

Lycée(s)	Général	Technologique	Professionnel	
Niveau(x)	CAP	Seconde	Première	Terminale
Enseignement(s)	Commun	De spécialité	Optionnel	
Physique-chimie				

L'essentiel sur l'effet de serre atmosphérique

La première partie de ce document est consacrée à un rappel des principales lois relatives à l'émission du corps noir. Dans la deuxième partie, les spectres d'émission de la Terre et d'absorption de certains gaz sont comparés dans le but d'expliquer les raisons pour lesquelles ces gaz sont susceptibles d'absorber le rayonnement infrarouge terrestre, de se réchauffer et d'émettre à leur tour un rayonnement descendant responsable de l'effet de serre.

Mots-clés

Corps noir ; luminance ; loi de Planck ; loi de Wien ; spectre d'émission thermique ; spectre d'absorption infrarouge ; modes de vibration ; moment dipolaire électrique ; effet de serre ; gaz à effet de serre.

Références aux programmes

Tous les groupements de spécialité de la classe de terminale professionnelle.

Module : Utiliser le rayonnement thermique et comprendre l'origine de l'effet de serre atmosphérique.

Sommaire

Introduction 2

Contenus scientifiques 2

- Rayonnement du corps noir 2
- Définition 2
- Historique 2
- Quelques propriétés du rayonnement du corps noir 3
- Retour sur la loi de Wien 4
- L'effet de serre atmosphérique 4
- Spécificité des gaz à effet de serre 4
- Spectre d'absorption de l'atmosphère et fenêtre atmosphérique 5
- Conclusion 6

Compléments et sitographie 6

Introduction

L'effet de serre atmosphérique est le phénomène physique par lequel certains gaz se trouvant dans l'atmosphère absorbent le rayonnement thermique terrestre, se réchauffent et émettent à leur tour un rayonnement.

Un effet de serre naturel permet à la température de la Terre de se maintenir à des valeurs répondant aux conditions de la vie de la faune et de la flore qui se trouvent à sa surface. L'avènement de l'ère industrielle et l'accélération de l'activité humaine ont fait apparaître un effet de serre additionnel ou anthropique avec comme conséquences une augmentation de la température moyenne de la Terre et un dérèglement climatique inéluctable. Comment expliquer ce phénomène ?

Contenus scientifiques

Rayonnement du corps noir

Définition

Un corps noir est un modèle de corps qui est capable d'absorber, sans les réfléchir, toutes les radiations électromagnétiques qu'il reçoit. L'énergie emmagasinée est dissipée par émission d'un rayonnement ayant une étendue spectrale très large et ne dépendant que de la température d'équilibre de ce corps noir.

Un corps noir est, par conséquent, un corps idéal dont l'émissivité et l'absorptivité sont toutes les deux égales à 1.

Historique

Friedrich Paschen et Wilhelm Wien ont étudié ce modèle de rayonnement vers la fin du XIX^e siècle et ont abouti en 1896 à la loi empirique de Wien stipulant que la longueur d'onde de la radiation la plus puissante émise par un corps noir est inversement proportionnelle à sa température. Cette loi a montré une conformité satisfaisante avec les résultats expérimentaux pour les petites longueurs d'onde alors qu'elle s'en est éloignée considérablement pour les grandes longueurs d'ondes.

En 1900, Lord Rayleigh a montré que la puissance rayonnée est proportionnelle à la température absolue et inversement proportionnelle au carré de la longueur d'onde. Compte tenu de ces considérations, la puissance du rayonnement émise pour de petites longueurs d'onde devrait être très grande, ce qui n'est pas du tout le cas. La physique classique ne permet pas de résoudre ce problème, ce qui a conduit Paul Ehrenfest à parler de **catastrophe ultraviolette**.

La luminance énergétique spectrale d'une surface est le flux énergétique émis par la surface par unité d'aire de la surface projetée, par unité d'angle solide, par unité de longueur d'onde. À la fin de l'année 1900, Max Planck, s'appuyant sur ses travaux sur la mécanique quantique, propose une modélisation théorique des spectres de corps noirs en établissant l'expression de la luminance en fonction de la température et de

la longueur d'onde émise :

$$L_{\lambda} = \left(\frac{2hc^2}{\lambda^5} \right) \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$$

où : L_{λ} est la luminance énergétique spectrale en $\text{W.m}^{-2}.\text{m}^{-1}.\text{sr}^{-1}$

h est la constante de Planck $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

k_B est la constante de Boltzmann $k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$

c est la célérité des ondes électromagnétiques dans le vide $c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

T est la température du corps noir étudié

λ est la longueur d'onde de l'onde émise

Le modèle de Planck a permis également de consolider la loi émise en 1879 par Joseph Stefan qui s'est appuyé sur les travaux de son étudiant en doctorat Ludwig Boltzmann. Cette loi donne la puissance intégrale rayonnée par un corps noir :

$$P = \sigma \times T^4$$

où : P est la puissance émise par unité de surface en W.m^{-2}

σ est la constante de Stefan $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

T est la température de la source du rayonnement en K

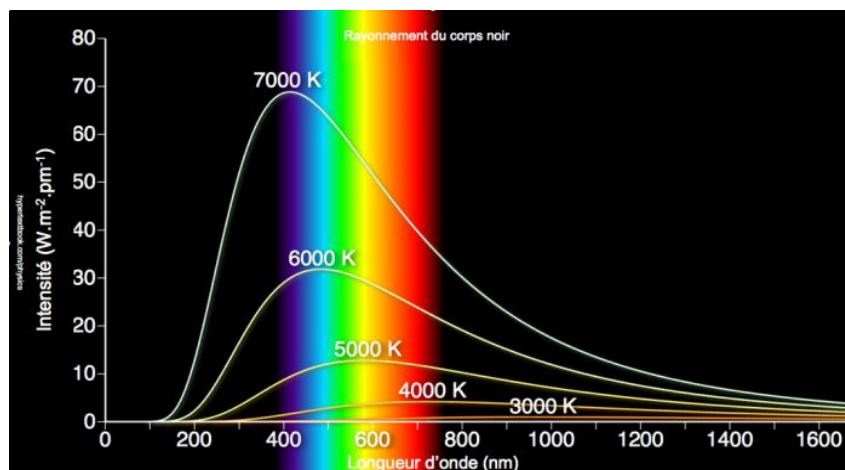
Quelques propriétés du rayonnement du corps noir

Un tracé des courbes représentatives de la luminance en fonction de la longueur d'onde pour des températures appartenant à l'intervalle [200 K ; 350 K] est accessible via une [activité GeoGebra](#) dédiée.

En faisant varier la température du corps noir, les observations sont les suivantes :

- le rayonnement émis se situe entièrement dans l'infrarouge et plus particulièrement dans l'intervalle de l'infrarouge dit thermique [4 μm ; 50 μm] ;
- les longueurs d'ondes émises se déplacent vers le proche infrarouge lorsque la température augmente ;
- la puissance du rayonnement émis augmente lorsque la température augmente.

Le rayonnement des objets ayant une température de quelques centaines de degrés Celsius déborde sur le visible. Les corps très chauds ayant une température de quelques milliers de degrés (lampe à halogène, Soleil, etc.) émettent également dans l'ultraviolet.



La température moyenne de surface de la Terre est de 15°C. Son spectre d'émission s'étale sur tout le domaine de l'infrarouge thermique (voir paragraphe : Spectre d'absorption de l'atmosphère et fenêtre atmosphérique).

Retour sur la loi de Wien

Sur les courbes précédentes, les valeurs des longueurs d'ondes $\lambda_{\max}$ abscisses des maximums obtenus ont été extraites et le nuage des points ($T ; \lambda_{\max}$) est représenté et accessible via une [activité GeoGebra](#) dédiée.

Ce nuage de points est parfaitement ajusté par la fonction définie par :

$$\lambda_{\max}(T) = \frac{2,9 \times 10^{-3}}{T}$$

où : $\lambda_{\max}$ est la longueur d'onde du maximum d'émission en m

T est la température du corps émetteur en K

Il s'agit de la loi de Wien qui prévoit la longueur d'onde du maximum d'émission en fonction de la température du corps émetteur considéré comme un corps noir. Cette loi est valable quelle que soit la température du corps émetteur.

L'effet de serre atmosphérique

Spécificité des gaz à effet de serre

Comme vu précédemment, le spectre d'émission d'un corps noir est un spectre continu. Le spectre d'absorption infrarouge d'une molécule quelconque présente des bandes dues aux modes vibrationnels et, éventuellement, aux transitions rotationnelles (voir Compléments). Les modes de vibrations et rotations de cette molécule peuvent être excités par le rayonnement d'un corps si le spectre d'émission de celui-ci couvre les longueurs d'ondes associées à ces transitions.

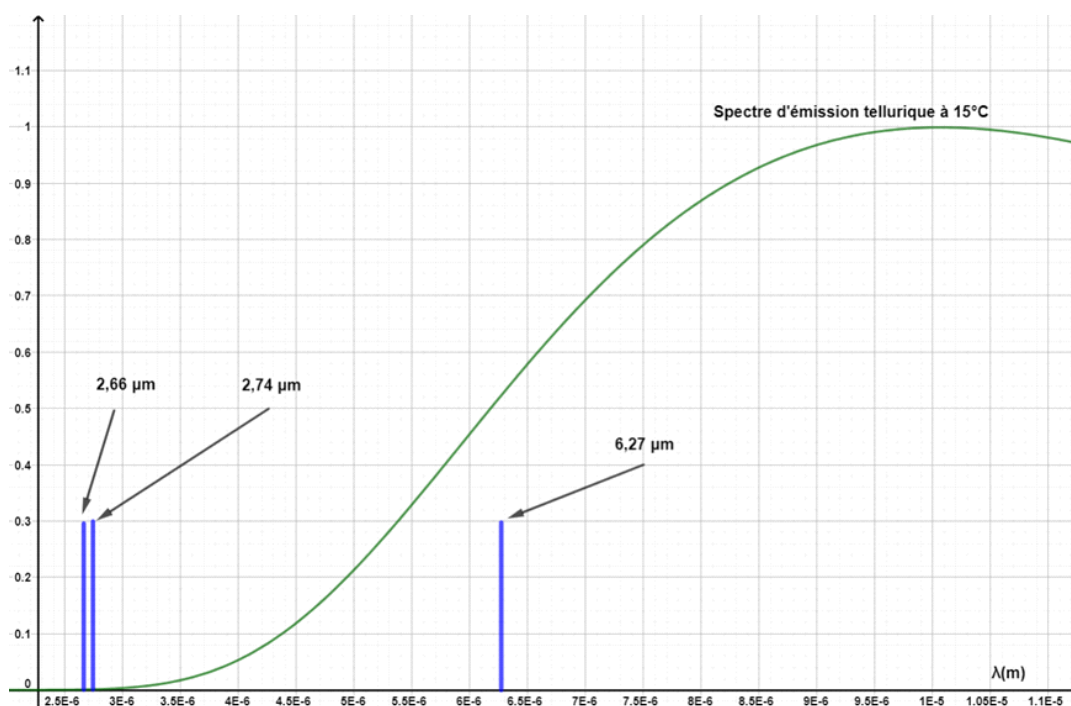


Figure 1 : Superposition du spectre d'émission de la Terre à 15°C avec le spectre d'absorption de l'eau (les rapports des intensités des bandes d'absorption de l'eau ne sont pas respectés)

Sur la figure 1, le spectre d'émission de la Terre à 15 °C et le spectre d'absorption infrarouge de l'eau sont superposés. Les bandes d'absorption à 2,66 μm et 2,74 μm ne sont pas couvertes par le spectre d'émission de la Terre et les modes de vibrations correspondant à ces longueurs d'ondes ne sont quasiment pas activés. Par contre le mode à 6,27 μm est provoqué de manière efficace par le rayonnement tellurique suffisamment intense dans cette zone.

L'air est constitué majoritairement de dioxygène (O_2) et de diazote (N_2) mais d'autres gaz d'origine naturelle ou industrielle peuvent s'y trouver : vapeur d'eau (H_2O), dioxyde de carbone (CO_2), méthane (CH_4), protoxyde d'azote (NO_2), ozone (O_3), les hydrochlorofluorocarbures, les chlorofluorocarbures, les hydrofluorocarbures, le tétrafluorure de carbone, l'hexafluorure de soufre, etc.

Le dioxygène et le diazote n'absorbent aucun rayonnement infrarouge (molécules diatomiques homonucléaires) alors que les autres molécules présentent toutes des bandes d'absorption à des longueurs d'onde contenues dans le spectre d'émission tellurique. Dès lors, **elles sont susceptibles d'absorber ce rayonnement et de participer à l'effet de serre atmosphérique.**

Spectre d'absorption de l'atmosphère et fenêtre atmosphérique

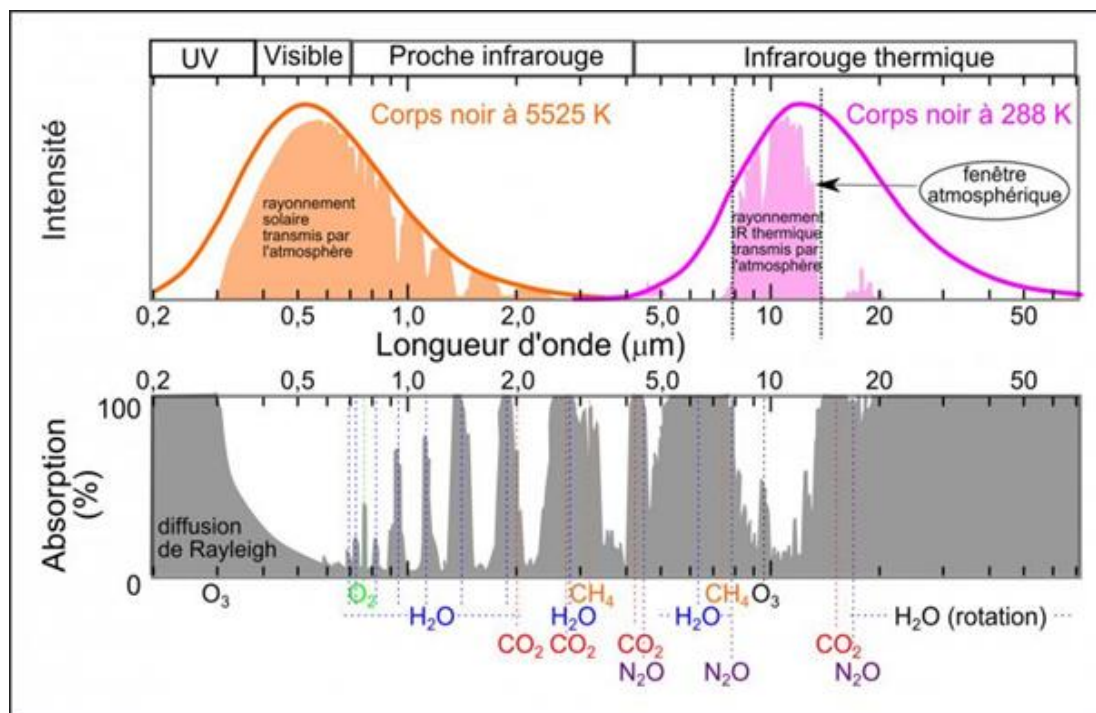


Figure 2 : Spectres d'émission thermique du soleil et de la Terre et spectre d'absorption de l'atmosphère

La figure 2 présente, dans sa partie inférieure, le spectre d'absorption de l'atmosphère résultant de la superposition des spectres d'absorption des molécules qu'elle contient.

Dans la partie supérieure de la figure 2, sont représentés les spectres d'émission du Soleil à 5525 K et de la Terre à sa température moyenne de 288 K.

Le rôle de l'ozone (O_3) comme filtre anti-UV apparaît clairement sur la partie gauche de la figure (diffusion de Rayleigh). Le rayonnement visible émis par le Soleil n'est que modérément atténué par l'atmosphère.

Dans l'autre sens, une bonne partie du rayonnement infrarouge émis par la Terre est absorbée par les transitions vibrationnelles et rotationnelles de l'eau, du dioxyde de carbone, du protoxyde d'azote et du méthane. Il existe d'autres substances absorbant dans cette zone mais leurs contributions sont moindres. Les radiations situées entre $8\text{ }\mu\text{m}$ et $15\text{ }\mu\text{m}$ ne sont que très faiblement absorbées et arrivent à franchir l'atmosphère. On parle de **fenêtre atmosphérique**.

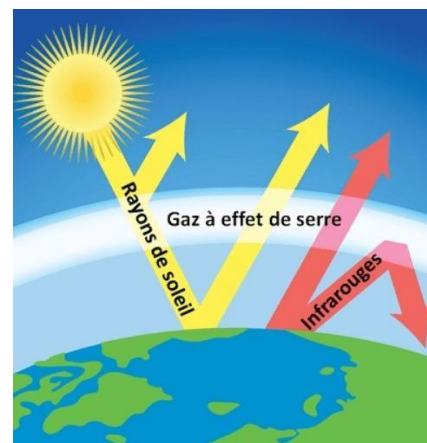
Conclusion

La figure 2 montre qu'une bonne partie du rayonnement émis par la Terre est absorbée par des gaz (gaz à effet de serre ou GES) se trouvant dans l'atmosphère. Ces gaz vont émettre, à leur tour, un rayonnement thermique, en partie, dirigé vers la Terre contribuant à son réchauffement : c'est l'effet de serre.

Les gaz à effet de serre sont tous les gaz présents dans l'atmosphère et susceptibles d'absorber le rayonnement tellurique. Leurs contributions respectives à ce phénomène dépendent de leur concentration, de leur absorptivité et de leur émissivité.

Il existe un effet de serre naturel permettant de maintenir la température de la Terre à des valeurs adaptées à la faune et la flore vivant à sa surface. Il est dû aux GES naturellement présents dans l'atmosphère.

L'activité humaine fait augmenter la concentration des GES naturels et émet de nouveaux GES dans l'atmosphère aboutissant ainsi à un effet de serre additionnel, dit anthropique, responsable du dérèglement climatique.



Compléments et sitographie

- [formation du CNED sur le changement climatique](#) (accessible aux élèves)
- spectres d'absorption de gaz atmosphériques accessible sur le site Planet-Terre :
 - [Spectre d'absorption infrarouge du dioxygène ;](#)
 - [Spectre d'absorption infrarouge du diazote ;](#)
 - [Spectre d'absorption de l'eau ;](#)
 - [Spectre d'absorption du dioxyde de carbone ;](#)
 - [Spectre d'absorption du méthane ;](#)
- [modes de vibration d'une molécule](#) sur le site unisciel.fr.
- on trouvera une version plus détaillée de l'explication de l'effet de serre, avec notamment la réfutation de l'argument climatosceptique de la saturation de l'effet de serre, dans la vidéo de la chaîne ScienceEtonnante :
<https://scienceetonnante.com/2023/10/06/la-saturation-de-leffet-de-serre/>