivantes :

- Doc. 1.** Identifiez la longueur d'onde λ_{max} pour laquelle le soleil émet le plus d'énergie.
- Doc. 1.** À partir de la question précédente, déduisez graphiquement la température de la surface du Soleil. Retrouvez cette valeur par le calcul.
- Doc. 2.** Déduisez-en le type d'étoile auquel appartient le Soleil selon la classification de Harvard.

Thème 2 - Le soleil, notre source d'énergie	Chapitre 3 - Le rayonnement solaire	1ère Enseignement scientifique
<i>Fiche 2 - A la surface du Soleil</i>		

Réponses

1. D'après le graphique on mesure une longueur d'onde d'émission maximale $\lambda_{\max} \simeq 480 \text{ nm}$.
2. D'après la figure de gauche, le spectre pour un corps de température égale à 5 500 K correspond à une longueur d'onde d'émission maximale $\lambda_{\max} \simeq 500 \text{ nm}$. On peut en déduire que la température du soleil doit être supérieure à 5 500 K.

Pour Calculer cette température, on peut utiliser la loi de Wien :

$$T = \frac{2,898 \times 10^{-3} \text{ (m.K)}}{\lambda_{\max} \text{ (m)}} \simeq \frac{2,898 \times 10^{-3} \text{ (m.K)}}{480 \times 10^{-9} \text{ (m)}} \simeq 6000 \text{ K}$$

Le résultat obtenu concorde bien avec une température supérieure à 5 500 K.

3. D'après la classification de Harvard, le Sole est une étoile de type G (température entre 5 200 K et 6 000 K).

Thème 2 - Le soleil, notre source d'énergie	Chapitre 3 - Le rayonnement solaire	1ère Enseignement scientifique
Feuille d'exercices		

Exercice 1 - Proxima Centauri

Proxima Centauri C 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.

1. Calculer l'énergie rayonnée chaque seconde par Proxima Centauri (en joule).

$$E = P \times \Delta t = 6,9 \times 10^{23} \text{ (W)} \times 1 \text{ (s)} = 6,9 \times 10^{23} \text{ J}$$

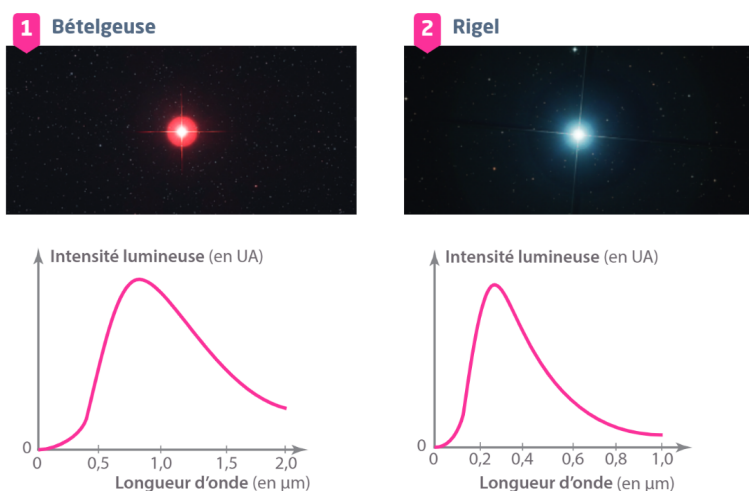
2. À l'aide de la relation d'Einstein, calculer la masse équivalente perdue chaque seconde par Proxima Centauri.

Grâce à la relation d'Einstein, on peut déterminer la diminution de masse ou masse perdue :

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{6,9 \times 10^{23} \text{ (J)}}{(3,0 \times 10^8)^2 \text{ (m.s}^{-2})^2} = 7,7 \times 10^6 \text{ kg}$$

Exercice 2 - 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. 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 ?

1. Pour chaque spectre d'étoile, on recherche d'abord la longueur d'onde d'émission maximale, on trouve graphiquement :

$$\lambda_{\text{max,Bételgeuse}} \simeq 0,85 \mu\text{m} \quad \text{et} \quad \lambda_{\text{max,Rigel}} \simeq 0,24 \mu\text{m}$$

On utilise ensuite la loi de Wien $\lambda_{\text{max}} \times T = 2,90 \times 10^{-3} \text{ m.K}$ dans les deux cas :

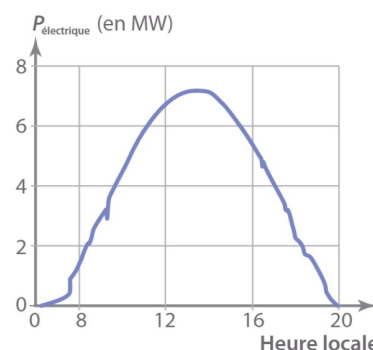
$$T_{\text{Bételgeuse}} = \frac{2,90 \times 10^{-3} \text{ (m.K)}}{\lambda_{\text{max,Bételgeuse}} \text{ (m)}} = \frac{2,90 \times 10^{-3}}{0,85 \times 10^{-6}} = 3,4 \times 10^3 \text{ K}$$

$$T_{\text{Rigel}} = \frac{2,90 \times 10^{-3} \text{ (m.K)}}{\lambda_{\text{max,Rigel}} \text{ (m)}} = \frac{2,90 \times 10^{-3}}{0,24 \times 10^{-6}} = 1,2 \times 10^4 \text{ K}$$

2. Pour les étoiles, c'est l'inverse, une étoile « rouge » sera de température plus faible qu'une étoile de couleur « bleue ».

Exercice 3 - Puissance radiative

La centrale solaire Myrte, en Corse, convertit l'énergie lumineuse du Soleil en énergie électrique grâce à des panneaux solaires photovoltaïques d'une surface totale de $3\,700 \text{ m}^2$. Le graphe ci-contre représente la puissance électrique $P_{\text{électrique}}$ obtenue au cours d'une journée en fonction de l'heure.



1. À quelle heure la puissance électrique est-elle maximale ?

D'après le graphique la puissance électrique obtenue semble maximale vers 13 h 30.

2. Justifier l'allure du graphe obtenu.

Au lever du soleil la puissance électrique obtenue est quasi-nulle car l'éclairement reçu l'est, de même au coucher du soleil. La puissance électrique obtenue sera maximale lorsque le Soleil est proche du zénith, c'est bien ce que l'on observe.

3. Sachant que les panneaux photovoltaïques ont un rendement de l'ordre de 20 %, calculer la puissance radiative $P_{\text{radiative}}$ reçue au maximum de la journée.

$$\eta = \frac{P_{\text{électrique}}}{P_{\text{radiative}}} \Rightarrow P_{\text{radiative}} = \frac{P_{\text{électrique}}}{\eta} = \frac{7 \text{ (MW)}}{0,2} = 35 \text{ MW}$$

4. Calculer la puissance radiative reçue par unité de surface.

$$P_{\text{radiative surfacique}} = \frac{P_{\text{radiative}}}{\text{Surface}} = \frac{35 \times 10^6 \text{ (W)}}{3700 \text{ (m}^2\text{)}} = 9,5 \times 10^3 \text{ W.m}^{-2}$$

Exercice 4 - Puissance radiative et surface

Un panneau solaire de surface $2,00 \text{ m}^2$ reçoit les rayons du Soleil perpendiculairement à sa surface. Dans ces conditions, le sol reçoit une puissance radiative de 433 W.m^{-2} .

1. Calculer la puissance totale reçue par le panneau solaire.

$$P_{\text{totale recue}} = P_{\text{radiative}} \times \text{Surface} = 433 \text{ (W.m}^{-2}\text{)} \times 2,00 \text{ (m)}^2 = 866 \text{ W}$$

2. Que devient la valeur de cette puissance si la surface du capteur est triplée?

Si la surface est triplée, la puissance reçue sera triplée également soit :

$$P'_{\text{totale recue}} = 3 \times 866 \text{ W} = 2598 \text{ W} \simeq 2,60 \times 10^3 \text{ W}$$