



Simulation Effet de serre

Tutoriel à disposition des enseignant-e-s

1. Contrôles et affichage

Cliquer sur le symbole « i » en haut à droite fera apparaître un guide rapide.

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

- Remplir les quatre cases circulaires de l'atmosphère : Sélectionner une molécule parmi **Gaz à effet de serre** (p.ex.) ou **Autres gaz**, puis cliquer sur l'une des cases circulaires de l'atmosphère avec un signe + au centre pour l'y insérer. Répéter pour les trois autres cases.
- Choisir un rayonnement **Infrarouge** ou **Visible**.
⇒ Le rayonnement thermique IR est incident depuis le bas pour rappeler sa provenance de la surface de la planète, alors que le rayonnement solaire à courtes longueurs d'ondes centrées dans le domaine VIS est incident depuis le haut.
- Cliquer **Play** pour afficher le rayonnement sous forme ondulatoire.
⇒ Les molécules de gaz à effet de serre se mettent à vibrer lorsqu'elles absorbent du rayonnement IR. Cette vibration est représentée par un mouvement harmonique horizontal des atomes, reproduisant à la fois un mode de vibration en cisaillement (surtout) et en étirement.
- **Champ électrique** affiche des vecteurs du champ électrique le long des ondes (seulement pour le rayonnement IR) afin d'étudier comment le champ incident dicte le mouvement des atomes.
- **Signe des charges** affiche le signe des charges partielles portées par les atomes des molécules.
- Cliquer sur **Pause** pour figer les ondes.
Puis utiliser les doubles flèches pour avancer ou reculer pas à pas dans le temps, afin d'étudier comment chaque atome se déplace selon le sens du champ électrique.
- **Ré-émission** affiche en trait-tiré le rayonnement IR ré-émis par les gaz à effet de serre. Cette ré-émission est dirigée à la fois vers l'espace et vers la Terre, d'où l'effet de serre. Comme les molécules sont orientées ici verticalement, le rayonnement ré-émis se fait principalement verticalement, bien que l'ensemble des molécules atmosphériques ré-émettent dans toutes les directions (cf. Sect. 5).
- Le bouton permet de **réinitialiser** la simulation.

2. A propos de cette simulation

La simulation Effet de serre permet de construire un échantillon d'atmosphère comme un alignement de quatre molécules afin de visualiser comment elles interagissent avec le rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde (VIS pour simplifier) ou le rayonnement thermique IR émis par la surface.

Pré-requis

Au niveau secondaire 1, les seuls pré-requis sont les notions de molécules et d'atomes. Au niveau secondaire 2, afin d'étudier le mécanisme d'articulation des molécules, la notion de charge partielle et une introduction au concept de champ électrique sont également nécessaires. Le concept de rayonnement ondulatoire de différents domaines de longueurs d'onde, en particulier le rayonnement thermique IR émis par la surface, peuvent être découverts grâce aux deux simulations Charge oscillante et Rayonnement thermique (cf. paragraphe suivant). Toutes 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](#).

Lien avec les autres simulations

Cette simulation est la troisième 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).

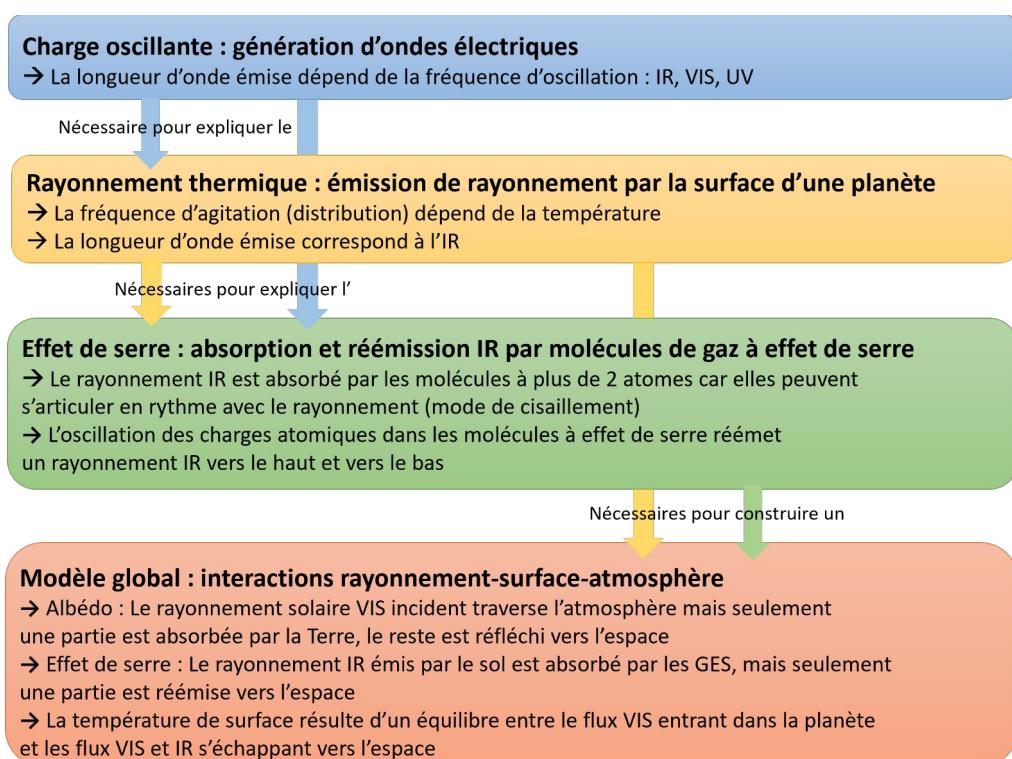


Fig. 1 : Carte conceptuelle des quatre simulations sur les causes du réchauffement global. Chaque simulation cible une catégorie de concepts (encadrée en couleur), où les concepts principaux à découvrir sont listés par des petites flèches. Les flèches de couleurs entre catégories illustrent comment les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

Les deux premières simulations, *Charge oscillante* et *Rayonnement thermique*, permettent de découvrir l'émission de rayonnement ondulatoire dans différents domaines de longueurs d'ondes (UV, VIS, IR) ainsi que l'émission de rayonnement thermique IR par la surface de la planète, des concepts nécessaires pour expliquer l'effet de serre.

La simulation *Effet de serre* permet alors de découvrir que les molécules de Gaz à Effet de Serre (GES) n'interagissent pas avec le rayonnement VIS, mais absorbent le rayonnement IR et le réémettent à la fois vers l'espace et vers la Terre. Sans cette notion de sélectivité spectrale de l'atmosphère, les élèves sont conduits à développer des images mentales erronées de l'effet de serre (voir Sect. 3).

L'absorption et ré-émission de rayonnement IR par les GES est un ingrédient clé du *Modèle global* (quatrième simulation) car le flux radiatif IR qui évacué vers l'espace participe au bilan énergétique de la planète.

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

De par sa couverture médiatique, les élèves identifient le dioxyde de carbone comme le principal voire unique GES [1], omettant le méthane, le protoxyde d'azote et la vapeur d'eau [2]. Or la vapeur d'eau est le GES le plus abondant et important pour la régulation du climat car il est la source d'une rétroaction positive (voir tutoriel de la simulation *Modèle global*).

La non-reconnaissance des variétés de GES révèle l'absence de lien explicatif entre la structure atomique des molécules et leur capacité à absorber et ré-émettre du rayonnement IR (les GES pouvant vibrer selon des modes asymétriques grâce à une structure à plus de deux atomes [3]).

Tout comme les climato-sceptiques, les élèves peinent aussi à concevoir que les GES ne constituent qu'*une infime minorité* (< 0,1%) des molécules de notre atmosphère (raison pour laquelle on mesure leur concentration en ppm), et qu'ils ont paradoxalement un effet significatif [4]: l'effet de serre « naturel » permet la vie sur Terre, alors que l'« intensification » de cet effet par l'accroissement des concentrations engendre le réchauffement global. Pour expliquer ce paradoxe, les élèves doivent découvrir l'incapacité des principaux constituants de l'atmosphère à absorber le rayonnement IR, rendant la petite fraction de l'atmosphère occupée par les GES suffisante à absorber une fraction significative (sur Terre, environ 30 %) du rayonnement IR. Un changement absolu de la concentration de GES de 100 ppm correspond alors à une variation relative importante des concentrations et contribue à changer significativement l'effet de serre.

Les élèves sont généralement ignorants de la répartition des GES à travers l'atmosphère, notamment le fait que le dioxyde de carbone, le méthane et le protoxyde d'azote sont considérés comme « bien mélangés » dans la troposphère [5]. Au lieu de cela, ils représentent les GES en une fine couche au sommet de l'atmosphère [6]. Cette représentation se trouve véhiculée dans de nombreuses illustrations trouvables dans les livres éducatifs, les médias ainsi que sur internet (voir p.ex. Fig. 2).

Comme décrit dans les tutoriels des simulations *Charge oscillante* et *Rayonnement thermique*, les élèves décrivent généralement le rayonnement comme des « rayons » ou de la « chaleur », sans concept de rayonnement ondulatoire et de longueur d'onde. De plus, ils ne sont pas conscients non plus de l'existence du rayonnement thermique IR. Sans ces

notions, les élèves perçoivent le rôle de l'atmosphère comme un « bouclier » ou comme un « piège » [7]. Le rôle du « bouclier » est souvent attribué à la couche d'ozone stratosphérique, dont le trou grandissant est responsable de laisser entrer davantage de « chaleur » (voir Fig. 3 à gauche). Trouvant son origine dans la large couverture médiatique de la couche d'ozone et son absence des programmes scolaires, la confusion entre sa déplétion et l'intensification de l'effet de serre est bien connue et systématique dans la littérature [1, 2]. Dans l'image du « piège », souvent véhiculé dans les illustrations médiatiques de l'effet de serre (voir p.ex. Fig. 2), les « rayons du Soleil » entrent dans l'atmosphère mais ne parviennent pas à ressortir (l'atmosphère serait donc transparente dans un sens mais pas dans l'autre!), rebondissant entre la surface de la Terre et une fine couche de GES (voir Fig. 3 au milieu).

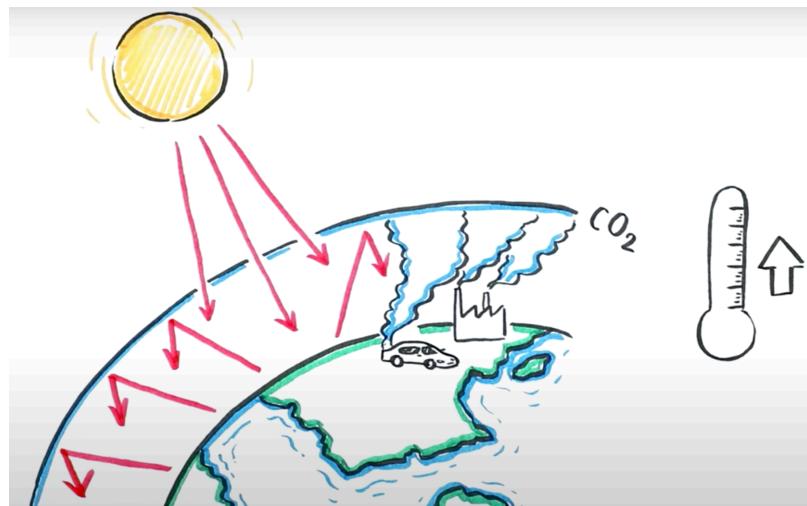


Fig. 2 : Illustration de l'effet de serre présentée lors de la votation pour la loi CO₂ suisse le 13 juin 2021 (source : easyvote.ch). D'après l'explication donnée, « les rayons du Soleil atteignent la Terre, toutefois ils ne sortent plus tous de l'atmosphère car les GES les retiennent comme un film plastique ».

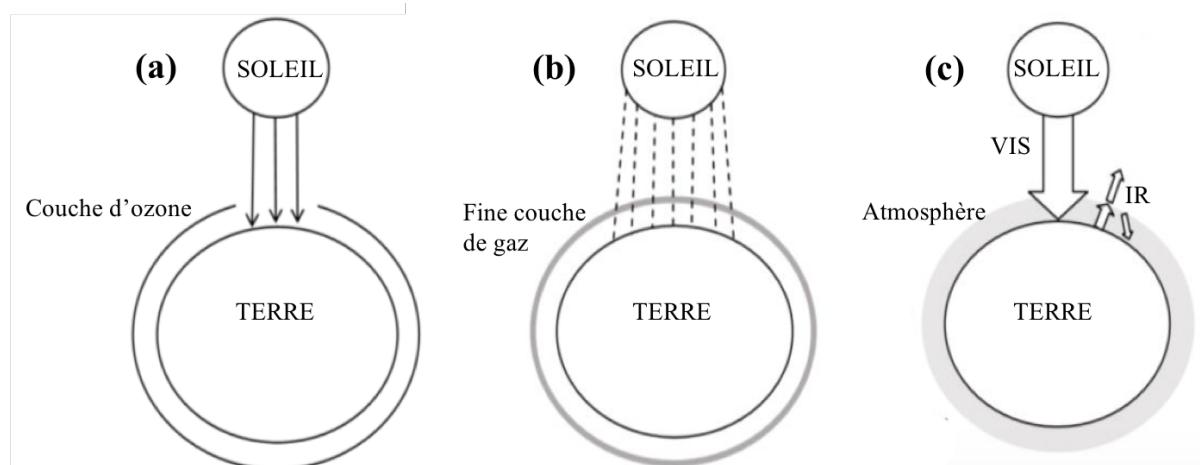


Fig. 3 : Les trois modèles mentaux principaux de l'effet de serre identifiés par Varela et al. [7]. (a) Déplétion du « bouclier » de la couche d'ozone, permettant davantage de rayonnement solaire entrant. (b) Piège du rayonnement solaire par réflexion entre la surface et une fine couche de gaz. (c) Modèle scientifiquement correct où les flèches représentent des flux radiatifs.

4. A découvrir par les élèves

Les élèves découvriront que les molécules n'interagissent pas avec le rayonnement VIS et que *seules les molécules de gaz à effet de serre (comportant toutes au moins 3 atomes) interagissent avec le rayonnement IR en se déformant asymétriquement* (mode de vibration en « cisaillement »).

Au niveau secondaire 2, ils seront capables d'étudier le mécanisme de déformation des molécules, en se basant sur les charges partielles portées par les atomes et sur la force électrique : une molécule constituée de deux atomes identiques (p.ex. N₂), n'ayant pas de charges partielles, ne subit aucune force électrique lorsqu'elle est plongée dans le champ électrique du rayonnement. Au contraire, *une molécule à trois atomes ou plus possède des charges partielles de signes opposés et subira donc des forces en sens opposés*, produisant sa déformation (selon la relation $\vec{F}_{el} = q\vec{E}$ entre la force électrique \vec{F}_{el} , la charge $q \leq 0$ et le champ électrique \vec{E}).

Pour des élèves de secondaire 1, on peut simplifier en remarquant qu'une molécule diatomique ne peut pas se « plier » (voir p.ex. [cette vidéo](#), qui fait l'analogie avec les jambes de danseurs-danseuses qui se plient en rythme avec la musique).

5. Modélisation et choix didactiques

On a choisi d'insérer seulement quatre molécules afin de les représenter suffisamment grandes pour que l'utilisateur puisse visualiser leurs vibrations comme les oscillations de leurs constituants atomiques. Le nombre de quatre permet aussi de facilement comparer côté à côté des molécules à effet de serre avec les autres gaz, et d'ordonner des molécules selon leur nombre d'atomes (variant de 1 à 4). Dans la barre latérale, les molécules de GES sont séparées des autres constituants principaux de l'atmosphère, afin que les élèves puissent facilement les comparer et reconnaître leur différence de structure moléculaire (nombre d'atomes). On a choisi d'inclure à la fois les noms complets et les formules des molécules pour renforcer leur apprentissage.

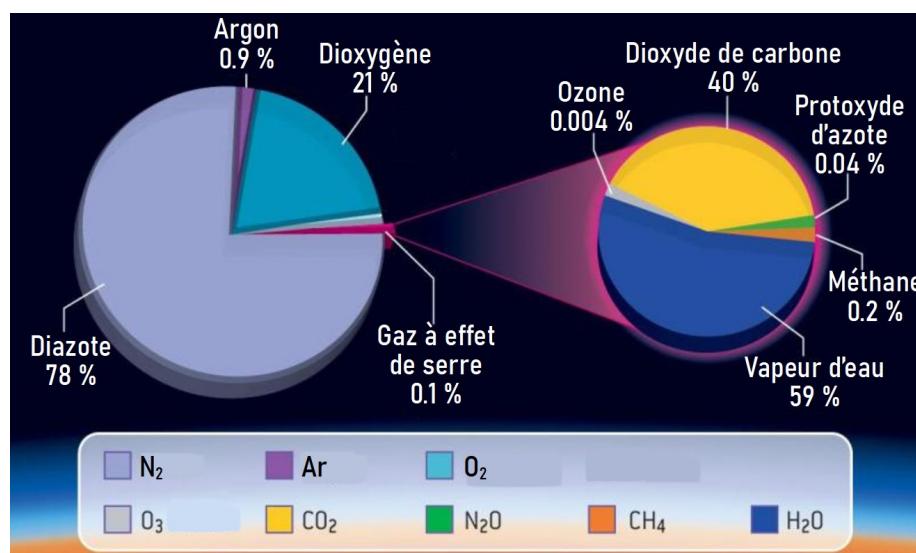


Fig. 4 : (gauche) Pourcentages (du volume) de l'atmosphère occupée par les gaz principaux et les GES. (droite) Répartition en pourcentages des différents GES. Figure adaptée avec les données du cours [Atmo336](#) de l'Université d'Arizona.

Dans la liste des GES, nous avons inclus les GES les plus abondants dans l'atmosphère (voir Fig. 4 et Cadre 1). Remarquons qu'on a choisi de représenter l'ozone dans les GES (puisque c'est l'un des principaux contributeurs du « forçage radiatif » de 1750 à 2019, voir Fig. 7.6 du 6^e rapport du GIEC [8]), car cela permet de réaliser qu'il participe à l'effet de serre au lieu du contraire (comme le suggère erronément le modèle du « bouclier » de la couche d'ozone, voir Sect. 3). En particulier, les élèves peuvent se rendre compte que l'ozone ne « bloque » pas le rayonnement VIS en provenance du Soleil. Une discussion supplémentaire sur la couche d'ozone stratosphérique et son interaction avec le rayonnement UV est toutefois nécessaire *a posteriori* (voir Cadre 2). Elle est d'ailleurs incluse dans l'activité interactive [Comprendre l'effet de serre climatique](#).

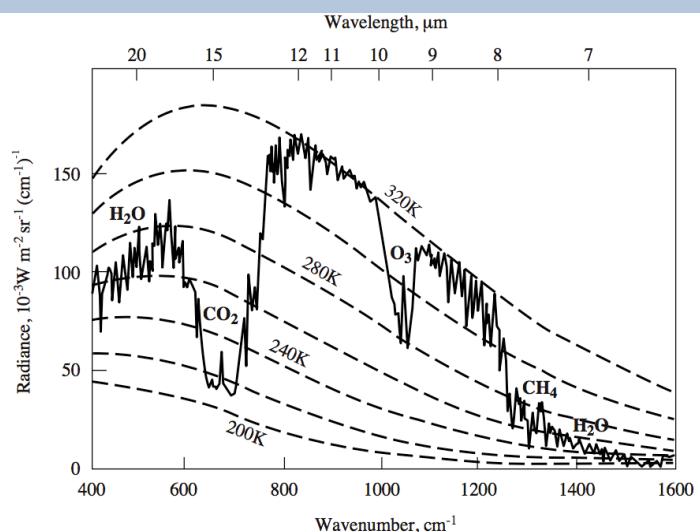
Cadre 1 : GES contribuant à l'effet de serre naturel et à son intensification

On peut quantifier l'effet de serre comme le flux de rayonnement IR qui est absorbé par les GES et réémis vers la surface (donc qui ne peut s'échapper vers l'espace), de l'ordre de 150 W/m². Etant les GES les plus abondant (cf. Fig. 4), la vapeur d'eau y contribue environ 60 % et le CO₂ environ 20 % [9]. Ces proportions indiquent les contributions à l'effet de serre *total*, incluant l'effet de serre naturel sans intensification anthropique.

Par contre, les contributions à l'*intensification anthropique* de l'effet de serre depuis 1750 sont différentes, car elles dépendent de l'évolution des émissions, de la durée de vie moyenne dans l'atmosphère, ainsi que la capacité des différents GES à absorber dans les longueurs d'onde IR du spectre thermique de la Terre. En particulier, la vapeur d'eau (troposphérique) n'y joue aucun rôle, car sa concentration dans l'atmosphère est quasi complètement gérée par le cycle de l'eau et ne dépend que de la température de l'atmosphère qui détermine la pression vapeur saturante [5, 9] (l'augmentation de sa concentration est donc la conséquence d'un réchauffement et engendre à son tour un effet rétroactif sur l'effet de serre, appelé «rétroaction vapeur d'eau», comme décrit dans le tutoriel de la simulation Modèle global).

Comme le CO₂ (ainsi que la vapeur d'eau) est le gaz régulateur principal de l'effet de serre naturel, les bandes d'absorption du CO₂ sont largement saturées [9], comme on peut le voir sur la Fig. 5. Au contraire, le CH₄ et le N₂O absorbent à des longueurs d'onde de la fenêtre de transparence de l'atmosphère. C'est pourquoi l'émission de chaque tonne de CH₄ ou N₂O participe des milliers de fois plus à l'intensification de l'effet de serre qu'une tonne ajoutée de CO₂. Cependant, la concentration du CO₂ étant 5 ordres de grandeurs supérieure à celles du CH₄ et N₂O, sa contribution au déséquilibre radiatif de la planète depuis 1750 (ou « forçage radiatif ») demeure dominante (Fig. 7.6 du 6^e rapport du GIEC [8]). La comparaison des contributions des différents GES sort toutefois du cadre des objectifs de cette simulation, et sa compréhension nécessite des notions de spectroscopie qui dépassent les élèves.

Fig. 5 : Spectre d'émission de la surface de la Terre (Nigeria) observé par satellite. Les fonctions de Planck (tirets), indiquent que plus les bandes d'absorption sont profondes, plus il y a saturation car la réémission vers l'espace se fait à des altitudes plus élevées où les températures sont plus basses [10].



Cadre 2 : Ozone stratosphérique vs. troposphérique

La fameuse couche d'ozone située dans la stratosphère (à plus de 18 km d'altitude, voir image ci-dessous) doit être distinguée de la pollution à l'ozone générée par les activités humaines dans la basse atmosphère (troposphère).

La « couche d'ozone » stratosphérique, qui s'est formée naturellement il y a 50 millions d'années [5], est primordiale pour absorber le rayonnement ultraviolet (UV) du Soleil par photodissociation des molécules d'ozone. Bien que le rayonnement UV ne participe pas au réchauffement de l'atmosphère, il peut causer des dommages aux cellules vivantes. La couche d'ozone est en quelque sorte la "crème solaire" de la Terre, la protégeant des UV sans empêcher le rayonnement visible de la réchauffer. Comme elle située dans la stratosphère, elle ne participe pas à l'effet de serre qui a lieu surtout dans la troposphère [12].

L'ozone troposphérique, par contre, est un produit non-naturel des activités humaines. Dans la troposphère, il participe à l'effet de serre.

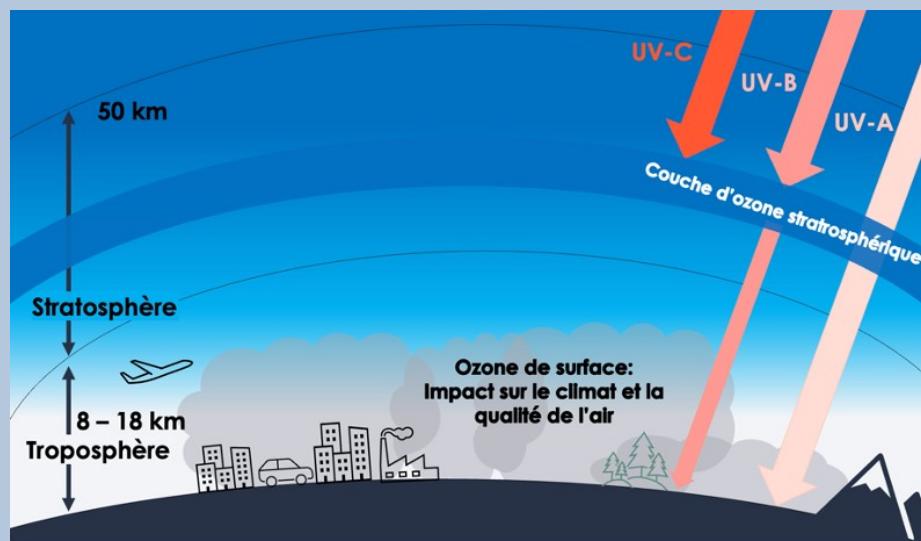


Fig. 6 : Illustration des rôles différents de la couche d'ozone stratosphérique (absorbant les UV-C) et l'ozone troposphérique [12].

Comme dans la simulation Rayonnement thermique, le rayonnement incident est représenté avec une direction verticale et une longueur d'onde unique. Lorsque l'utilisateur choisit un rayonnement IR, le rayonnement provient du bas de l'écran (surface de la Terre), et la longueur d'onde représentée correspond à celle émise par la Terre dans la simulation Rayonnement thermique. Le rayonnement VIS, provenant du haut de la simulation, représente le rayonnement solaire à « courtes longueurs d'onde » centré dans le VIS. Bien que le spectre solaire contienne également une partie dans l'UV et dans l'IR (voir tutoriel de la simulation Rayonnement thermique), nous avons choisi de ne représenter que sa partie VIS pour simplifier et distinguer l'effet du rayonnement IR thermique. Sa longueur d'onde est significativement plus petite que celle du rayonnement IR, mais pas à l'échelle (pour représenter la longueur d'onde de 500 nm correspondant au pic de du spectre solaire, elle devrait être 20 fois plus petite que les 10'000 nm correspondant au pic du rayonnement thermique terrestre), afin qu'elle n'apparaisse pas plus petite que les molécules dans la simulation. Les rayonnements VIS et IR sont représentés en jaune et rouge, respectivement, par cohérence avec la simulation Modèle global (quatrième simulation de la suite, cf. Fig. 1).

Le rayonnement VIS traverse toutes les molécules, montrant la quasi-transparence de l'atmosphère dans le visible¹, et le rayonnement IR traverse également les constituants principaux de l'atmosphère qui ne produisent pas d'effet de serre. Lorsque le rayonnement IR parvient au niveau des molécules à effet de serre, ces molécules se mettent à vibrer à la *même fréquence* que le rayonnement [3]. Il est alors possible d'expliquer aux élèves que l'inertie des constituants atomiques ne permet pas la vibration aux fréquences plus élevées du rayonnement VIS.

Pour illustrer l'absorption du rayonnement et la conversion de l'énergie rayonnante en énergie mécanique (vibration moléculaire), le rayonnement ne se poursuit pas au-delà du « point de contact » entre l'onde et l'atome inférieur des molécules.

De manière générale, les molécules de GES peuvent absorber (et émettre) du rayonnement IR aux fréquences qui font raisonner des modes de vibrations asymétriques, c.à.d. produisant une asymétrie dans la distribution de charge ou un « moment dipolaire » [3]. Pour simplifier, nous n'avons représenté que le mode de vibration en cisaillement (et non d'autres modes comme l'étirement asymétrique), car les élèves peuvent attribuer ce mode à l'articulation des molécules de GES ayant plus de 2 atomes [4] (p.ex. par analogie avec une jambe comme dans [cette vidéo](#) présentée en Sect. 4). Cette explication ne requiert pas la notion de moment dipolaire, qui dépasse le cadre de connaissances des élèves du secondaire. Le mode de cisaillement est aussi le mode le plus important pour l'effet de serre terrestre, car l'intensité IR émise par la Terre est bcp plus faible dans la bande d'absorption du mode d'élargissement asymétrique [11].

Pour représenter ce mode de cisaillement, les molécules sont orientées verticalement, de sorte à ce que les atomes individuels oscillent horizontalement, parallèlement au champ électrique véhiculé par le rayonnement. Bien que cette modélisation ne respecte pas les distances interatomiques fixes correspondant à un mode de cisaillement pur, il permet aux élèves plus avancés (p.ex. au Secondaire 2) d'expliquer le mécanisme de vibration en affichant le signe des charges partielles portées par les atomes, ainsi que les vecteurs champ électrique. Ces élèves peuvent alors attribuer le cisaillement au fait que les atomes ayant une charge partielle positive se déplacent en sens contraire des atomes ayant une charge partielle négative (comme présenté en Sect. 4). Bien que strictement parlant, les atomes positifs accélèrent dans le sens du champ électrique, on a choisi de représenter l'oscillation de ces atomes en phase avec le champ pour que les élèves les voient se déplacer dans le sens du champ, évitant par là l'obstacle visuel du “détachement de l'onde” (perte de contact entre onde et oscillation atomique).

Pour chaque molécule, nous avons tenu compte de la condition d'équilibre du centre de masse pour faire osciller les atomes de charges partielles opposées avec des amplitudes différentes (voir Cadre 3).

Finalement, le dernier bouton à bascule permet de représenter le rayonnement ré-émis par les molécules de GES. Le bouton de Ré-émission de rayonnement a intentionnellement été placé tout en bas, pour éviter que les élèves ne l'activent avant d'avoir pu prédire ce que devrait générer l'oscillation des charges atomiques des GES. Bien qu'en réalité la ré-émission se fasse statistiquement dans toutes les directions, elle est ici représentée seulement verticale, à la fois par simplicité et cohérence avec l'orientation des molécules. Les ondes ré-émises sont représentées de même longueur d'onde que l'onde incidente,

1 Les gaz principaux de l'atmosphère, N₂ et O₂, n'absorbent que quelques pourcents du flux radiatif solaire VIS par la diffusion « Rayleigh », dans les longueurs d'onde bleues plus courtes [5,9]. En réalité, le spectre solaire contient également une part dans l'IR (non représenté dans la simulation pour simplifier), c'est pourquoi environ 5 % du flux radiatif solaire est absorbé par la vapeur d'eau et le CO₂[5].

mais en ligne dis-continue pour éviter la confusion avec le rayonnement IR incident. Son amplitude est divisée par deux pour illustrer la conservation de l'énergie (moitié de l'énergie vers le haut et moitié vers le bas).

Cadre 3 : Amplitude des oscillations autour du centre de masse

Pour une onde électrique incidente selon y, les atomes vont se mettre à osciller selon x, parallèlement au champ et à la même fréquence. La position des atomes selon un axe x dont l'origine est placée à la position de repos initiale des atomes est alors donnée par :

$$x_{\pm}(t) = \pm A_{\pm} \sin(2\pi ft),$$

où f est la fréquence du champ et les signes \pm se réfèrent aux signes des charges partielles, puisque les atomes de charges opposées oscilleront en sens opposés.

Comme la charge nette des molécules est nulle, cela implique que la somme vectorielle des forces électriques s'annule et que le centre de masse de la molécule soit à l'équilibre. Soit m_+ et m_- les masses des atomes portant une charge partielle positive et négative, respectivement. La condition d'équilibre du centre de masse s'écrit :

$$\sum m_+ x_+(t) + \sum m_- x_-(t) = 0$$

Comme les atomes positifs et négatifs oscillent en antiphase, cette condition est aussi valable lorsque les positions atteignent leurs extrêmes d'amplitude A_+ et A_- respectivement, donc :

$$A_+ \sum m_+ = A_- \sum m_- \Rightarrow \frac{A_+}{A_-} = \frac{\sum m_-}{\sum m_+}$$

On peut alors calculer le rapport des amplitudes à partir des masses atomiques.

Par exemple, pour le CO₂, on obtient alors $\frac{A_C}{A_O} = \frac{2 \times 16}{12} \simeq 2.7$, donc l'atome de carbone oscillera avec presque trois fois plus d'amplitude que les atomes d'oxygène.

Pour H₂O, on obtient $\frac{A_H}{A_O} = 8$, pour O₃ $\frac{A_{O+}}{A_{O-}} = 2$, pour N₂O $\frac{A_N}{A_O} \simeq 0.5$ et pour CH₄ $\frac{A_H}{A_C} = 3$.

Ces rapports d'amplitude sont respectés dans la simulation.

Références

- [1] Chang, C.-H., Pascua, L. (2015), *The hole in the sky causes global warming ? : A case study of secondary school students' climate change alternative conceptions*, Review of International Geographical Education Online, 5, 316–331
- [2] Lee, K., Gjersoe, N., O'Neill, S., Barnett, J. (2020), *Youth perceptions of climate change : A narrative synthesis*, Wiley Interdisciplinary Reviews : Climate Change, 11, e641
- [3] MOOC et chaîne youtube Climate Literacy de l'Université de British Columbia, [3.4 The Greenhouse effect](#)
- [4] Jarrett, L., Takacs, G. (2020), *Secondary students' ideas about scientific concepts underlying climate change*, Environmental Education Research, 26, 400–420
- [5] Krauss, L. M. (2021), *The physics of climate change*, Post Hill Press

- [6] Shepardson, D. P., Niyogi, D., Choi, S., Charusombat, U. (2011), *Students conceptions about the greenhouse effect, global warming, and climate change*, Climatic Change, 104, 481–507
- [7] 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
- [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] Kandel, R. (2019), *Le réchauffement climatique. Que sais-je?*
- [10] Jacob, D. J. (1999), *Introduction to atmospheric chemistry*, Chap. 7, Harvard university
- [11] Archer, D. (2009), *Global Warming I : The Science and Modeling of Climate Change*, MOOC de l'Université de Chicago sur Coursera
- [12] Caram, C. (2022), *L'ozone des basses altitudes, une épée à double tranchant*, article web sur carbone4.com