



# Simulation Modèle Global

## 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.

La simulation comporte deux modes (voir Sects. 1.2 et 1.3): le mode *Ondes* qui affiche les rayonnements sous forme ondulatoire pour une première étude qualitative, et le mode *Flux* qui affiche les flux radiatifs avec leurs valeurs en  $\text{W/m}^2$ .

Quel que soit le mode choisi, le rayonnement solaire à courtes longueurs d'onde centrées sur le domaine visible (VIS) est représenté de couleur jaune alors que le rayonnement infrarouge (IR) est représenté en rouge.

Comme cette simulation est conçue pour étudier les rayonnements qui entrent et sortent du « système Terre » au sommet de l'atmosphère, la frontière entre atmosphère (bleu ciel) et espace (noir) est représentée pour séparer ce système de l'espace.

Le thermomètre indique la température moyenne de *surface* de la planète.

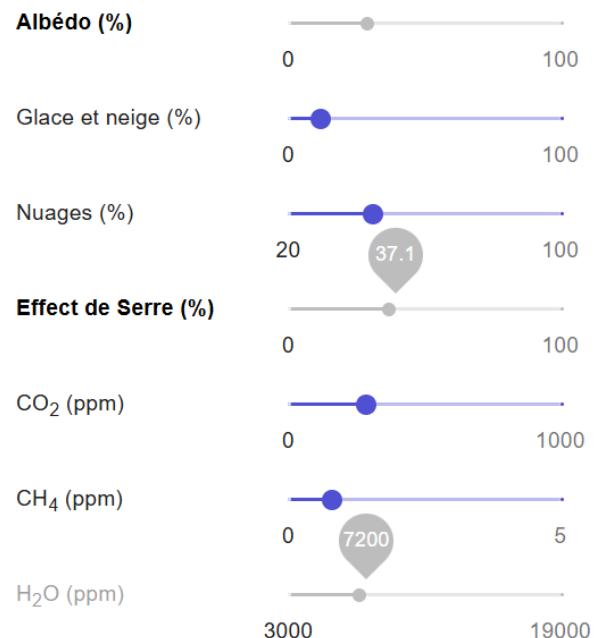
Amener la souris en tout point de l'atmosphère (le pointeur se transforme en loupe) et cliquer permet d'afficher un point de vue microscopique montrant les molécules de gaz à effet de serre (GES) incluses dans cette simulation,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  et  $\text{H}_2\text{O}$ , avec des concentrations s'ajustant en fonction des valeurs des curseurs en ppm.

#### 1.1 Variables climatiques

La simulation comporte quatre variables climatiques indépendantes, modifiables par les curseurs sous Albédo et Effet de serre :

- Glaces et neiges (%) = Pourcentage de la surface couverte par la cryosphère
- Nuages (%) = Pourcentage du ciel couvert par les nuages de basse altitude<sup>1</sup>
- $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  (ppm) = Concentrations moyennes de  $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$  dans la troposphère en parties par millions (ppm)

A propos de la vapeur d'eau : Le curseur est grisé car la concentration de  $\text{H}_2\text{O}$  reste constante à moins que l'utilisateur active la rétroaction Vapeur d'eau (voir Sect. 1.4 et 5.6), auquel cas elle dépendra de la température.



1 Ce sont surtout ces nuages, situés entre 1 à 2 km d'altitude, qui contribuent à l'albédo terrestre (voir Cadre 1 pour les contributions à l'albédo).

## Albédo et Effet de serre :

L'albédo est défini comme le rapport entre la somme des flux VIS réfléchis et le flux solaire.

L'effet de serre est défini comme le rapport entre le flux IR ré-émis vers la Terre par les GES et le flux IR thermique émis par la surface (voir Sect. 5.3 pour plus de détails).

Ces deux paramètres ne peuvent être modifiés directement par l'utilisateur (les curseurs sont grisés) car leurs valeurs sont fonctions des variables climatiques via des paramétrisations (voir Sect. 4 Cadres 1 et 2). Leurs valeurs s'ajustent donc automatiquement lors d'un changement des variables climatiques ci-dessus.

### 1.2 Mode Ondes

La simulation s'initialise par défaut dans le mode Ondes en **1850** (époque pré-industrielle à laquelle la planète se trouvait à l'équilibre thermique). Il est recommandé de commencer l'étude de la simulation dans ce mode qualitatif et de **rester en 1850 pour étudier ce mode** (car la température reste stable lorsqu'on clique Play la première fois, contrairement à 2020). La représentation ondulatoire facilitera l'identification des différents rayonnements et l'étude qualitative de l'effet des variables sur ces rayonnements. En effet, l'amplitude des ondes représentées est proportionnelles aux valeurs de flux radiatifs (Sect. 1.3). La longueur d'onde des ondes IR est qualitativement plus grande que celle des rayonnements à courtes longueurs d'onde, par cohérence avec les simulations Rayonnement thermique et Effet de serre.

- Cliquer sur **Play**  pour afficher les rayonnements sous forme ondulatoire.  
La première fois, les rayonnements sont affichés un à un séquentiellement afin de faciliter leur identification par les élèves.

Pour perturber l'équilibre et modifier la température de la Terre :

- Cliquer sur **Pause**  pour figer les ondes. Les variables climatiques peuvent uniquement être modifiées lorsque la simulation est sur Pause (car le système Terre n'est plus à l'équilibre thermique lorsqu'on modifie les variables).
- Altérer une ou plusieurs des **variables climatiques** (voir Sect. 1.1) avec les curseurs **sous Albédo ou Effet de serre**.  
⇒ Pendant la modification d'un curseur, l'amplitude des ondes directement affectées s'ajuste. P.ex. si on augmente le pourcentage de glaces et neige, l'onde VIS réfléchie par la surface augmente en amplitude.  
⇒ La Période de départ (ici 1850) apparaîtra désélectionnée, car les nouvelles valeurs des variables ne correspondront plus strictement à cette époque.
- Cliquer sur **Play**  pour voir évoluer la température de la planète.
- Vous pouvez cliquer sur le bouton **Reculer**  pour revenir à la situation juste avant Play et la rejouer à nouveau.

### 1.3 Mode Flux

En mode Flux, les rayonnements sont représentés par des flèches sur lesquelles sont indiquées les valeurs de *flux radiatifs* (c.à.d. densité de puissante rayonnante) en  $[W/m^2]$ . Cela permet d'étudier quantitativement l'effet des variables sur les flux et de déduire par un *bilan énergétique* (somme nette des flux au sommet de l'atmosphère) si la Terre est en état d'équilibre (température stable) ou de déséquilibre radiatif (température sujette à varier).

Afin que les élèves puissent déduire par eux-mêmes le concept d'équilibre thermique, il est recommandé de commencer par étudier la période 1850 où la planète est à l'équilibre.

- Cliquer **Play**  : la première fois, les flèches de flux sont affichées séquentiellement comme dans le mode Ondes.  
⇒ La largeur des flèches est proportionnelle aux valeurs de flux indiquées.
- L'icône  au sommet de l'atmosphère indique que la planète est à l'équilibre : vous pouvez le cacher en cliquant sur le bouton rouge  en haut à droite du menu latéral.

Pour perturber l'équilibre et modifier la température de la Terre :

- Altérer les variables du modèle (listées en Sect. 1.1) en utilisant les curseurs (pas besoin de cliquer sur Pause comme dans le mode Ondes, car dans le mode Flux, la simulation se met automatiquement sur Pause une fois les flux affichés).  
⇒ Pendant le réglage d'un curseur, la largeur des flèches et les valeurs des flux directement affectés s'ajustent. P.ex. si on augmente la concentration de  $CO_2$  ou  $CH_4$ , le flux IR s'échappant vers l'espace diminue tandis que le flux réémis vers la surface augmente.  
⇒ Juste après une modification de variable, les flux IR se mettent à clignoter pour indiquer que leurs valeurs vont varier (le flux IR émis par la surface variera avec la température jusqu'à rétablir l'équilibre, ce qui fera également varier le flux IR s'échappant vers l'espace et le flux réémis par les GES vers la surface).
- Cliquer sur **Play**  : Le thermomètre ainsi que les flux IR (valeurs et largeur des flèches) s'ajustent progressivement jusqu'à atteindre un nouvel équilibre radiatif.

Changer de période à 2020 pour étudier la situation actuelle :

- Les flux IR clignotent directement, indiquant que la planète n'est plus à l'équilibre dans cette période
- Cliquer sur **Montrer flux net**  en haut à droite.  
⇒ La valeur du flux net correspond à la valeur du flux solaire moins la somme des flux VIS et IR sortants de la planète.
- Sans modifier de variables, cliquer **Play** pour voir l'évolution de la température jusqu'au nouvel équilibre.

Cela signifie que même si on arrêtait immédiatement toutes les émissions et que les concentrations atmosphériques de GES restaient aux valeurs actuelles, la température augmenterait encore un peu pour atteindre l'équilibre thermique.

## 1.4 Rétroactions

La concentration en vapeur d'eau dans l'atmosphère ainsi que la couverture de neige et glace (cryosphère) sont des fonctions de la température, provoquant deux rétroactions principales du système climatique terrestre : la rétroaction «vapeur d'eau» et la rétroaction «glaces-albédo» (voir Sect. 5.6 et Cadre 3 pour plus de détails). La simulation permet d'investiguer ces deux rétroactions *séparément*.

L'effet des rétroactions est uniquement visible lorsqu'on modifie les variables climatiques pour forcer le système *hors de l'état d'équilibre à une période donnée* (attention à la période 2020, pour laquelle l'état d'équilibre n'est pas l'état initial), car les rétroactions vont alors amplifier l'augmentation ou la diminution de la température (cf. Sect. 5.6). Pour étudier l'effet d'une rétroaction, on peut soit (A) comparer son effet (changement de température, concentration de vapeur d'eau ou couverture de cryosphère) au cas sans rétroaction suite à une modification des variables, ou (B) l'activer à partir d'une température d'équilibre atteinte sans rétroaction et voir comment cette rétroaction modifierait cet état.

- Effectuer un changement de variable provoquant un déséquilibre (p.ex. en augmentant les valeurs de CO<sub>2</sub> à 500 ppm et CH<sub>4</sub> à 2 ppm pour simuler une possible situation en 2050).
- Cliquer **Play** pour observer vers quelle température s'ajuste la planète *sans rétroaction*.

### (A) Comparaison du cas sans et avec rétroaction :

- Cliquer **Reculer**  pour revenir à la situation juste avant Play.
- Activer **Vapeur d'eau ou Glace et neige** en bas du menu latéral.  
⇒ Si l'indicateur de Flux net est activé, il indique un flux net plus important que dans le cas sans rétroaction.
- Cliquer **Play** à nouveau pour observer l'effet de la rétroaction.  
⇒ Le curseur Glace et neige (%) ou le curseur H<sub>2</sub>O(ppm) (qui ne sont plus grisés) s'ajuste en même temps que la température jusqu'au nouvel équilibre. Cela fait parallèlement varier le curseur d'effet de serre ou d'albédo, qui dépendent maintenant aussi de la concentration en vapeur d'eau et de la couverture de cryosphère, respectivement.

### (B) Activation à partir d'une température d'équilibre :

Après avoir atteint sans rétroaction un état d'équilibre qui n'est pas l'équilibre correspondant à la période choisie :

- Activer **Vapeur d'eau ou Glace et neige** en bas du menu latéral.  
⇒ Le curseur de concentration de vapeur d'eau ou la couverture de glace et neige s'ajustent automatiquement en fonction de la température d'équilibre. Idem pour le curseur d'effet de serre ou d'albédo.  
⇒ Les flux IR clignotent et l'indicateur de Flux net indique un déséquilibre thermique, invitant les élèves à émettre une prédition sur l'évolution de la température et des flux. Si la rétroaction Glace et neige est activée, alors le flux réfléchi par la surface clignote également puisque sa valeur évoluera également.
- Cliquer **Play** pour observer l'évolution

Si le déséquilibre radiatif est trop important avant d'activer une rétroaction, il est possible que la température ne converge plus vers un équilibre. Dans le cas de l'effet de serre, on parle d'«emballement de l'effet de serre».

### 1.5 Age de glace et planètes

Ces situations vont permettre aux élèves de transférer leurs nouvelles connaissances pour expliquer le climat lors d'une période glaciaire, ou sur les planètes Mars et Vénus.

En choisissant **Glaciaire** sous Périodes ou Planètes, la température indiquée sur le thermomètre et les concentrations de GES correspondent au dernier maximum glaciaire qui a eu lieu il y a 18000 ans [1].

En choisissant **Mars** ou **Vénus**, tous les curseurs des variables climatiques apparaissent grisés, car l'humain ne peut altérer le climat de ses planètes. Comme pour la Terre, la température de ces planètes s'expliquer par leurs valeurs d'albédo et d'effet de serre (voir Sect. 4 pour plus de détails).

## 2. A propos de cette simulation

Cette simulation représente un modèle global (à « zéro-dimension » [1, 2]) de la planète, incluant le rayonnement IR et son interaction avec les GES, ainsi que le rayonnement solaire à courtes longueurs d'onde (VIS pour simplifier) et son interaction avec les glaces, neiges (cryosphère) et les nuages de basse altitude dans la troposphère.

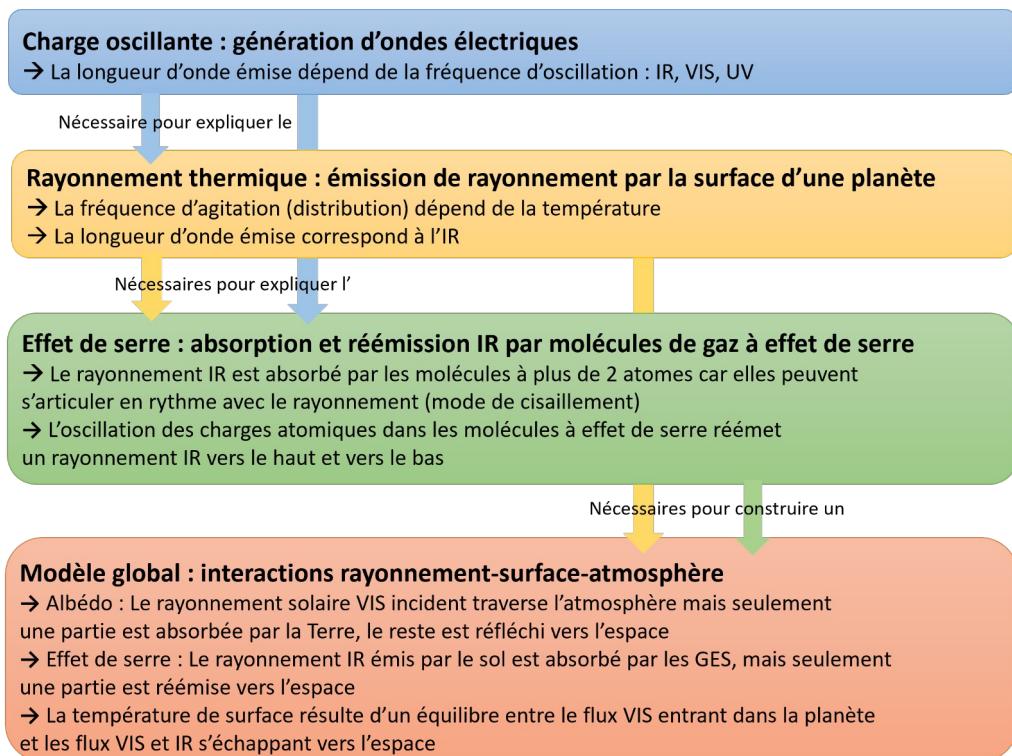
### 2.1 Pré-requis

Toutes les connaissances nécessaires à la compréhension de la simulation en mode Ondes (émission de rayonnement ondulatoire dans différents domaines de longueurs d'onde, rayonnement thermique IR émis par la surface, absorption et réémission par les GES) peuvent être acquises au travers des simulations Charge oscillante, Rayonnement thermique et Effet de serre. Pour guider l'élève vers la découverte de ces concepts, ces trois simulations sont intégrées dans l'activité interactive [Comprendre l'effet de serre climatique](#), étayées d' images, quiz avec feedbacks et vidéos.

Le mode Flux requiert également l'acquisition préalable des notions d'énergie et de puissance rayonnante. La notion de flux radiatif peut alors être directement déduite de la puissance, comme introduite dans l'activité interactive [Vers un modèle global du climat](#).

## 2.2 Lien avec les autres simulations

Cette simulation est la dernière d'une suite de quatre simulations dont le but est de faire découvrir séquentiellement les concepts permettant de construire un modèle causal cohérent 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.

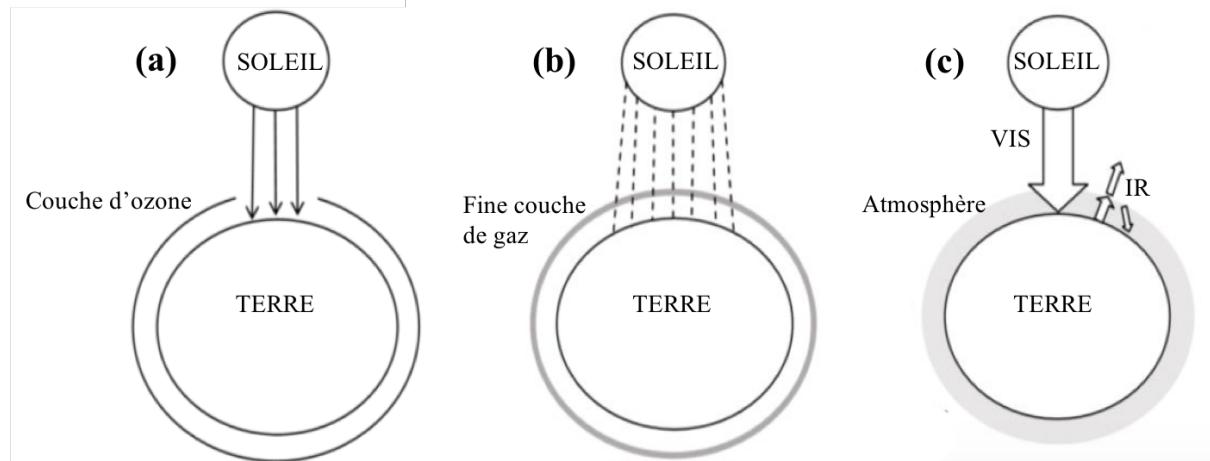
Les trois premières simulations ont ciblé une description ondulatoire du rayonnement avec une approche microscopique de la matière. Elles font découvrir successivement l'émission d'ondes électriques et les domaines de longueur d'onde (première simulation dans la Fig. 1), l'émission de rayonnement IR thermique par l'ensemble des charges à la surface de la planète, et l'absorption-réémission de ce rayonnement IR par les molécules de GES.

Bien que les trois premières simulations suffiraient à apporter les ingrédients fondamentaux pour comprendre le mécanisme de l'effet de serre, une quatrième simulation est toutefois justifiée afin d'intégrer les concepts préalablement découverts dans une vision *macroscopique* et non plus microscopique. Pour faire le lien, le mode Ondes reprend une description ondulatoire des rayonnements cohérente avec les trois premières simulations. De plus, un modèle global est nécessaire pour comprendre l'équilibre radiatif de la planète (concept manquant aux élèves, cf. Sect. 3), en particulier le rôle de l'effet de serre et de l'albédo dans cet équilibre.

### 3. Conceptions erronées sous-jacentes

La construction d'un modèle global cohérent se basant sur plusieurs catégories de concepts sous-jacents comme les pièces d'un puzzle (idéalement acquis au travers des simulations précédentes, voir Sect. 2.2), tout concept manquant ou erroné dans ces catégories induira un modèle erroné (voir Sect. 3 des tutoriels des simulations précédentes pour un inventaire).

Comme expliqué dans le tutoriel de la simulation Effet de serre, il existe deux modèles globaux erronés récurrents (voir Fig. 2) : la couche d'ozone-bouclier et celui de la couche de GES piégeant le rayonnement solaire [3]. Ces modèles proviennent entre autres de l'absence de description ondulatoire du rayonnement, conduisant à omettre le rayonnement thermique IR émis par la Terre.



**Fig. 2** : Les trois modèles mentaux principaux de l'effet de serre identifiés par Varela et al. [3]. (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 incluant le rayonnement IR, où les flèches représentent des flux radiatifs.

Ces modèles mentaux erronés révèlent aussi la non maîtrise du concept d'équilibre thermique, ou la difficulté à transposer ce concept à l'échelle planétaire [4]. Ce concept manquant conduit à percevoir l'échauffement de la Terre comme uniquement dû au rayonnement solaire, sans tenir compte du rayonnement thermique émis par la surface et du rayonnement IR réémis par les GES vers la surface, ni du rayonnement solaire réfléchi vers l'espace. La Terre devrait donc s'échauffer sans cesse.

La non utilisation de l'équilibre thermique pourrait aussi amener une autre conception erronée, non rapportée dans la littérature à notre connaissance, à savoir que le rayonnement IR thermique émis par la surface est uniquement une conséquence de la température terrestre sans participer à l'équilibre thermique. En réalité, la température de la planète (de sa surface, par exemple) dépend elle-même des flux énergétiques qui entrent *et* sortent de la planète. Autrement dit, la température dépend du flux solaire, mais aussi de la partie de ce flux réfléchie vers l'espace (albédo de la planète) ainsi que de la partie du flux IR thermique évacuée vers l'espace (non absorbée par les GES).

Finalement, la focalisation générale des médias sur le CO<sub>2</sub> conduit les élèves à ne pas considérer la vapeur d'eau comme GES, bien qu'il s'agisse du GES le plus abondant [5]. Comme détaillé en Sect. 4.6, la dépendance en température de la concentration de vapeur d'eau est essentielle pour la régulation du climat car elle est la source d'une rétroaction positive.

## 4. A découvrir par les élèves

Le mode Ondes permet aux élèves d'identifier les différents rayonnements qui jouent un rôle dans le modèle. Ils peuvent aussi se familiariser avec les différentes variables du modèle en observant qualitativement leur effet sur les rayonnements.

Les élèves pourront notamment remarquer que *la quantité de rayonnement IR thermique émis par la surface augmente avec la température*. Pour bien l'observer, cela nécessite de grandes variations de températures, p.ex. en variant fortement la couverture nuageuse.

En comparant les valeurs de flux au sommet de l'atmosphère par addition et soustraction, les élèves pourront déduire le concept d'équilibre et déséquilibre (radiatif) thermique : *Quand les flux sortant de l'atmosphère sont inférieurs/égaux/supérieurs au flux solaire entrant, la température augmente/reste constante/diminue.*

En ayant observé que le flux IR thermique dépend de la température, ils pourront aussi comprendre que *le flux thermique varie avec la température jusqu'à atteindre un nouvel état d'équilibre thermique*.

En utilisant les valeurs des flux affichées, les élèves pourront retrouver les définitions des paramètres d'effet de serre et d'albédo en effectuant le bon calcul. Avec un peu de guidage, ils réaliseront que le bilan énergétique de la planète ne dépend que de ces deux paramètres, puisqu'ils déterminent la quantité de flux sortant de la planète en VIS et IR (sur Terre, le flux solaire est en effet quasiment constant, variant de seulement 0.1 % pendant le cycle solaire de 11 ans [1], mais sur d'autres planètes, le flux solaire joue également un rôle).

A travers la simulation Effet de serre, les élèves avaient déjà découvert que la vapeur d'eau est un GES. Ils peuvent alors faire le lien avec la rétroaction de la vapeur d'eau.

Les élèves devront découvrir que *quelle que soit la rétroaction*, (vapeur d'eau ou glaces), *celle-ci amplifie la variation de température* engendrée par une quelconque modification des variables (c'est pourquoi on les qualifie de boucles de rétroactions « positives »).

En comparant l'état de la planète au dernier maximum glaciaire (Période glaciaire) et en 2020, Les élèves pourront remarquer que l'écart entre la température globale de cette période et la température actuelle n'est que de 6°C ! En comparant cet écart avec la hausse de température entre 1850 et la période actuelle, ils pourront réaliser l'importance d'une hausse de température d'un peu plus de 1°C.

En étudiant les cas de Vénus et Mars, ils pourront réaliser que tout comme pour la Terre, la température moyenne des autres planètes est dictée par les valeurs des paramètres d'albédo et d'effet de serre (ainsi que les flux solaires). A prime abord, les élèves peuvent croire que la différence de température est due aux différentes distances au Soleil (et donc aux différentes valeurs de flux solaire, respectivement 147 et 650 W/m<sup>2</sup>). Mais Vénus étant couverte de nuages (albédo d'environ 77%), seul un flux visible de 150 W/m<sup>2</sup> passe au travers de ces nuages, comparable aux 147 W/m<sup>2</sup> sur Mars. *La différence de température de Mars et Vénus doit donc être explicable par une différence d'effet de serre*. En observant les concentrations de CO<sub>2</sub>, les élèves seront surpris de leur similarité. L'effet de serre dépend non seulement des concentrations de GES, mais également de la densité de l'atmosphère (très ténue sur Mars) !

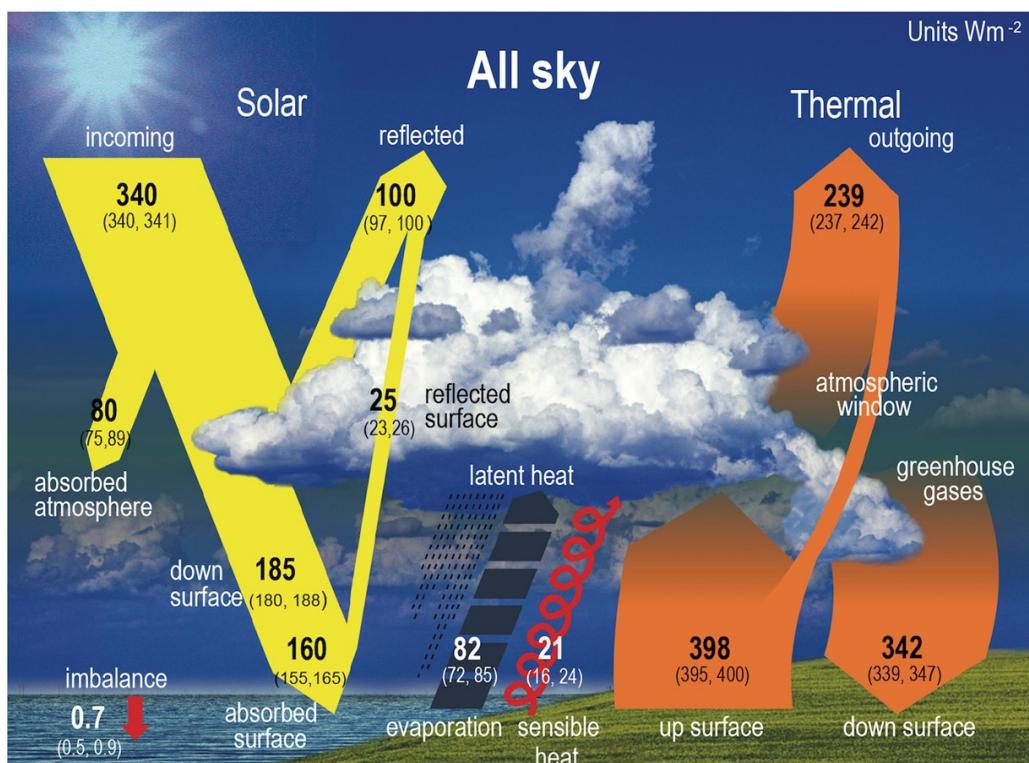
L'activité interactive [Vers un modèle global du climat](#) guide les élèves vers ces découvertes en étayant la simulation de consignes et quiz avec feedbacks.

## 5. Modélisation et choix didactiques

### 5.1 Modèle à zéro dimension

La simulation est conçue à partir d'un modèle à zéro dimension (0D) du système terre (surface et atmosphère), c.à.d. que toutes les valeurs sont des *moyennes planétaires* sans dépendance de latitude ou longitude et sans stratification verticale [1]. Elle ne peut donc simuler aucun phénomène lié à la stratification atmosphérique ni aux courants atmosphériques. Sont donc exclus de la simulation : les différentes couches de l'atmosphère, le réchauffement supérieur des basses latitudes comparé aux latitudes plus élevées [5], le réchauffement supérieur des océans par rapport aux terres émergées [5, 6], les échanges énergétiques entre la surface et l'atmosphère, comme la convection turbulente, l'évaporation et le rayonnement thermique de l'atmosphère [1, 5], ainsi que le refroidissement de la stratosphère et l'élévation de la limite supérieure de la troposphère [5]. Ces éléments peuvent être discutés avec les élèves, mais ne figurent pas dans les objectifs visés (voir Sect. 4).

Puisqu'elle ne contient pas de stratification et ne simule pas les flux énergétiques internes au système (p.ex. les échanges surface-atmosphère), ce modèle ne permet que l'étude du bilan énergétique à la frontière du système Terre, soit au « sommet de l'atmosphère » (SDA). De plus, au SDA, l'équilibre thermique de la planète se résume à un équilibre purement radiatif, ce qui est plus simple à traiter pour les élèves et cohérent avec l'étude des rayonnements dans les simulations. Contrairement au SDA, l'équilibre thermique de la *surface* de la planète n'est pas purement radiatif, car il faut tenir compte des transports d'énergie par évaporation et convection turbulente, ainsi que du flux IR total vers la surface, comme montrés dans la Fig. 3 (qui nécessiteraient un modèle 1D, cf. paragraphe ci-dessus).



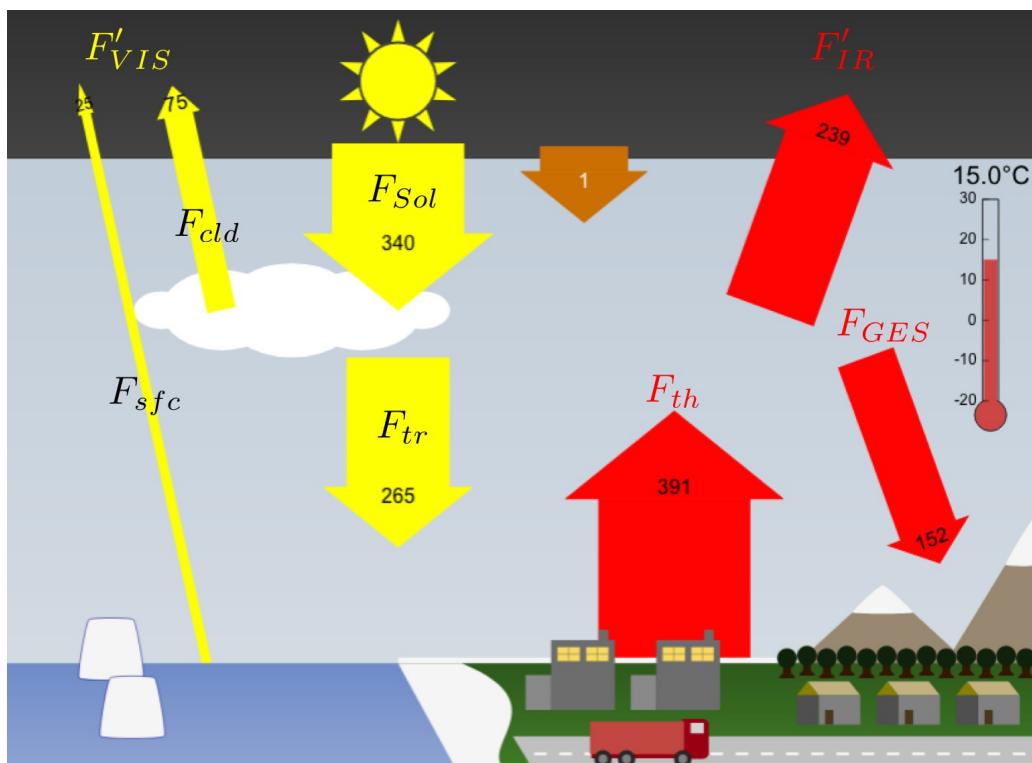
**Fig. 3** : Moyennes planétaires des flux énergétiques au SDA ainsi qu'à la surface de la Terre dans la situation actuelle, issues du rapport du GIEC 2021 [7]. Les flux de rayonnement à courtes longueurs d'onde sont représentés en jaune et les flux IR en rouge.

A partir d'une situation d'équilibre thermique au SDA, il est possible de déterminer la température d'équilibre de la surface sachant la valeur des paramètres d'effet de serre et d'albédo (voir Sect. 5.4). Cependant, de par les simplifications sus-mentionnées, cette simulation ne peut qu'être utilisée pour étudier qualitativement l'impact de l'albédo et de l'effet de serre sur l'évolution de la température, et non pour établir des prédictions quantitatives sur l'évolution future du climat.

## 5.2 Rayonnements et flux radiatifs simulés

Comme l'amplitude des rayonnements dans le mode Ondes est directement proportionnelle aux valeurs des flux radiatifs, nous allons directement présenter les rayonnements en mode Flux. La Fig. 4 montre un extrait de la simulation en mode Flux pour la Période 2020 (situation hors équilibre correspondant à la Fig. 3 fournie par le GIEC), où des symboles ont été attribués aux différents flux simulés. Les valeurs de flux sont arrondies à l'entier pour faciliter aux élèves l'identification de la condition d'équilibre thermique au SDA en comparant les flux rentrants et sortants.

Tout comme les autres flux de ce modèle 0D, le flux solaire  $F_{Sol}$  entrant au sommet de l'atmosphère correspond à une moyenne sur tout le globe. Il s'obtient en multipliant la « constante solaire »  $S \simeq 1460 \text{W/m}^2$  par la section de la Terre (de rayon  $R$ ) afin d'obtenir la puissance reçue par tout le globe, puis en divisant par la surface du globe :  $F_{Sol} = \frac{S\pi R^2}{4\pi R^2} = S/4$  (voir l'activité interactive [Vers un modèle global du climat](#)).



**Fig. 4 :** Extrait de la simulation en mode Flux dans la Période 2020, où la planète n'est pas à l'équilibre thermique.

Le flux total réfléchi vers l'espace se notera  $F'_{VIS}$  et sa valeur dépend de l'albédo de la Terre. Il se compose d'une partie réfléchie par les nuages,  $F_{cld}$ , et une partie réfléchie par *toute la surface* (terres émergées et océans),  $F_{sfc}$ , même si la flèche de flux a du être placée sur l'océan dans la simulation. Ces deux flux dépendent de la fraction du ciel

couverte par les nuages et de la fraction de la surface couverte par la cryosphère, qui sont modifiables par les curseurs (voir Cadre 1 pour le calcul de l'albédo et de ces flux).

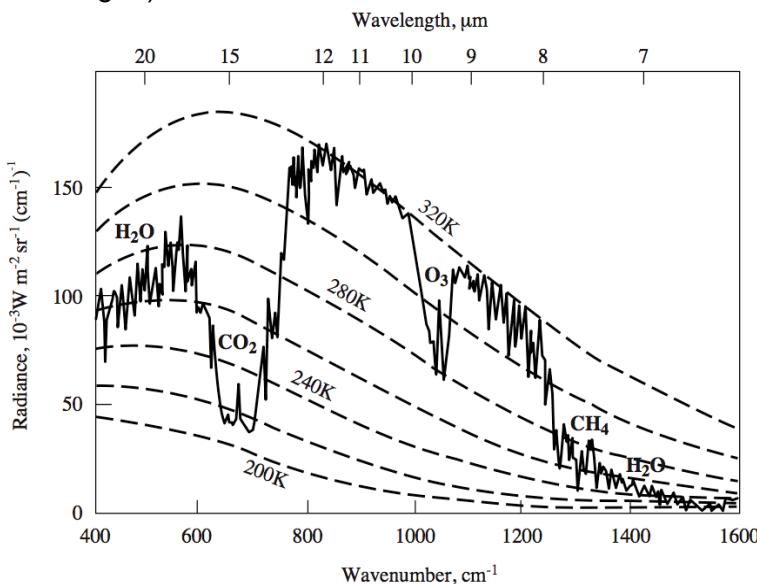
Le rayonnement transmis et son flux  $F_{tr}$  ne sont représentés que pour satisfaire la conservation de l'énergie ( $F_{tr} = F_{Sol} - F_{cld}$ ), mais ce flux est inutile à établir un bilan radiatif au SDA. Sa flèche de flux (idem pour l'onde en mode Ondes) est écourtée avant la surface, car il ne s'agit pas de la valeur de flux atteignant la surface (qui est moindre en raison de l'absorption atmosphérique, cf. Fig. 3).

Le rayonnement thermique émis par la surface est modélisé en supposant un corps noir parfait (voir tutoriel de la simulation Rayonnement thermique) dont le flux thermique  $F_{th}$  est donné par la loi de Stefan-Boltzmann :

$$F_{th} = \sigma T^4 \quad (1)$$

, où  $\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann et  $T$  la température en Kelvin.

Le flux IR évacué vers l'espace,  $F_{IR}$ , correspond à l'intégrale du spectre IR observé depuis l'espace (voir Fig. 5). Il comprend la partie du rayonnement thermique émis par la surface, dont les longueurs d'ondes n'ont pas été absorbées par les GES (« fenêtre atmosphérique dans la Fig. 3), ainsi que le rayonnement réémis par les GES vers l'espace (bandes d'absorption dans la Fig. 5).



**Fig. 5** : Spectre d'émission de la surface de la Terre (Nigeria) observé par satellite. Le rayonnement thermique de surface correspond à la planckienne (trait-tiré) à 320 K. Les parties du spectre hors des bandes d'absorption moléculaires, entre 10 et 12 um et 9 et 8 um, correspondent au rayonnement thermique de surface qui a pu s'échapper directement vers l'espace, soit la « fenêtre atmosphérique » [8]. Les bandes d'absorption correspondent au rayonnement réémis par les GES vers l'espace ; plus la bande est profonde, plus la réémission vers l'espace se fait à des altitudes élevées où la température est faible [5].

Enfin,  $F_{GES}$  désigne le flux réémis par les GES *vers la surface* et qui n'a donc pas pu s'échapper vers l'espace :

$$F_{GES} = F_{th} - F'_{IR} \quad (2)$$

A noter que le flux  $F_{GES}$  est inférieur au flux IR total vers la surface (cf. Fig. 3). En effet, le premier ne représente que la contribution des GES au flux IR réémis vers la surface, alors que le flux IR total vers la surface tient compte de l'émission thermique de la troposphère liée à son gradient de température.

### 5.3 Modification de l'effet de serre et de l'albédo par les variables

L'albédo est défini comme la fraction du flux solaire à courtes longueurs d'onde qui est réfléchi par la planète vers l'espace (par la surface, les nuages de basse altitude et les aérosols [1]) :

$$\alpha = \frac{F'_{VIS}}{F_{Sol}} \quad (3)$$

L'effet de serre (parfois dit « normalisé » pour le différencier du phénomène d'effet de serre en général [1]) est défini comme la fraction du flux thermique IR qui est réémis par les GES vers la surface, ou de manière équivalente (cf. Equ. 2), qui n'est *pas* évacuée vers l'espace :

$$\varepsilon = \frac{F_{GES}}{F_{th}} = 1 - \frac{F'_{IR}}{F_{th}} \quad (4)$$

L'albédo  $\alpha$  et l'effet de serre (normalisé)  $\varepsilon$  sont donc les deux *paramètres* qui contrôlent la quantité de flux radiatif qui peut s'échapper de notre atmosphère. La température d'équilibre peut donc être calculée à partir de ces deux paramètres :  $T = T(\alpha, \varepsilon)$  (voir Sect. 5.4).

Afin d'adapter les valeurs de ces paramètres à tout choix des variables climatiques, nous avons élaboré des *paramétrisations*, où  $\varepsilon$  est une fonction des concentrations de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> (et indirectement de la concentration de H<sub>2</sub>O via la température, voir Sect. 5.6) et  $\alpha$  est une fonction de la fraction de cryosphère et couverture nuageuse. La paramétrisation d' $\alpha$  tient compte des multiples réflexions surface-nuages, et la paramétrisation d' $\varepsilon$  a été dérivée d'un modèle 1D de l'opacité IR atmosphérique (voir les Cadres 1 et 2 pour plus de détails).

Pour simplifier la simulation et la paramétrisation d' $\varepsilon$ , seules les concentrations des deux GES causant les forçages anthropiques les plus importants [7] peuvent être modifiées, à savoir le CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>. La paramétrisation d' $\varepsilon$  ne tient donc pas compte des nuages de haute altitude qui contribuent à l'effet de serre (difficilement modélisables car dépendent aussi de la température) [1]. Il est donc possible que notre paramétrisation surestime l'influence des concentrations de ces deux GES sur l'effet de serre. Quant à la paramétrisation d' $\alpha$ , elle ne tient pas compte des aérosols.

Juste après une modification des variables climatiques (simulation encore en Pause), les curseurs d'albédo et d'effet de serre s'ajustent automatiquement aux valeurs calculées par les paramétrisations. Comme les valeurs de flux affichées sont arrondies à l'entier, il se peut toutefois que les élèves ne puissent pas recalculer les valeurs précises affichées sur les curseurs Albédo (%) et Effet de serre (%) (c'est le cas par exemple en 1850).

### 5.4 Calcul de la température et des flux

Sachant les valeurs des paramètre d'albédo  $\alpha$  et d'effet de serre  $\varepsilon$  (que ce soit à l'initialisation d'une Période ou après un changement de variables climatiques), la température d'équilibre peut être calculée en supposant que le système atteint un équilibre thermique (purement radiatif) au SDA. Dans ce cas, le flux solaire entrant dans le système équilibre la somme des flux sortants VIS et IR :

$$F_{Sol} = F'_{VIS} + F'_{IR} \quad (5)$$

En insérant les équ. (1), (3) et (4) dans l'équ. (5), on obtient :

$$F_{Sol} = \alpha F_{Sol} + (1 - \varepsilon) \sigma T^4 \Rightarrow T = \sqrt[4]{\frac{(1 - \alpha) F_{Sol}}{(1 - \varepsilon) \sigma}} \quad (6)$$

Sachant la température d'équilibre  $T$  par l'équ. (6), la valeur du flux thermique  $F_{th}$  à l'équilibre peut être calculée par l'équ. (1) et les valeurs des flux  $F_{GES}$  et  $F'_{IR}$  par l'équ. (4).

#### Cadre 1 : Paramétrisation de l'albédo terrestre et calcul des flux réfléchis

Les variables qui affectent l'albédo dans la simulation sont la fraction de nuages (bas)  $f_{cld}$  et la fraction de surface couverte par la cryosphère  $f_{cry}$ . Nous avons appliqué la paramétrisation suivante pour calculer les contributions à l'albédo par la surface,  $\alpha_{sfc}$ , les nuages,  $\alpha_{cld}$ , ainsi que l'albédo global de la Terre  $\alpha$  [18]:

$$\alpha_{sfc} = f_{cry}\alpha_{cry} + (1 - \alpha_{cry})\alpha_0 \quad (7)$$

$$\alpha_{cld} = f_{cld}\alpha_c \quad (8)$$

$$\alpha = \alpha_{cld} + \frac{(1 - \alpha_{cld}^2)\alpha_{sfc}}{1 - \alpha_{cld}\alpha_{sfc}} \quad (9)$$

, où  $\alpha_{cry}$ ,  $\alpha_0$  et  $\alpha_c$  désignent les réflectivités moyennes intrinsèques de la cryosphère, de la surface hors cryosphère et des nuages, respectivement. L'équ. (9) prend en compte des réflexions multiples entre surface et nuages, sans quoi l'albédo serait surestimé.

Les flux réfléchis par les nuages,  $F_{cld}$  et par la surface  $F_{sfc}$ , ainsi que le flux transmis à travers les nuages,  $F_{tr}$ , peuvent alors être calculés comme suit en adaptant l'équ. (1):

$$F_{cld} = \alpha_{cld}F_{Sol} \quad (10)$$

$$F_{tr} = (1 - \alpha_{cld})F_{Sol} \quad (11)$$

$$F_{sfc} = (\alpha - \alpha_{cld})F_{Sol} \quad (12)$$

Les valeurs de  $\alpha_{cry}$ ,  $\alpha_0$  et  $\alpha_c$  ont été ajustées de sorte qu'avec  $f_{cry} = 0.1$  et  $f_{cld} = 0.45$  (voir Sect. 4.3), l'équ. (9) reproduise l'albédo de la Terre et les valeurs de flux réfléchis en 2020 (voir Fig. 3). Pour reproduire la température d'équilibre de 13.8 °C en 1850, nous avons dû réduire  $\alpha_0$  afin d'obtenir un albédo inférieur à celui de 2020, par conséquence de la déforestation et de la désertification [18]. Pendant la période glaciaire, nous avons également dû ajuster  $f_{cld} = 0.42$  afin de reproduire l'équilibre radiatif à une température de 9°C.

Dans cette paramétrisation, la fraction de nuages  $f_{cld}$  correspond aux nuages bas, à une altitude typique de 1-2 km, car c'est surtout ce type de nuages qui affecte l'albédo terrestre. Les nuages de haute altitude, quant à eux, impactent aussi l'effet de serre mais ne sont pas pris en compte dans cette simulation [19]. Cette paramétrisation n'inclut pas non plus l'effet des aérosols, qui peuvent notamment agir comme noyaux de condensations pour la production de nuages.

Si un changement des variables climatiques a été effectué et que la simulation est encore sur Pause, les flux directement affectés changent de valeur et de largeur de flèche (respectivement d'amplitude en mode Ondes) pour montrer l'effet des variables sur les rayonnements. Si la fraction de cryosphère ou de nuages a été changée, les flux  $F_{cld}$  et  $F_{sfc}$  sont adaptés en fonction. Si les concentrations de GES ont changé,  $F_{GES}$  et  $F'_{IR}$  sont adaptés selon l'équ. (4) et la nouvelle valeur d' $\varepsilon$ . Avant que l'utilisateur ne clique Play, nous avons choisi de faire clignoter les flux IR (ainsi que le flux réfléchi par la surface si la rétroaction Glaces et neige est activée car ce flux changera en fonction de l'évolution de la couverture de la cryosphère) pour indiquer aux élèves que ces flux vont évoluer et les inciter à faire une prédition sur la réponse de la Terre avant de cliquer sur Play.

Lorsqu'on clique Play, la simulation affiche une évolution progressive du thermomètre et des flux IR jusqu'à leurs nouvelles valeurs d'équilibre. Comme la simulation ne résout que l'équation d'équilibre (6) et non une équation d'évolution temporelle (qui devrait tenir compte de la capacité thermique du système [9]), cette affichage ne fournit aucune indication sur les échelles de temps réelles.

## Cadre 2 : Paramétrisation de l'effet de serre terrestre

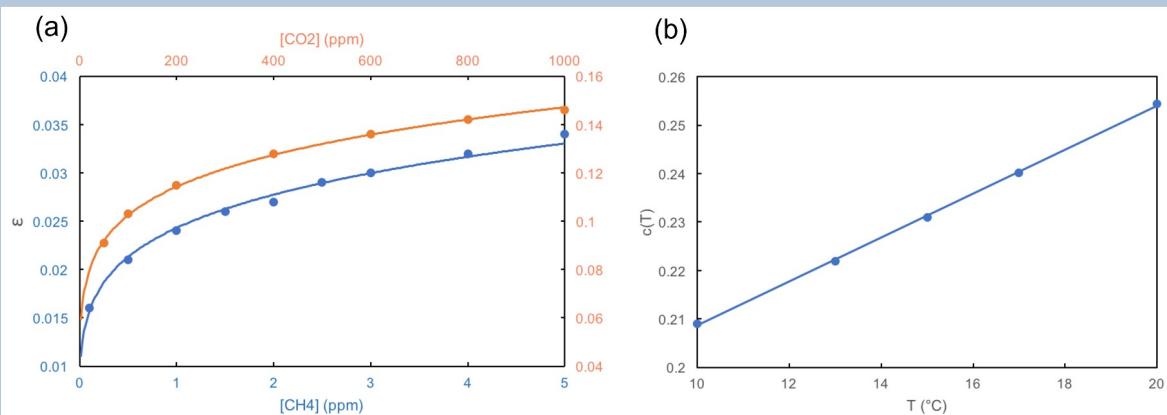
Les valeurs du paramètre d'effet de serre normalisé  $\varepsilon$  en fonction des concentrations de  $\text{CO}_2$  et  $\text{CO}_4$  et de la température  $T$  ont été obtenues en utilisant le modèle 1D “Rapid Radiative Transfer Model” (RRTM) utilisé dans des modélisations climatiques de pointe [19, 20]. À partir de l'[interface de ce modèle](#), les valeurs de  $\varepsilon$  ont été calculées par l'équ. (4) en comparant le flux IR évacué vers l'espace et le flux thermique émis par la surface. Nous avons appliqué une méthode séparative pour aboutir à la paramétrisation suivante :

$$\varepsilon = A [\text{CO}_2]^a + B [\text{CH}_4]^b + c(T) \quad (13)$$

Les deux premiers termes ont été obtenus en fixant toutes les autres variables à 0 et en ajustant la variation de  $\varepsilon$  selon des lois de puissance (voir Fig. 6a). Par exemple, le premier terme a été obtenu en fixant  $[\text{CH}_4] = 0$ , sans nuages et avec une humidité relative de 0. La forme des lois de puissance (due aux valeurs des exposants inférieures à 1) reflète la saturation progressive des bandes d'absorption du  $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$  [5, 19].

Le terme  $c(T) = CT + D$ , a été trouvé en faisant varier la température de surface tout en maintenant les concentrations de GES égales à 0 et une humidité relative moyenne troposphérique de 45 % constante (comme souvent supposé dans les modèles climatiques et corroborée par des observations [21]). Cette valeur de l'humidité relative (qui se situe quelque part entre les valeurs rapportées dans la littérature [22, 23]) a été ajustée afin de reproduire la valeur d' $\varepsilon$  en 2020. Nous avons ensuite effectué une régression linéaire dans une plage de température raisonnable  $10^\circ < T < 20^\circ$ .

Tant que l'utilisateur n'active pas la rétroaction « vapeur d'eau » dans la simulation, le terme  $c(T)$  conserve une valeur constante  $c(T_0)$ , où  $T_0$  est la température d'équilibre de la période choisie : 2020, 1850 et la période glaciaire (voir Cadre 3 pour le calcul de la rétroaction de la vapeur d'eau).



**Fig. 6 :** (a) Variation du paramètre d'effet de serre  $\varepsilon$  obtenus avec le modèle RRTM en fonction de la concentration de  $\text{CO}_2$  uniquement (rouge) ou de  $\text{CH}_4$  (bleu). Les courbes de tendances de type puissances correspondent aux deux premiers termes de l'équ. 13. (b) Variation du terme  $c(T)$  de l'équ. (13) en faisant varier la température dans RRTM

## 5.5 Périodes et planètes

Pour chaque période (1850, 2020, ou Période glaciaire), les valeurs initiales des variables climatiques (concentrations de GES, couverture cryosphérique et couverture nuageuse) sont codées en dur (voir Tableau 1 pour les valeurs et références). Sachant les valeurs de ces variables, les paramètres  $\varepsilon$  et  $\alpha$  sont calculés à l'aide de leurs équations de paramétrisation (9, 13) et la température d'équilibre de cette période est calculée à l'aide de l'équ. (6). La concentration affichée de  $\text{H}_2\text{O}$  dépend de cette température et est calculée comme décrit dans le Cadre 3.

Pour la période 1850, la température d'équilibre calculée et affichée est de  $13.8^\circ\text{C}$ , ce qui est cohérent avec les  $14^\circ\text{C}$  estimés pour la période 1951-1980 [10] et l'écart de température entre 1850 et cette période. La couverture de cryosphère à cette période a été déduite de la régression linéaire entre fraction de cryosphère et température (voir Fig. 7, Cadre 3).

La Période 2020 est la seule à ne pas s'initialiser dans un état d'équilibre car le bilan radiatif est déséquilibré au SDA (voir Figs. 3 et 4). La température affichée à l'initialisation,  $15^\circ\text{C}$ , est cohérente avec une anomalie de température de  $1.2^\circ\text{C}$  depuis la période de référence 1850-1900 [5, 6]. Il faut donc cliquer sur Play pour voir la température évoluer jusqu'à la température d'équilibre.

La période glaciaire de la simulation correspond au dernier maximum glaciaire (env. -18000). En supposant que l'étendue totale de la cryosphère était deux fois plus grande qu'aujourd'hui, soit 20 %<sup>2</sup>, la fraction de nuages a été ajustée à 42 % afin de reproduire une température d'équilibre de  $9^\circ\text{C}$ , cohérente avec un refroidissement de  $-6^\circ\text{C}$  [11].

Comme nos équations de paramétrisation ne sont pas valables sur Mars et Vénus (la densité de l'atmosphère et la composition de la surface étant trop différentes de la Terre), les valeurs d' $\varepsilon$  et  $\alpha$  sont aussi codées en dur pour ces planètes. Ainsi, lorsque l'utilisateur sélectionne Vénus ou Mars, les curseurs Effet de serre (%) et Albédo (%) sont automatiquement ajustés à ces valeurs, indépendamment des concentrations de GES affichées. Comme les variables climatiques ne peuvent pas être modifiées sur Vénus et Mars, tous les curseurs apparaissent grisés. Le flux solaire sur Mars et Vénus a été ajusté à  $147 \text{ W/m}^2$  et  $650 \text{ W/m}^2$  respectivement, en fonction de leurs distances du Soleil.

Le Tableau 1 récapitule les différentes valeurs prédéfinies des variables pour les différentes périodes avec leurs références bibliographiques.

**Tableau 1** : Valeurs initiales des variables climatiques pour les différentes périodes et planètes.

Périodes ou Planètes	[CO <sub>2</sub> ] (ppm)	[CO <sub>4</sub> ] (ppm)	[H <sub>2</sub> O] (ppm)	Nuages (%)	Glaces et neige (%)	$\alpha$ (%)	$\varepsilon$ (%)
1850	285 [12]	0.8 [12]	calculée	45 [13]	12	calculée	calculée
2020	413.2 [14]	1.9 [14]	calculée	45 [13]	10 [15]	calculée	calculée
Glaciaire	200 [16]	0.4 [16]	calculée	42	20	calculée	calculée
Mars	950000 [17]	0	200 [17]	0	0	25 [17]	0 [17]
Vénus	965000 [17]	0	0	100 [17]	0	76.9 [17]	99.1 [17]

2 Cette couverture cryosphérique a été estimée à l'aide d'un modèle 1D résolvant le profil méridien des variables, en ajustant un seuil de cryosphère à  $-10^\circ\text{C}$ , selon notre conseiller scientifique Dr. Stéphane Goyette, Climate and nonlinearity group, Université de Genève.

## 5.6 Rétroactions

La simulation ne tient compte que de deux mécanismes de rétroactions : la rétroaction « glace-albédo » et celle de la « vapeur d'eau ». La rétroaction glace-albédo fait varier l'albédo en fonction de la température à travers la variation de la cryosphère (augmentation ou fonte de la cryosphère), alors que la rétroaction « vapeur d'eau » fait varier l'effet de serre en tenant compte de l'évaporation en fonction de la température (la pression de vapeur saturante dépendant exponentiellement de la température, voir équ. 14 Cadre 3).

Nous avons choisi d'inclure ces deux rétroactions pour les raisons suivantes. La rétroaction des glaces est souvent abordée dans les médias et donc familière à certains élèves. Quant à la rétroaction vapeur d'eau, elle permet de renforcer chez les élèves le rôle de la vapeur d'eau comme GES le plus important de notre atmosphère (ils ont découvert qu'il s'agit d'un GES en étudiant la simulation « Effet de serre »), bien que sa concentration ne soit pas dépendante directement des activités humaines mais du cycle de l'eau.

La rétroaction du méthane, bien que particulièrement menaçante et décrite dans les médias, n'est pas incluse car difficilement prédictible par des équations. Il en va de même pour les autres rétroactions complexes, comme celle des nuages [7].

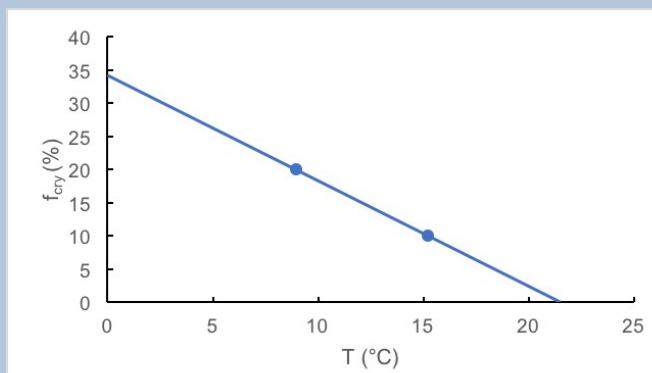
La rétroaction glace-albédo et celle de la vapeur d'eau sont dites « positives » car elles ont tendance à amplifier la variation de température résultant d'un changement des variables climatiques. C'est pourquoi l'effet de ces rétroactions n'est visible que lorsque l'utilisateur effectue une modification de variable forçant le système *hors équilibre* (voir Cadre 3).

Comme le calcul de ces rétroactions (voir Cadre 3) est réalisé par succession d'états d'équilibre, la simulation a tendance à exagérer l'effet des rétroactions sur la température. C'est pourquoi nous n'avons laissé le choix que d'activer une seule rétroaction à la fois, pour éviter la non-convergence de la température (et également ne pas effrayer les élèves!)

### Cadre 3. Boucles de rétroactions

L'effet de serre  $\varepsilon$  dépend de la température à travers la fonction  $c(T)$  (voir équ. 13). Quant à l'albédo  $\alpha$ , il dépend indirectement de la température à travers la fraction de cryosphère  $f_{cry}$ . Pour déterminer  $f_{cry}(T)$ , nous avons effectué une régression linéaire à partir des valeurs de 2020 et de la période Glaciaire (voir Fig. 7). La régression atteint  $f_{cry} = 0$  pour  $T \sim 21^\circ C$ , ce qui est cohérent avec les résultats paléoclimatiques indiquant une Terre sans calotte glaciaire pendant l'Éocène [25].

**Fig. 7 :** Dépendance de la fraction de couverture cryosphérique  $f_{cry}$  en fonction de la température. Les deux points correspondent aux périodes 2020 et Glaciaire, pour lesquelles les valeurs étaient connues.



### Cadre 3. Boucles de rétroactions (suite)

Lorsque les boutons de rétroaction « Vapeur d'eau » ou « Glace et neige » sont cochés,  $\varepsilon$  ou  $\alpha$  changent de manière itérative, comme schématisé dans la Fig. 8. Au départ, la température d'équilibre  $T_0$  est calculée à partir de l'effet de serre et de l'albédo initiaux,  $\alpha_0, \varepsilon_0$ . Après une modification des variables produisant  $\alpha_1, \varepsilon_1$ , la température d'équilibre passe à  $T_1$  (bleu dans la Fig. 8) et le calcul des boucles de rétroactions peut s'enclencher (en rouge dans la Fig. 8). Si, par exemple, la rétroaction de l'eau est activée, un nouvel effet de serre est calculé en fonction de  $T_1$  via la fonction  $c(T), \varepsilon_2 = \varepsilon(c(T_1))$ , et nous entrons dans la première itération de la boucle. La nouvelle température  $T_2$  peut alors être calculée selon l'équation 6. Comme  $T$  a changé, l'itération suivante où  $\varepsilon_3 = \varepsilon(c(T_2))$  peut être calculée, etc. La boucle conditionnelle WHILE s'arrête lorsque le critère de convergence  $T_{i+1} - T_i < 0.01^\circ\text{C}$  est atteint.

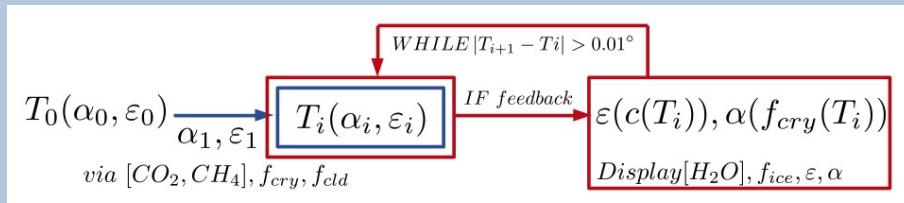


Fig. 8 : Schéma de calcul des boucles de rétroactions .

Pour que l'utilisateur puisse « voir » que la température affecte la concentration de vapeur d'eau  $[H_2O]$ , nous affichons cette dernière en calculant la pression de vapeur d'eau saturée  $p_v$  en fonction de la température  $T$  en K à l'aide de l'équation suivante, dérivée de l'équation de Tetens [24] convertie en ppm pour une humidité relative de 45 %:

$$[H_2O](\text{ppm}) = 2.78 \times 10^3 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right) \quad (14)$$

## Références

- [1] Kandel, R. (2019), *Le réchauffement climatique*. Que sais-je?
- [2] Goyette, S, *The physics of the greenhouse effect*, UNIGE  
Téléchargeable sur archive-ouverte.unige.ch
- [3] 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
- [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] Berkeley Earth, [Global temperature report for 2024](#)
- [7] 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](#)
- [8] Jacob, D. J. (1999), [Introduction to atmospheric chemistry](#), Chap. 7, Harvard university
- [9] Flath, D., Kaper, H. G., Wattenberg, F., & Widiasih, E. (2012), *Energy Balance Models*.

- [10] Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M., & Lo, K. (2010), *Global surface temperature change*, *Reviews of geophysics*, 48, 4.
- [11] Tierney, J. E., Zhu, J., King, J., Malevich, S. B., Hakim, G. J., & Poulsen, C. J. (2020). *Glacial cooling and climate sensitivity revisited*. *Nature*, 584, 569-573.
- [12] 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. 2*
- [13] Stanfield, R. E., Dong, X., Xi, B., Del Genio, A. D., Minnis, P., Doelling, D., & Loeb, N. G. (2011), *Comparison of Global Cloud Fraction and TOA Radiation Budgets between the NASA GISS AR5 GCM Simulations and CERES-MODIS Observations*. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2011, pp. GC43A-0883).
- [14] World Meteorological Organization (2021), *State of the global climate 2020*, Geneva, Switzerland: WMO.
- [15] Ohmura, A. (2021), *Snow and ice in the climate system*. In *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters* (pp. 73-92). Elsevier.
- [16] Petit, J. R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N. I., Barnola, J. M., Basile, I., ... & Stiévenard, M. (1999), *Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica*. *Nature*, 399(6735), 429-436.
- [17] NASA National Space Science Data Center [Planetary Fact Sheet](#)
- [18] Sagan, C., Toon, O. B., & Pollack, J. B. (1979), *Anthropogenic albedo changes and the earth's climate*. *Science*, 206(4425), 1363-1368.
- [19] Archer, D. (2009), *Global Warming I: The Science and Modeling of Climate Change*, MOOC de l'Université de Chicago sur Coursera
- [20] Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., Clough, S. A. (1997), *Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres : RRTM, a validated correlated-k model for the longwave*, *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 102, 16
- [21] Dessler, A. E., Zhang, Z., & Yang, P. (2008), *Water-vapor climate feedback inferred from climate fluctuations, 2003–2008*. *Geophysical Research Letters*, 35(20).
- [22] Rieckh, T., Anthes, R., Randel, W., Ho, S. P., & Foelsche, U. (2018), *Evaluating tropospheric humidity from GPS radio occultation, radiosonde, and AIRS from high-resolution time series*. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(5), 3091-3109.
- [23] Sivira, R. G., Brogniez, H., Mallet, C., & Oussar, Y. (2015), *A layer-averaged relative humidity profile retrieval for microwave observations: design and results for the Megha-Tropiques payload*. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(3), 1055-1071.
- [24] Alduchov, O. A., & Eskridge, R. E. (1996), *Improved Magnus form approximation of saturation vapor pressure*. *Journal of Applied Meteorology* (1988-2005), 601-609.
- [25] McInerney, F. A., & Wing, S. L. (2011), *The Paleocene-Eocene Thermal Maximum: A perturbation of carbon cycle, climate, and biosphere with implications for the future*. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 39(1), 489-516.