








Simulation Rayonnement thermique

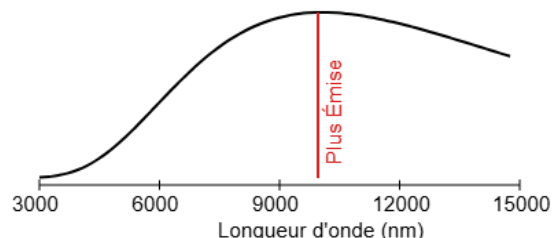
Tutoriel à disposition des enseignant-e-s

1. Contrôles et affichage

La simulation s'initialise en montrant la surface de la planète d'un point de vue microscopique comme un ensemble d'atomes arrangés en réseau (cubique pour simplifier). La température initiale de 15°C correspond à la moyenne actuelle de la surface terrestre.

A l'exception du thermomètre à gauche de la simulation, les boutons de contrôle se situent dans le menu latéral de droite. Si l'utilisateur nécessite plus de place, ce menu peut être caché en cliquant sur .

- **Macroscopique / Microscopique** permet de changer de point de vue : macro (paysage) ou micro (arrangement de ions positifs reliés par des électrons).
- Désactiver **Electrons** pour ne représenter plus que les ions positifs.
- Cliquer sur **Play**  pour faire agiter les ions selon la température choisie sur le thermomètre.
- **Celsius / Kelvin** fait alterner l'affichage sur le thermomètre.
- Le curseur  à droite du **thermomètre** permet de faire varier la température et le degré d'agitation thermique des ions. Les indicateurs **Mars** et **Vénus** permettent de régler la température à la valeur moyenne de ces planètes.
- **Rayonnement** affiche le rayonnement émis par la surface sous forme d'ondes électromagnétiques verticales provenant de la surface. Pour ne pas surcharger l'affichage, seule la longueur d'onde la plus émise (pour laquelle la surface émet le plus de puissance rayonnante, voir Sect. 5) est représentée.
- Cliquer sur **Pause**  pour figer les ions et les ondes électriques émises, afin de mesurer la longueur d'onde.
- **Grille** affiche une grille de 1000 nm de côté pour mesurer approximativement la longueur d'onde du rayonnement.
- **Distribution de longueur d'onde** affiche la distribution de toutes les longueurs d'onde émises comme une fonction planckienne normalisée (l'amplitude du pic ne varie pas pour des raisons d'échelle, cf. Sect. 5), en indiquant la longueur d'onde la plus émise en rouge (correspondant aux ondes affichées).
⇒ Lorsque la température varie, la distribution se décale soit vers des longueurs d'ondes plus courtes ou plus longues selon que la température augmente ou diminue.
- Le bouton  permet de réinitialiser la simulation.



2. A propos de cette simulation

Cette simulation permet de découvrir le rayonnement IR émis par la surface de la planète, en représentant microscopiquement la matière condensée comme un arrangement de charges (ions ou noyaux atomiques) en agitation thermique.

Pré-requis

Les seuls pré-requis sont la notion de charge électrique, d'atome et de structure de la matière comme arrangement d'atomes, d'agitation thermique des constituants de la matière, ainsi que de rayonnement ondulatoire émis par une charge oscillante. Ces notions sont de toute façon ré-introduites grâce à des images, quiz et vidéos dans l'activité interactive [Comprendre l'effet de serre climatique](#).

Liens avec les autres simulations

Cette simulation est la deuxième d'une suite de quatre simulations de physique et chimie dont le but est de faire découvrir séquentiellement les concepts permettant de construire un modèle cohérent des *causes* du réchauffement climatique, tout en déjouant les conceptions erronées rapportées dans la littérature (voir Sect. 3). Chaque simulation de la suite cible une catégorie de concepts nécessaires à la compréhension des simulations suivantes (cf. Fig. 1).

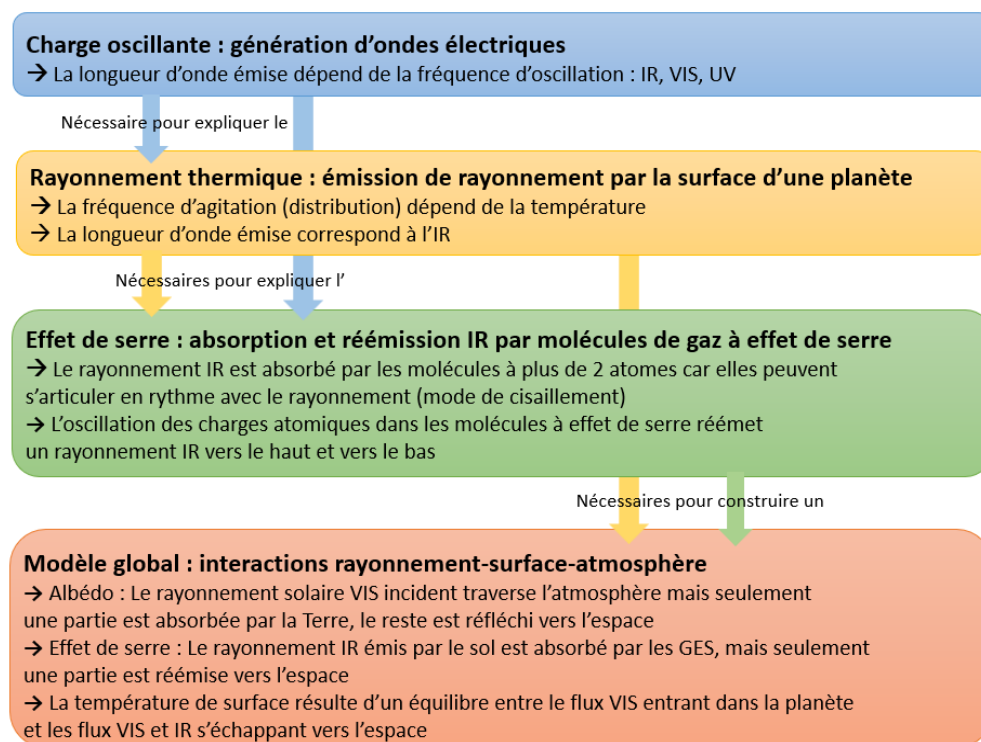


Fig. 1 : Carte conceptuelle des quatre simulations sur les causes du réchauffement global. Chaque simulation cible une catégorie de concepts (encadrée en couleur), où les concepts principaux à découvrir sont listés par des petites flèches. Les flèches de couleurs entre catégories illustrent comment les concepts découverts avec une simulation sont nécessaires aux simulations suivantes.

Faisant suite à l'émission de rayonnement par une seule *Charge oscillante* (première simulation), la simulation *Rayonnement thermique* permet alors de découvrir le rayonnement IR émis par un *ensemble de charges* (ions) en agitation thermique à la surface de la planète.

L'émission de rayonnement thermique à grandes longueurs d'onde par la surface de la Terre est un ingrédient nécessaire pour comprendre l'absorption de ce rayonnement par les molécules de gaz à *Effet de serre* (troisième simulation dans la Fig. 1), car leur structure polyatomique peut vibrer de manière synchrone avec les oscillations de champ électrique du rayonnement IR, mais pas avec le rayonnement solaire VIS (longueurs d'onde trop courtes et fréquences trop élevées) [1, 2, 3]. Sans cette notion de rayonnement émis par la surface de la planète, les élèves sont sujets à développer des explications erronées de l'effet de serre, comme le rebond des « rayons solaires » piégés dans l'atmosphère (voir Sect. 3). De plus, c'est grâce au rayonnement thermique IR que la planète évacue de l'énergie rayonnante vers l'espace afin d'atteindre un équilibre thermique et stabiliser sa température. Le rayonnement thermique est donc un ingrédient clé pour construire un *Modèle global* (quatrième simulation) et étudier le bilan énergétique de la planète.

L'activité interactive [Comprendre l'effet de serre climatique](#) inclut ces quatre simulations tout en guidant les élèves par des quiz avec feedbacks, afin de leur faire construire progressivement un modèle cohérent du réchauffement global.

3. Conceptions erronées sous-jacentes

La notion de rayonnement thermique est tout simplement absente chez la majorité des élèves du secondaire 1 et 2 [4], d'une part car elle est peu enseignée au niveau pré-universitaire (au niveau universitaire, le rayonnement thermique est conventionnellement étudié à travers le modèle idéal du « corps noir », voir Cadre 1), et d'autre part car la notion de rayonnement ondulatoire de différentes longueurs d'onde manque à la plupart des élèves (voir tutoriel de la simulation Charge oscillante).

Sans concept de génération de rayonnement électrique par des charges oscillantes, les élèves manquent d'un lien explicatif entre agitation thermique et émission thermique. Les élèves sont alors conduits à imaginer que le rayonnement provenant de la surface de la Terre n'est autre qu'une réflexion du rayonnement solaire incident [4]. Cette conception erronée se retrouve d'ailleurs dans certaines illustrations médiatiques, et est à la source d'images mentales erronées de l'effet de serre comme celle du « piège » (voir tutoriel de la simulation Effet de serre), dans laquelle les « rayons du soleil » rebondissent entre la surface de la Terre et une fine couche de gaz à effet de serre, comme dans la Fig. 2.

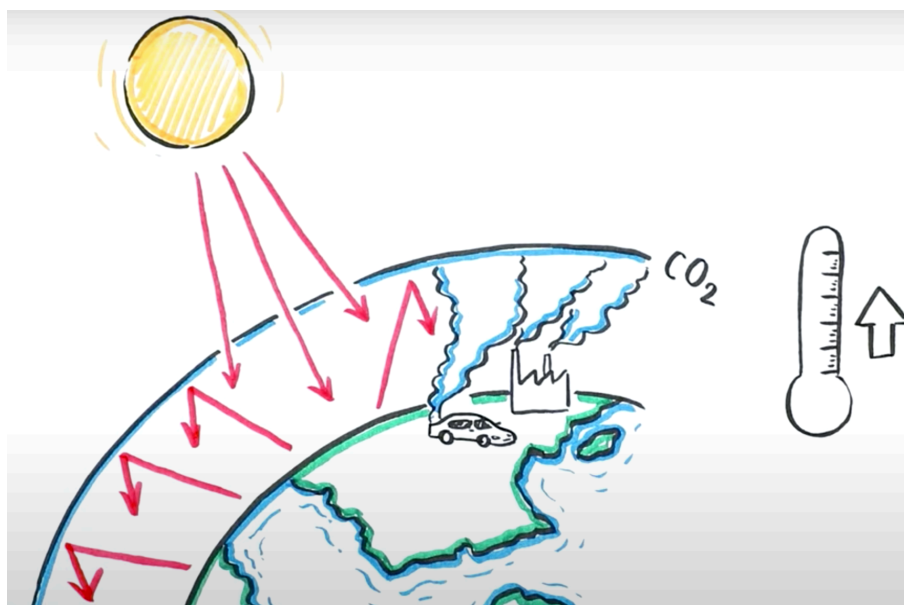


Fig. 2 : Représentation médiatique de l'effet de serre, suivant l'image du « piège » [easyvote.ch].

4. A découvrir par les élèves

En observant comment la fréquence d'agitation thermique des noyaux atomiques varie avec la température, les élèves (re-)découvriront la définition de la température, comme une mesure du degré d'agitation (ou fréquence d'agitation) *moyenne* des constituants de la matière. Les élèves peuvent en effet facilement concevoir qu'en réalité, tous les constituants ne bougent pas de manière synchrone comme dans la simulation. Cette définition pourra être (ré-)institutionnalisée en classe, en la distinguant de l'énergie thermique.

La distribution des longueurs d'onde permet aux élèves de réaliser que malgré la représentation simplifiée des oscillations atomiques à une même fréquence et du rayonnement à une unique longueur d'onde, les ions s'agitent en réalité à des fréquences plus ou moins élevées générant un *ensemble continu de longueurs d'ondes caractéristique du rayonnement thermique*.

En variant la température tout en observant le rayonnement émis et sa distribution de longueurs d'onde, les élèves découvriront que *quand la température augmente, la distribution se décale vers les longueurs d'onde plus courtes* (loi de Wien). Les élèves devront remarquer que *quelle que soit la planète, la distribution des longueurs d'onde demeure toujours dans l'IR*.

C'est pourquoi les climatologues distinguent le rayonnement solaire à «longueurs d'onde courtes» (centrées sur le domaine VIS) du rayonnement IR thermique terrestre à «longueurs d'onde longues» (voir Fig. 3).

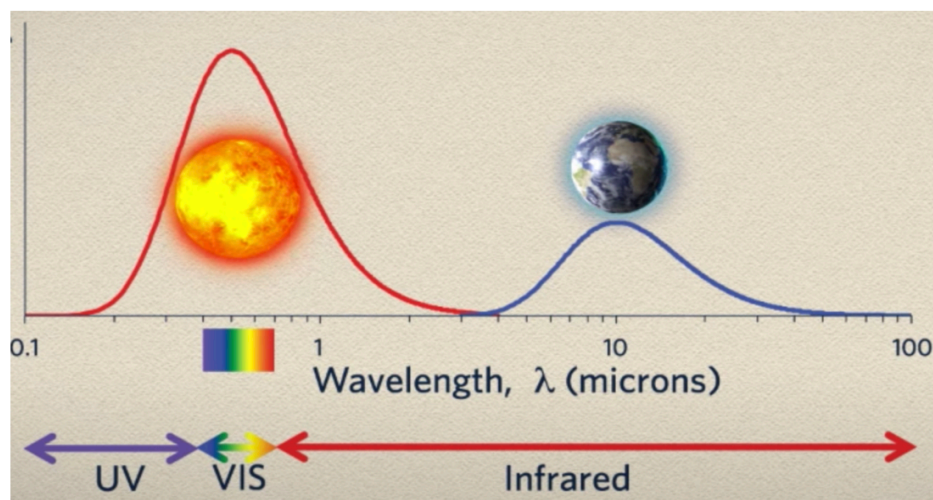


Fig. 3 : Distributions des longueurs d'ondes émises par le Soleil et la surface de la Terre [5], représentées comme des fonctions planckiennes (pas à l'échelle).

5. Modélisation et choix didactiques

Dans la simulation, la matière condensée formant le surface des planètes est représentée au niveau microscopique comme un ensemble d'oscillateurs harmoniques indépendants (« Solide d'Einstein »).

Lorsque la simulation est en mode Play, les ions du réseau atomique se mettent à osciller harmoniquement (verticalement et horizontalement en proportions égales) à une même fréquence directement proportionnelle à la température en Kelvin (justifiée si on est loin du zéro absolu). Cette fréquence unique est calculée de manière simplifiée comme proportionnelle à la température (en supposant une équipartition de l'énergie sur trois degrés

de libertés, soit $f = 3kT/h$, où f est la fréquence, T est la température en K, h la constante de Planck et k la constante de Boltzmann).

Le mouvement des électrons, quant à eux, n'est pas simulé, leur représentation ayant pour seul but d'illustrer la neutralité de la matière. C'est pourquoi un bouton à bascule est prévu pour ne plus les afficher afin de focaliser l'attention des élèves sur l'oscillation des ions. Dans la simulation, on a représenté par simplicité un ion sur deux oscillant verticalement et horizontalement, tous en phase.

Nous avons choisi de ne pas représenter le rayonnement lorsqu'on clique Play, mais seulement lors de l'activation du bouton Rayonnement, afin que les élèves puissent *prédire* que l'ensemble de charges en agitation devrait émettre du rayonnement. Lorsque le bouton Rayonnement est activé, l'utilisateur voit plusieurs ondes sinusoïdales émerger de la surface, dirigées verticalement vers le haut, rappelant les ondes émises sur l'axe horizontal par la charge oscillante de la simulation Charge oscillante. Il s'agit encore une fois d'une simplification, car la surface de la Terre émet un rayonnement dans toutes les directions, mais une simplification cohérente avec l'oscillation horizontale de la moitié des ions.

Cadre 1. Corps noir et rayonnement thermique de la Terre

La fonction de Planck, ou « planckienne », utilisée pour représenter la distribution des longueurs d'onde, provient du modèle théorique du « corps noir ». Ce modèle *idéal* désigne un système parfaitement opaque (avec émissivité et absorptivité 1), permettant d'obtenir l'expression mathématique de la densité de puissance du rayonnement en fonction de la longueur d'onde, c.à.d. la fonction de Planck [6, 7]. Il est souvent utilisé pour modéliser la distribution du rayonnement émis par la surface de corps relativement opaques à une certaine température, comme un corps de chauffe ou la photosphère d'une étoile [5, 7]. Dans le cas de la Terre, bien que la surface de la planète (d'émissivité environ 0.9 [3]) ne soit pas un corps noir parfait, le spectre mesuré de son rayonnement suit presque une planckienne (voir Fig. 4).

Nous avons choisi de ne pas faire référence directement au corps noir dans la simulation, car nous jugions ce concept trop abstrait pour les élèves du niveau secondaire.

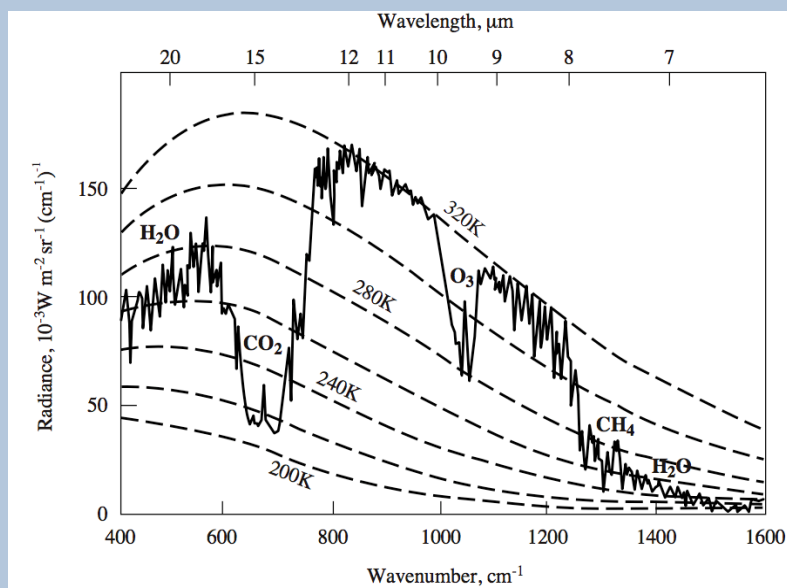


Fig. 4 : Spectre d'émission de la surface de la Terre (Nigeria) observé par satellite. Les parties hors des bandes d'absorption moléculaires, entre 8 et 10 μm , et 11 et 12 μm environ, correspondent au rayonnement thermique de surface qui a pu s'échapper directement vers l'espace [9].

Toutes les ondes émergentes ont la même longueur d'onde correspondant à la longueur d'onde la plus émise par un « corps noir » à cette température (c.à.d. à la longueur d'onde correspondant au pic de la fonction de Planck, voir Cadre 1), et est inversement proportionnelle à la température (loi de Wien).

La *distribution* de longueur d'onde à une certaine température est représentée comme une fonction de Planck *normalisée* (l'amplitude reste la même quelle que soit la température, puisqu'il s'agit d'une distribution), pour plusieurs raisons didactiques. Cette normalisation permet aux élèves de se focaliser sur le décalage en longueurs d'onde de la distribution plutôt que sur l'amplitude du pic (qui varie de quatre ordres de grandeurs entre Mars et Vénus). L'axe vertical est donc purement qualitatif, pouvant être interprété par les élèves comme la « quantité de rayonnement » émise aux différentes longueurs d'ondes. Ceci évite aussi l'obstacle d'unité pour les élèves (les unités de l'axe vertical seraient des $\text{W/m}^2\text{nm}$), car la notion de flux radiatif et ses unités (W/m^2) ne sera utile et introduite que dans la simulation Modèle Global. La longueur d'onde la plus émise y est indiquée en rouge, afin de pouvoir attirer l'attention des élèves sur sa correspondance avec la longueur d'onde du rayonnement représenté.

Nous avons choisi d'indiquer les températures de Mars et Vénus sur le thermomètre afin que les élèves puissent généraliser la notion de rayonnement thermique à d'autres corps que la surface terrestre (p.ex. à la surface du Soleil) et conclure que contrairement au Soleil, toutes les planètes émettent dans l'IR (cf. Sect. 4). Ces planètes seront incluses dans la simulation Modèle global, où les élèves pourront découvrir pourquoi leurs températures diffèrent en fonction de leurs valeurs d'albédos et d'effet de serre.

Références

- [1] MOOC et chaîne youtube Climate Literacy de l'Université de British Columbia, [3.4 The Greenhouse effect](#)
- [2] Salgado D'Arcy, R., chaîne YouTube AllAboutClimate, [Dancing molecules](#)
- [3] Krauss, L. M. (2021), *The physics of climate change*, Post Hill Press
- [4] Jarrett, L., Takacs, G. (2020), *Secondary students ? ideas about scientific concepts underlying climate change*, Environmental Education Research, 26, 400–420
- [5] MOOC et chaîne youtube Climate Literacy de l'Université de British Columbia, [3.1 Energy from the Sun and the Earth](#)
- [6] Planck, M (1901), *On the law of distribution of energy in the normal spectrum*. Annalen der physik, 4(553), 1.
- [7] Wikipedia article [Blackbody radiation](#)
- [8] Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., ... & Zhou, B. (2021), Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, [Climate change 2021 : the Physical Science Basis](#), Chap. 7
- [9] Jacob, D. J. (1999), [Introduction to atmospheric chemistry](#), Chap. 7, Harvard university