



Simulation Charge Oscillante

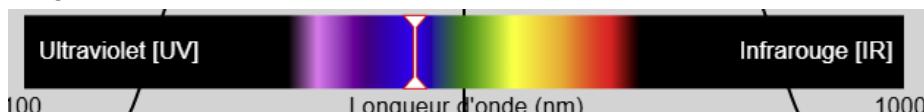
Tutoriel à disposition des enseignant-e-s

1. Contrôles et affichage

La simulation s'initialise par défaut en montrant les lignes de champ électrique générées par une charge source statique positive dans le vide.

Les boutons de contrôle de la simulation se situent dans le menu latéral de droite. Ce menu peut être caché en cliquant sur , par exemple si l'utilisateur nécessite plus de place pour mesurer les longueurs d'ondes (voir ci-dessous).

- Cliquer sur **Play** pour faire osciller la charge harmoniquement sur l'axe vertical. Les lignes de champ statiques se transforment en *ondes sinusoïdales progressives*.
- Cliquer sur **Pause** pour figer les ondes électriques.
- **Grille** affiche un quadrillage de 100 nm d'intervalle permettant de mesurer approximativement la longueur d'onde sur l'onde horizontale.
- **Flèche de mesure** permet de mesurer la longueur d'onde plus précisément. Cliquer sur la petite cible au-dessus de la flèche 200nm pour déplacer la flèche de mesure, puis ajuster la longueur de la flèche avec les boutons .
- **Spectre** affiche une barre de spectre électromagnétique horizontale avec les domaines UV, VIS (représenté en couleurs) et IR. L'indicateur blanc s'ajuste automatiquement pour situer la longueur d'onde émise dans le spectre, sans toutefois donner sa valeur, afin d'inciter les élèves à la mesurer. Pour la même raison, les longueurs d'onde limitant les domaines IR, VIS et UV ne sont pas indiquées.



- Le curseur **Fréquence** permet de varier la fréquence d'agitation de la charge. Les boutons à côté du curseur permettent d'ajuster la fréquence précisément. Les valeurs de fréquences ont été discrétisées afin de produire des variations relativement régulières de longueur d'onde (voir Sect. 4).
⇒ Lorsque la simulation est sur Play, la longueur d'onde affichée et l'indicateur blanc dans la barre de spectre s'ajustent automatiquement.
- Le curseur **Amplitude** permet de d'augmenter/diminuer l'amplitude d'oscillation pour une meilleure visibilité, p.ex. pour faciliter la mesure de la longueur d'onde.
- Le bouton permet de réinitialiser la simulation.

2. A propos de la simulation

La simulation Charge oscillante permet de générer des ondes électriques (ou « électromagnétiques », bien que le champ magnétique ne soit pas représenté) par l'oscillation d'une simple charge afin d'introduire une description ondulatoire du rayonnement.

Pré-requis

Les seuls pré-requis sont la notion de charge électrique, p.ex. noyaux d'atomes positifs, et une introduction au concept de champ électrique. 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 première 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).

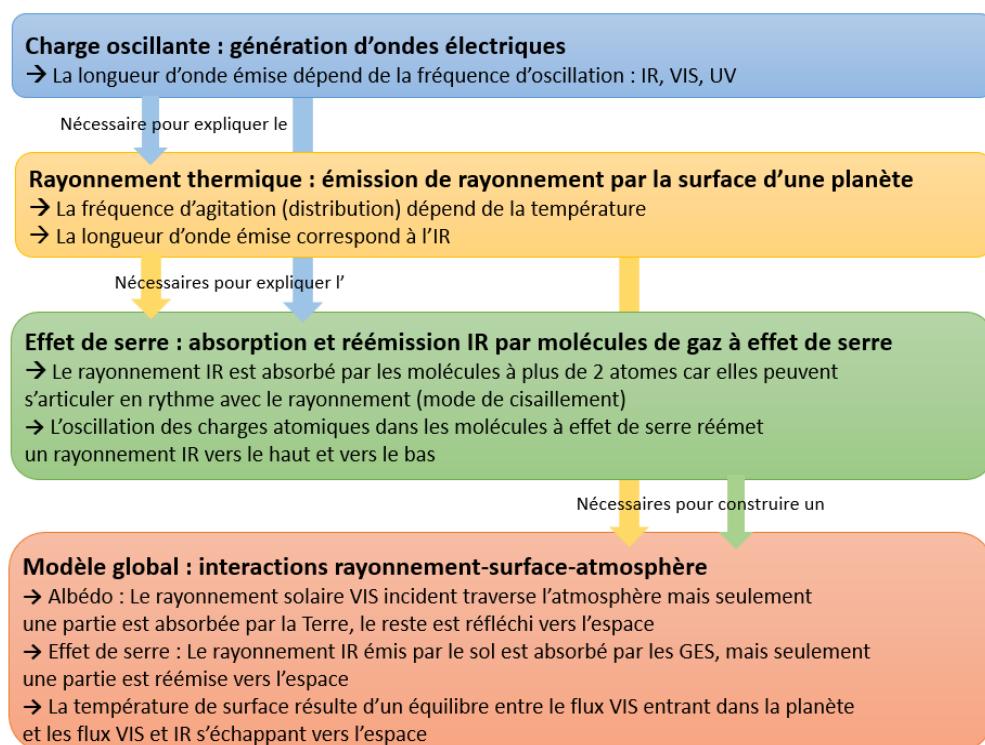


Fig. 1 : Carte conceptuelle des quatre simulations sur les causes du réchauffement global. Chaque simulation cible une catégorie de concepts (encadrée en couleur), où les concepts principaux à découvrir sont listés par des petites flèches. Les flèches de couleurs entre catégories illustrent comment les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

La simulation *Charge oscillante* permet de découvrir la relation entre longueur d'onde et fréquence d'agitation ainsi que les domaines de longueurs d'onde ultraviolet (UV), visible (VIS) et infrarouge (IR). Ces concepts peuvent ensuite être généralisés à un ensemble de charges en agitation thermique à la surface d'une planète, afin d'expliquer l'émission de *Rayonnement thermique* par la surface (flèche bleue vers la deuxième simulation dans la

Fig. 1). Ils permettent également d'expliquer que la longueur d'onde du rayonnement thermique dépend de la température tout en restant dans le domaine IR.

Distinguer le rayonnement VIS (rayonnement solaire à courtes longueurs d'onde) et IR (grandes longueurs d'onde en provenance de la surface de la Terre) est aussi fondamental pour comprendre l'*Effet de serre* (flèche bleu vers la troisième simulation), à savoir l'absorption de rayonnement IR et non VIS par les molécules de gaz à effet de serre (GES). Enfin, la notion de charge oscillante permet également d'expliquer la ré-émission de rayonnement IR par les charges partielles oscillantes des molécules de GES .

L'activité interactive [Comprendre l'effet de serre climatique](#) inclut ces quatre simulations tout en les étayant de consignes, images, quiz avec feedbacks, pour guider les élèves vers la construction d'un modèle cohérent du réchauffement global.

3. Conceptions erronées sous-jacentes

La description ondulatoire du rayonnement et le concept de longueur d'onde sont en général manquants chez les élèves du secondaire 1 (collège) et 2 (lycée), qui ne sont alors pas aptes à distinguer différents types de rayonnement [1].

Selon la revue de Varela et al. [1], la plupart des élèves interrogés avant instruction se référaient uniquement aux « rayons du Soleil », sans faire allusion à la longueur d'onde. Les élèves sont toutefois familiers aux « rayons UV » grâce à la diffusion publicitaire sur les crèmes solaires, ce qui les conduit à surestimer la part de « rayons UV » émis par le Soleil ou à confondre rayonnement solaire et UV [2]. L'absence de description ondulatoire du rayonnement peut aussi conduire certains élèves à assimiler rayonnement et « chaleur », sur la base de leur ressenti quotidien d'apport de chaleur par la lumière du Soleil [2].

Il est alors impossible d'expliquer l'effet de serre, à savoir que les molécules de GES absorbent le rayonnement IR en vibrant asymétriquement et de manière synchrone avec les basses fréquences du rayonnement, tout en étant transparentes au rayonnement VIS dont les longueurs d'onde sont trop courtes et la fréquence trop élevée. Sans cette conception de sélectivité spectrale de l'atmosphère, les élèves sont conduits à développer des images erronées de l'effet de serre (voir Tutoriel de la simulation *Effet de serre*).

4. A découvrir par les élèves

En mesurant la longueur d'onde tout en variant la fréquence d'agitation de la charge, les élèves découvriront que *quand la fréquence d'agitation augmente, la longueur d'onde diminue*. Cette relation explicative permettra par la suite (grâce à la simulation Rayonnement thermique) d'expliquer pourquoi le spectre du rayonnement solaire est centré dans le VIS tandis que celui de la Terre est essentiellement en IR.

Grâce aux mesures de longueur d'onde et à la barre de spectre, les élèves pourront identifier les trois domaines de longueurs d'onde et *déterminer les limites approximatives entre les domaines UV, VIS, et IR*. Sachant la limite VIS-IR, ils pourront ensuite conclure que le rayonnement thermique émis par la surface de la planète est purement dans l'IR (voir simulation «Rayonnement thermique»).

5. Modélisation et choix didactiques

D'après l'électrodynamique classique, toute charge accélérée produit un rayonnement électromagnétique [3]. L'oscillation d'une charge produit donc classiquement un rayonnement *ondulatoire* continu, que nous préférons à la représentation quantique de « photons » pour plusieurs raisons didactiques : (1) elle permet aux élèves de visualiser les longueurs d'ondes afin d'identifier les domaines du spectre (voir Sect. 4), ce qui est nécessaire pour comprendre l'émission *continue* de rayonnement thermique, (2) elle permet d'expliquer les vibrations en cisaillement des molécules de GES synchronisées avec le rayonnement IR, et (3) elle est alignée avec le programme d'études sur les ondes (voir Cadre 1 pour plus de détails).

Cadre 1. Description ondulatoire vs. photonique de la lumière

En électrodynamique classique, une charge accélérée génère du rayonnement ondulatoire continu [3]. Cependant, la mécanique quantique explique que dans un système isolé, les transitions discrètes entre niveaux d'énergie quantifiés s'accompagnent d'absorption ou d'émission de « photons », c.à.d. de paquets d'ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde est inversement proportionnelle à l'énergie ($E = \frac{h}{\lambda}$, où h est la constante de Planck) [4]. Le concept de photon permet donc d'expliquer les spectres *discrets* d'absorption ou d'émission d'un gaz comme souvent étudié en chimie, p.ex. lors de l'excitation d'un gaz par absorption, ou de l'émission spontanée lors de la désexcitation.

La description photonique du rayonnement n'est néanmoins pas pratique pour expliquer l'émission *continue* de rayonnement thermique par un ensemble d'atomes en agitation thermique, car elle requiert des concepts qui dépassent largement le cadre de l'école secondaire. On doit à Max Planck (1901) une explication quantique du rayonnement thermique dans le cas idéal d'un corps parfaitement opaque (dit « corps noir »), en modélisant les atomes comme des oscillateurs harmoniques quantiques et en intégrant leurs émissions photoniques [5].

Aux élèves, il est possible d'expliquer de manière simplifiée qu'il existe deux mécanismes de génération de rayonnement : l'émission *discrete* de photons (vue en chimie), et l'émission *continue* de rayonnement par agitation thermique. Un exemple de spectre solaire permet d'illustrer ce propos, car on voit les raies d'absorption (de « Fraunhofer ») des atomes « froids » de la photosphère superposées au spectre thermique continu, comme dans la Fig. 2 ou sur un [spectre plus complet à haute résolution](#).

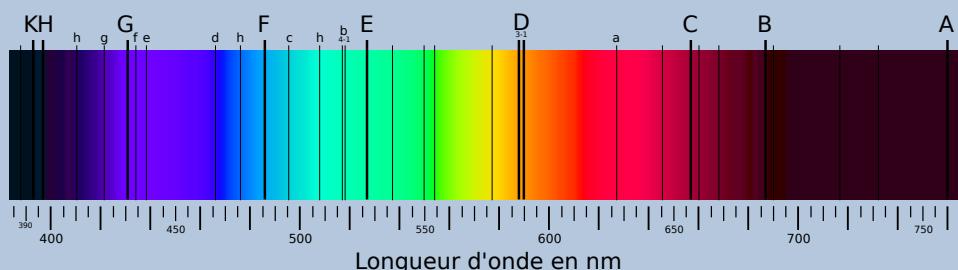


Fig. 2 : Raies d'absorption discrètes de Fraunhofer, superposées sur le spectre d'émission continue thermique du Soleil [Source : image de Bajart et Sapéraud, tirée de Wikipedia].

Nous avons choisi *une seule* charge oscillante comme source de rayonnement (et non un dipôle comme conventionnellement présenté dans les cours universitaires [3]), car cela permet de visualiser simplement la génération d'ondes électriques avec un minimum de pré-

requis (cf. Sect. 2), et peut facilement se généraliser à un ensemble de charges pour expliquer ensuite l'émission de rayonnement thermique (cf. Sect. 2).

Dans chaque direction radiale, l'onde électrique est représentée de manière simplifiée comme une onde sinusoïdale progressive (voir Cadre 2) afin d'être cohérent avec la représentation des ondes étudiée au secondaire. L'amplitude est maximale dans la direction orthogonale à l'oscillation de la charge et nulle selon l'axe d'oscillation.

Cadre 2. Représentation des ondes électriques

Dans chaque direction radiale r , la composante transverse du champ, E , est donnée par l'équation dépendante du temps t suivante :

$$E(r, \theta, t) = E_0 \sin \theta \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}r - 2\pi ft\right),$$

où E_0 est l'amplitude de l'onde à l'origine, λ la longueur d'onde, f la fréquence d'agitation et θ l'angle polaire entre l'axe vertical et la direction de l'onde. Cette équation décrit une onde plane progressive, ce qui serait strictement correct loin de la source oscillante. Le facteur $\sin \theta$ rend l'amplitude maximale dans la direction horizontale et nulle dans la direction verticale parallèle à l'oscillation, ce qui est attendu pour le rayonnement généré par un dipôle oscillant [3]. Nous n'avons cependant pas inclus de facteur $1/r$ pour représenter l'atténuation avec la distance, car cela est déjà représenté par la divergence des ondes.

Plutôt que de permettre une variation pseudo-continue du curseur de fréquence f , nous avons choisi des pas discrets pour produire des variations relativement régulières de longueurs d'onde λ selon la relation hyperbolique $\lambda = c/f$, où c dénote la vitesse de la lumière. Cette discréétisation permet de balayer de manière régulière le curseur de longueur d'onde dans la barre de spectre, d'une part, et facilite aussi la mesure de la relation longueur d'onde-fréquence par la création d'un graphique comme celui de la Fig. 3.

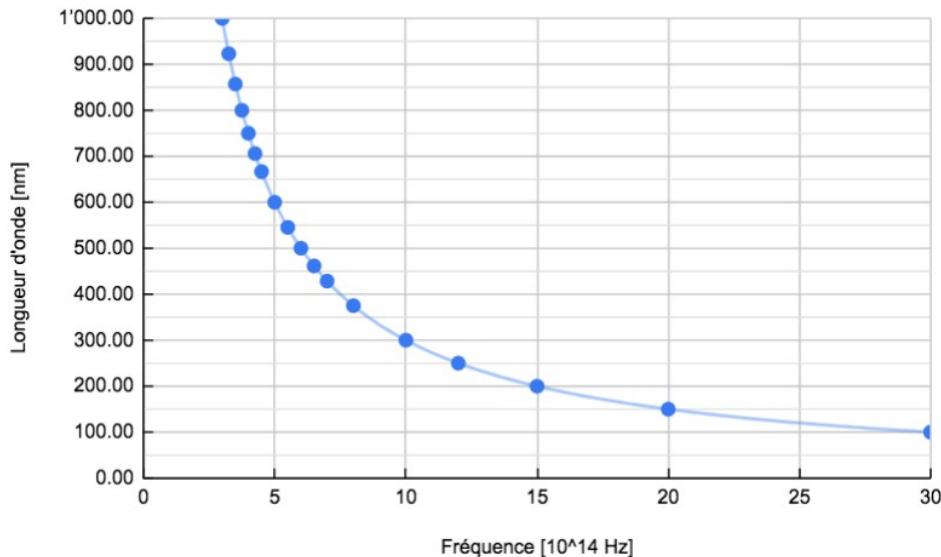


Fig. 3 : Valeurs discrètes de la fréquence d'oscillation, choisies pour générer des longueurs d'onde à intervalles relativement réguliers de 50 nm.

Références

- [1] Varela, B., Sesto, V., García-Rodeja, I. (2020), *An investigation of secondary students ? Mental models of climate change and the greenhouse effect*, Research in Science Education, 50, 599–624
- [2] Jarrett, L., Takacs, G. (2020), *Secondary students ? ideas about scientific concepts underlying climate change*, Environmental Education Research, 26, 400–420
- [3] [Cours « Champ et ondes électromagnétiques », Chap 6. Radiation](#), ETHZ Photonics Lab (2025)
- [4] Cohen-Tannoudji, C., Diu, B., & Laloe, F. (1986), *Quantum mechanics*, volume 1, 651-653
- [5] Planck, M. (1901),. *On the law of distribution of energy in the normal spectrum*. Annalen der physik, 4(553), 1.