

Chapitre Climat 2. Modèle global

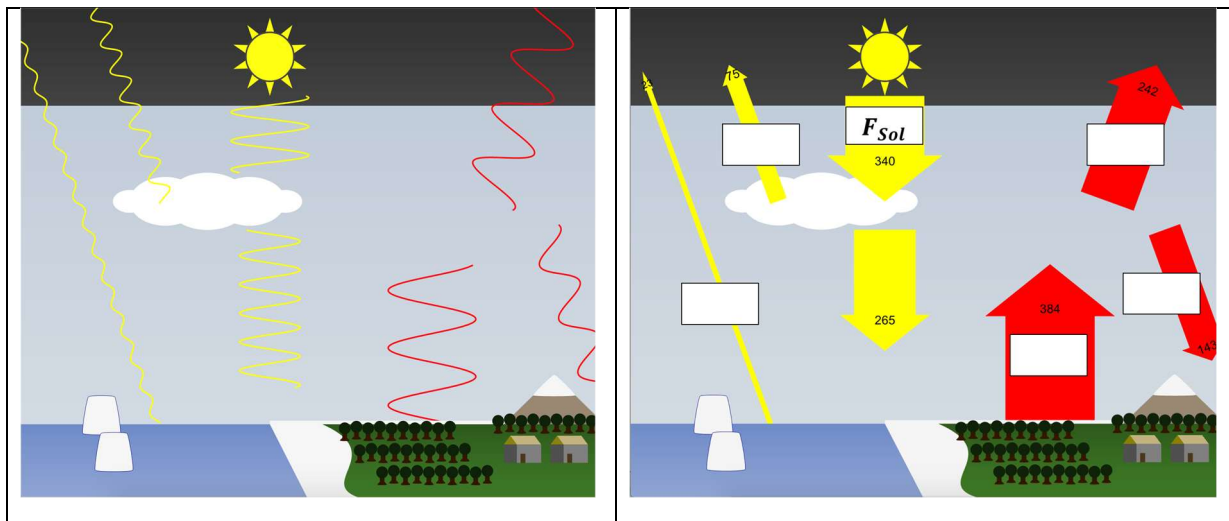
Objectifs d'apprentissage

- Reconnaître les différents flux participant au bilan énergétique de la planète et reconnaître de quelles variables ils dépendent
- Etablir un bilan énergétique pour déterminer si la planète est à l'équilibre thermique, ou si sa température va augmenter ou diminuer ; le justifier énergétiquement
- Dans le cas d'un déséquilibre, prédire si le flux thermique IR émis par la surface va augmenter ou diminuer pour atteindre un nouvel équilibre ; trouver la valeur du flux IR qui devrait s'échapper de l'atmosphère pour rétablir l'équilibre
- Définir l'albédo et l'effet de serre ; prédire comment les flux sortants VIS et IR dépendent de ces paramètres ; prédire comment la température va évoluer si l'albédo et/ou l'effet de serre sont modifiés
- Représenter des diagrammes de transformation d'énergie pour l'effet de serre et l'albédo
- Appliquer les définitions mathématiques de l'effet de serre et de l'albédo pour calculer une inconnue, p.ex. l'effet de serre et l'albédo sachant les valeurs de flux, ou inversement
- Calculer le flux thermique et la température d'équilibre sachant l'effet de serre et l'albédo.

On va maintenant construire un modèle global de la Terre en y intégrant non seulement le rayonnement IR et l'effet de serre étudiés dans la partie 1., mais aussi le rayonnement visible (VIS) provenant du Soleil et son interaction avec les nuages et la surface de la Terre. Cela permettra de comparer la puissance rayonnante entrant dans la planète et la puissance sortante, afin de prédire comment la température de la planète varie et d'expliquer comment elle peut se stabiliser.

Identifier les différents flux rayonnants

Voici les différents rayonnement IR et VIS intervenant dans le modèle, représentés à gauche sous forme ondulatoire, et à droite sous forme de flèches de flux (dont la largeur est proportionnelle à la valeur du flux).



Définition du concept de flux : Comme de l'énergie rayonnante est transportée en continu par les différents rayonnements, il faudrait considérer des _____ rayonnantes mesurées en Watts (c.à.d. en _____ par _____). Mais la planète est si grande que les valeurs de puissance sont énormes ! Il convient alors de diviser ces valeurs par la _____ de la Terre, afin d'obtenir des valeurs plus petites mesurées en Watts par _____, ce qu'on appelle des *flux* radiatifs.

1. A la page précédente, sur l'image du cadre de droite, attribuer les symboles suivants aux différents flux : $F_{IR\ GES}$ (Flux IR ré-émis par les GES vers la surface), $F_{VIS\ sfc}$ (flux VIS réfléchi par la surface), $F_{VIS\ nuag}$ (flux VIS réfléchi par les nuages) $F_{IR\ th}$ (flux du rayonnement thermique émis par la surface), $F_{IR\ atm}$ (flux IR s'échappant de l'atmosphère).
2. En 1850, toute la surface de la Terre émettait un rayonnement thermique d'une puissance $1,96 \times 10^{17} \text{ W}$. Calculer le flux thermique correspondant, sachant le rayon de la Terre moyen : $R \simeq 6370 \text{ km}$

Réponse : $F_{th} \simeq 384 \text{ W/m}^2$, comme indiqué sur la flèche de flux à la page précédente.

3. Où se trouve la limite de la planète dans le modèle étudié ? Indiquez-là avec un trait horizontal à côté de l'image de gauche à la page précédente.
4. Entourer les flux sortant de la planète dans le domaine VIS, et le flux sortant dans le domaine IR.

Tous ces flux contribuent à faire _____ de l'énergie à la planète chaque seconde.

5. Pourquoi le flux IR s'échappant de l'atmosphère n'est-il pas égal au flux IR ré-émis par les gaz à effet de serre vers la surface, $F_{atm} \neq F_{GES}$?

Etablir un bilan énergétique pour déterminer si la planète est à l'équilibre thermique ; prédire si la température va augmenter ou diminuer

Conclusion de l'activité « Vers un modèle global », onglet « Bilan énergétique » :

En comparant le flux solaire entrant avec les flux sortants (VIS et IR), vous avez pu conclure que :

Quand le flux solaire entrant dans la planète est _____, la température moyenne de surface reste stable, car la planète ne gagne ni ne _____ de l'_____.

En effet, comme le nombre de constituants (atomes) de la planète est fixe, la température reste constante si l'énergie l'est aussi (voir Partie 1. de ce chapitre). On dit que la planète se trouve dans un état d'_____ thermique.

$$F_{Sol} =$$

$$F_{Sol} -$$

$$=$$

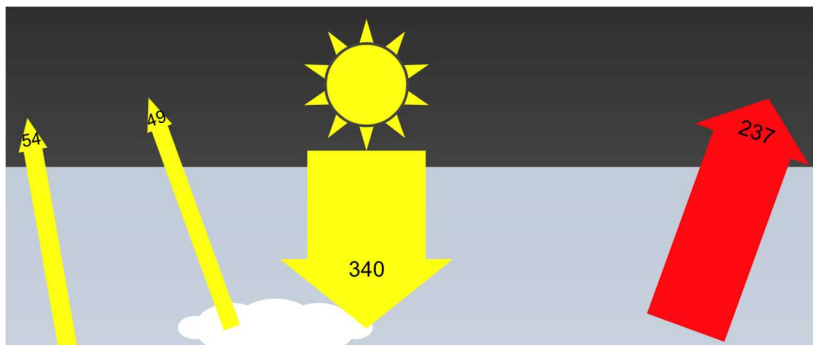
Quand le flux solaire entrant dans la planète est _____, la température de la planète _____, car chaque seconde la planète gagne de l'_____. Et inversement pour une diminution de température.

Comme la valeur du flux solaire est (presque) constante, l'équilibre thermique de la planète dépend uniquement des flux _____.

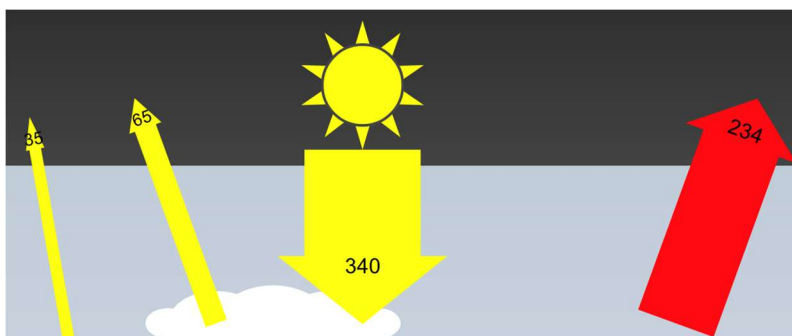
On notera respectivement les flux sortant VIS (c.à.d. $F_{\text{nuv}} + F_{\text{sfc}}$) et IR (c.à.d. F_{atm}) F'_{VIS} et F'_{IR} .

Etablir le *bilan énergétique* (ou bilan « radiatif », car il dépend uniquement des rayonnements entrants et sortants) de la planète signifie donc calculer la _____ des flux sortants VIS et IR, et la comparer avec le flux solaire entrant.

6. Compléter l'analogie : La quantité d'_____ thermique emmagasinée dans la planète (surface et atmosphère) est comme le capital d'argent d'une entreprise, et la température correspondrait au capital _____ par employé. Les flux sont analogues aux entrées et _____ d'argent par unité de temps, p.ex. par mois : le flux solaire serait équivalent aux recettes mensuelles et la somme des flux _____ à la somme des dépenses mensuelles. Le _____ correspond au bilan comptable de l'entreprise : si les recettes mensuelles sont égales aux _____, alors le capital reste stable, et si le nombre d'employés change pas (comme le nombre d'atomes dans la planète), alors le capital par employé reste _____.
7. A partir de la situation ci-dessous, établir le bilan énergétique pour déterminer si la planète se trouve à l'équilibre thermique ou non.

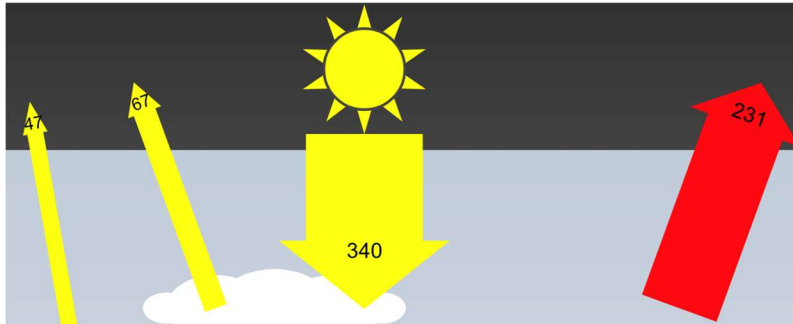


8. A partir de la situation ci-dessous, établir le bilan énergétique.

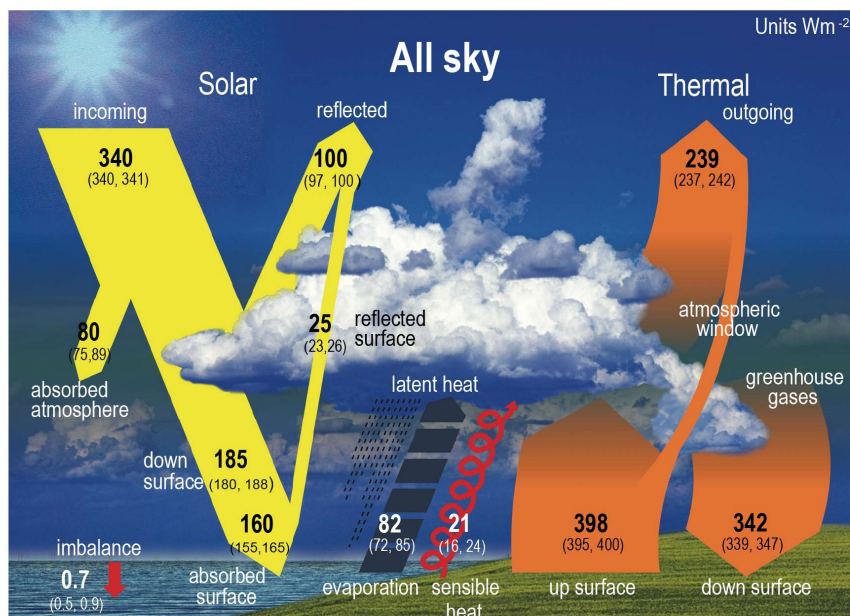


On en déduit que chaque seconde, la planète _____ de l'énergie, donc sa température va _____.

9. A partir de la situation ci-dessous, établir le bilan énergétique. Puis prédire si la température de la planète va augmenter ou diminuer, en le justifiant énergétiquement.



10. A partir des valeurs de flux publiées dans le rapport du GIEC (2021), établir le bilan énergétique (au sommet de l'atmosphère, sans considérer les échanges énergétiques entre la surface et l'atmosphère).



Reconnaître comment le flux IR thermique émis par la surface varie avec la température

Conclusion de l'activité « Vers un modèle global », onglet « Bilan énergétique » (suite) :

Quand la température de la surface de la planète augmente/diminue, le flux IR thermique émis par la surface _____,

jusqu'à ce que la valeur du flux IR sortant de la planète rétablisse un état d'_____.

Le fait que le rayonnement IR thermique émis par la surface varie avec la température permet donc à la planète de *stabiliser* sa température.

Analogie de l'entreprise : Si les recettes (mensuelles) sont supérieures aux sorties d'argent, l'entreprise doit augmenter ses dépenses afin de rétablir l'équilibre.

11. Reprendre la situation de l'exercice 8.

- a) Prédire si le flux thermique émis par la surface, F_{th} , va augmenter ou diminuer :
- b) Déterminer le flux IR qui doit sortir de la planète, F'_{IR} , pour que la température *se stabilise à nouveau*.
 - Dans quel état se trouvera alors la planète ?
 - Poser l'équation qui correspond à cet état, isoler l'inconnue littéralement puis résoudre numériquement.

Solution : $F'_{IR} = 240 \text{ W/m}^2$

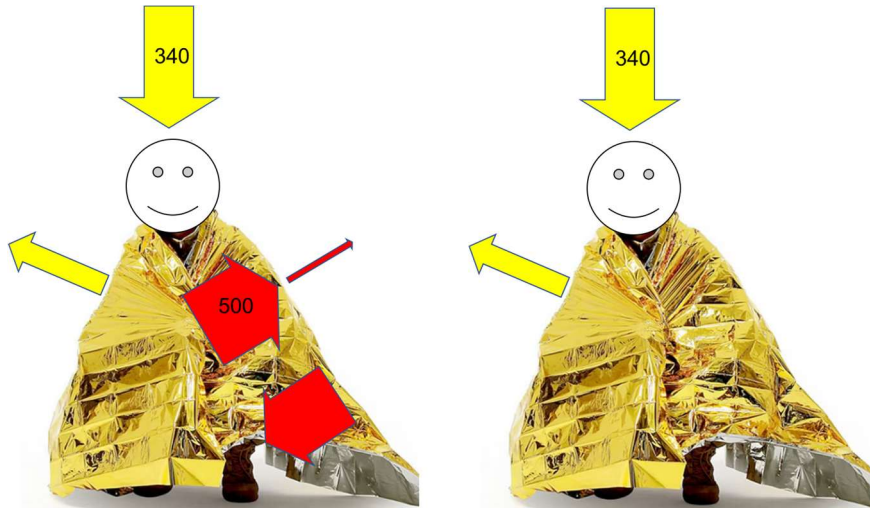
12. Reprendre la situation de l'exercice 9.

- a) Prédire si le flux thermique émis par la surface, F_{th} , va augmenter ou diminuer :
- b) Déterminer la valeur du flux sortant IR, F'_{IR} du flux sortant IR pour que la température *se stabilise à nouveau*.

Solution : $F'_{IR} = 226 \text{ W/m}^2$

13. Les couvertures de survie (inventées par la NASA) sont conçues pour que leur face extérieure dorée réfléchisse 50% du flux visible incident, et que leur face intérieure argentée réfléchisse 90% du rayonnement thermique IR émis par la surface de la personne.

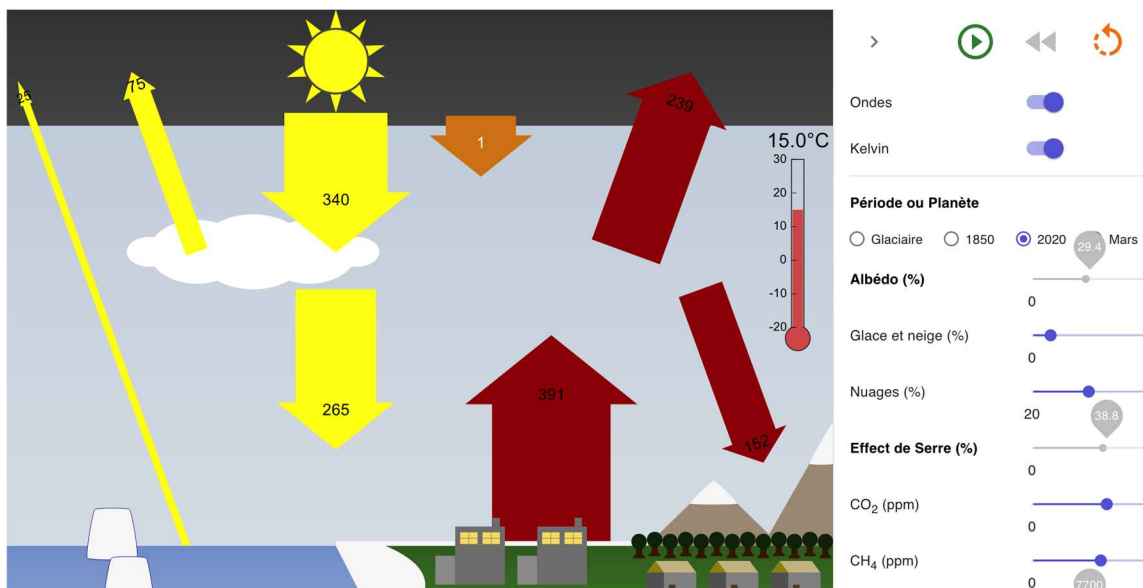
a) Sur la figure de gauche, compléter les valeurs manquantes des flux en W/m^2 .



- b) Etablir le bilan énergétique et prédire si la température de surface de la personne va rester constante, augmenter ou diminuer.
- c) Déterminer la valeur du flux IR qui devrait s'échapper de la couverture afin que la température de la personne se stabilise.
- d) Quelle serait alors la valeur du flux IR thermique émis par la surface de la personne ?
- e) Compléter les flèches de flux à droite, t.q. la largeur des flèches soit indicative des valeurs de flux une fois que la température se sera stabilisée.

Définir l'effet de serre et l'albédo ; Reconnaître de quelles variables ils dépendent ; prédire comment la température de la planète varie avec ces paramètres

Tout comme les flux VIS et IR sortants de la couverture de survie dépendent des caractéristiques de cette couverture, les flux VIS et IR sortants de notre planète dépendent eux-mêmes de deux caractéristiques de notre planète : l'efficacité de sa surface à réfléchir dans le VIS appelée « albédo », et l'efficacité de son atmosphère à absorber et réémettre dans l'IR appelée « paramètre d'effet de serre ». Ce dernier permet de déterminer le flux thermique que doit rayonner la surface de la planète afin qu'une certaine valeur de flux s'échappe de l'atmosphère.



Conclusion de l'activité « Vers un modèle global », onglet « Effet de serre et albédo » :

Les paramètres d'effet de serre et d'albédo sont définis comme des efficacités énergétiques ou *rendements*, donc des *rapports* entre flux (puissance) utile et flux (puissance) incident(e).

Paramètre d'effet de serre : Comme l'effet de serre est « utile » à ré-émettre un flux IR vers la surface (afin de limiter le flux s'échappant de l'atmosphère) :

$$\varepsilon = \frac{\text{flux IR vers la surface}}{\text{flux IR sortant}} \in (0, 1)$$

Il correspond donc à la fraction de flux IR _____ par les GES et _____ vers la surface.

Ce paramètre d'effet de serre dépend des _____ ainsi que de la _____ de l'atmosphère (masse de molécules par m³).

Paramètre d'albédo : Comme l'albédo est « utile » à réfléchir un flux VIS vers l'espace,

$$\alpha = \frac{\text{flux réfléchi}}{\text{flux incident}} \in (0, 1)$$

Il correspond donc à la fraction du flux _____ que la planète _____ vers l'espace.

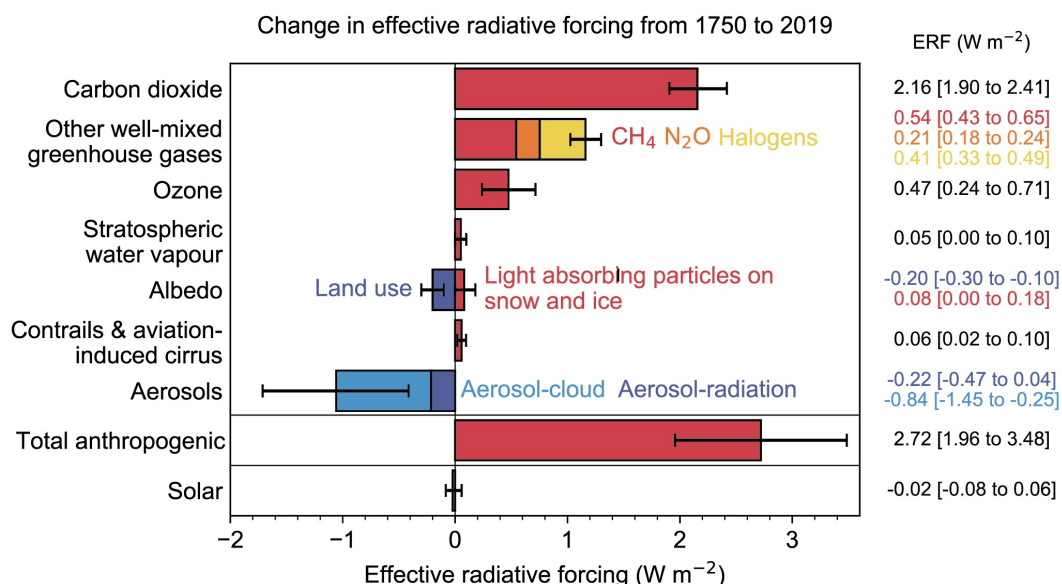
Il dépend de _____ (cryosphère), de _____ ainsi que de la couverture de forêts, déserts, constructions...

Ces deux paramètres (α , ε) sont définis comme des fractions avec des valeurs entre 0 et 1, plus pratique pour les calculs, mais peuvent être convertis en pourcentages.

→ Puisque le bilan énergétique de la planète dépend des flux sortants VIS et IR, il dépend donc indirectement de ces deux paramètres.

14. A partir des valeurs des flux indiquées dans la simulation en 2020 (image p. précédente), retrouver les valeurs de l'effet de serre et de l'albédo en % indiquées dans la simulation en gris sur les curseurs Albédo et Effet de serre.
15. Cette Figure du rapport du GIEC (2021) résume les différentes sources de « forçages radiatifs ». Par « forçage radiatif », on entend la déviation de l'équilibre thermique ou le flux net au sommet de l'atmosphère¹ (flèche orange dans la simulation) provoqué par une certaine source : un forçage positif signifie que le flux entrant est supérieur aux flux sortants et vice-versa pour un forçage négatif. COMPLIQUE

Analyser cette Figure et décider si les sources listées (colonne de gauche) contribuent à augmenter ou diminuer l'effet de serre ou l'albédo.



16. Partons d'une situation d'équilibre thermique (p.ex. en 1850).
 - a) Comment varierait le paramètre d'effet de serre si la concentration de GES augmentait ?
 - A. Il augmenterait
 - B. Il diminuerait
 - C. On ne peut pas savoir
 - b) Comment varierait alors la valeur du flux IR sortant de la planète ?
 - A. Il augmenterait
 - B. Il diminuerait
 - C. On ne peut pas savoir
 - c) Comment varierait la température de la planète ?
 - A. Elle augmenterait
 - B. Elle diminuerait
 - C. On ne peut pas savoir

Justifier en comparant les flux sortants avec le flux solaire entrant.

¹ Sans que le système Terre puisse ajuster son flux thermique et sa température, comme lorsqu'on change une variable dans la simulation avant d'appuyer sur Play.

17. Partons d'une situation d'équilibre thermique (p.ex. en 1850).

- a) Si on rasait toutes les forêts de la planète, comment varierait l'albédo planétaire ?
 A. Il augmenterait B. Il diminuerait C. On ne peut pas savoir
- b) Comment varierait alors le flux sortant VIS ?
 A. Il augmenterait B. Il diminuerait C. On ne peut pas savoir
- c) Comment varierait alors la température de la planète ?
 A. Elle augmenterait B. Elle diminuerait C. On ne peut pas savoir

Justifier en comparant les flux sortants avec le flux solaire entrant.

d) Comment varierait le flux thermique IR, F_{th} ?

18. A partir d'une situation d'équilibre : si la couverture de cryosphère diminue (fontes des glaciers) et la concentration des GES augmente, comment varierait les paramètres d'albédo et d'effet de serre ?

- Comment varieraient alors les flux sortants VIS et IR, F'_{VIS} , F'_{IR} ?
- Comment varierait la température de la planète ?
 A. Elle augmenterait B. Elle diminuerait C. On ne peut pas savoir

19. A partir d'une situation d'équilibre : Si on augmente la concentration des GES tout en recouvrant les toits des bâtiments d'un revêtement réfléchissant, comment varierait la température de la planète ?

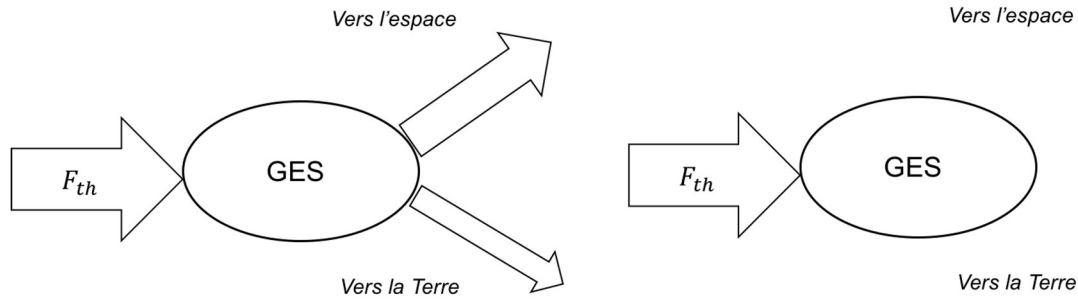
- A. Elle augmenterait B. Elle diminuerait C. On ne peut pas savoir

Justifier en précisant comment les paramètres d'effet de serre et d'albédo et les flux sortants varieraient.

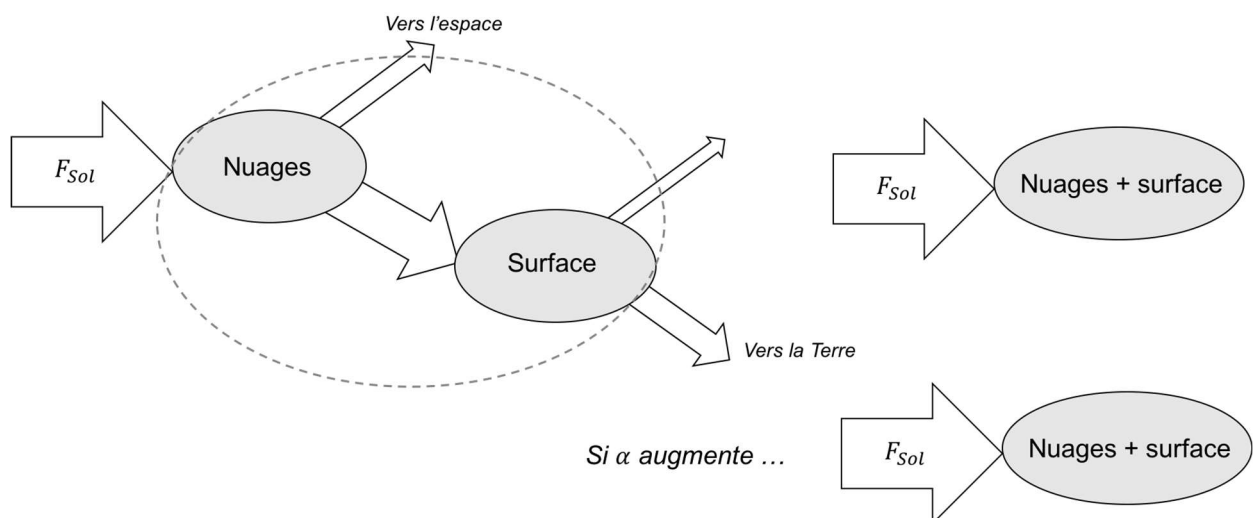
Représenter des diagrammes de transformation d'énergie pour l'effet de serre et l'albédo

20. Ci-dessous à gauche est représenté le même diagramme de transformation d'énergie que celui obtenu à la fin de la partie 1, en remplaçant le symbole P des puissances par le symbole F pour « flux ».

- a) Ajouter les symboles F'_{IR} pour le flux sortant de la planète en IR et F_{GES} pour le flux réémis vers la surface par les GES.



- b) Dans le diagramme de gauche, tracer une flèche courbée reliant le flux IR thermique émis par la surface de la Terre au flux « utile » de l'effet de serre.
- c) Dans le diagramme de droite, représenter les flux dans le cas où le paramètre d'effet de serre ε diminue.
21. Tout comme l'effet de serre est dû à deux processus de transformation d'énergie – l'absorption et la réémission (voir partie 1) – l'albédo de la planète est dû à deux transformations, une réflexion par les nuages et une réflexion par la surface.
- a) Nommer les flux dans le diagramme de gauche : F_{sfc} et F_{nug} (flux réfléchis par la surface et les nuages), F_{trs} (flux transmis par les nuages) et F_{abs} (flux absorbé par la surface). On néglige l'absorption par l'atmosphère pour simplifier.
- b) A droite, combiner les deux processus en une seule « patate ». Représenter le flux sortant de la planète dans le VIS, F'_{VIS} , et au flux absorbé F_{abs} . Tracer une flèche courbée reliant le flux solaire au flux « utile » de l'albédo.
- c) Sous le diagramme de droite, représenter un autre diagramme pour lequel α est plus important. Prêter attention aux tailles des flèches.



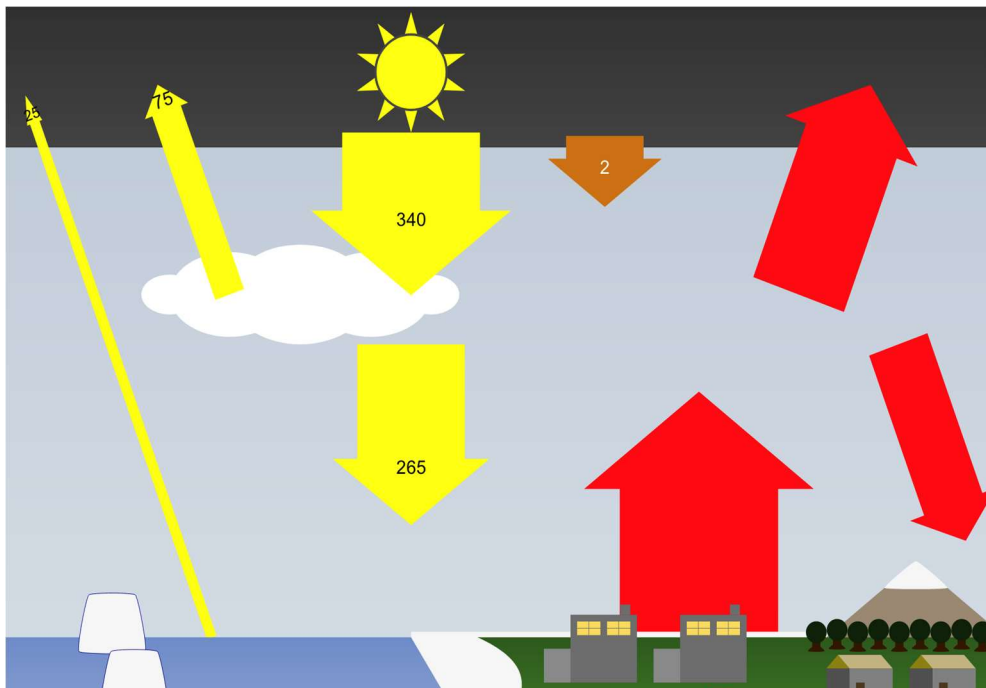
Calculer avec les définitions de l'effet de serre et de l'albédo

22. En 1900, l'albédo planétaire valait $\alpha = 0.288$ (en 2020 il valait $\alpha = 0.294$ dû à la déforestation et la présence plus importante d'asphalte réfléchissant). Calculer le flux visible réfléchi vers l'espace par la planète, F'_{VIS} .

Solution : $F'_{VIS} = 97 \text{ W/m}^2$

23. Supposons que l'on atteigne en 2050 des concentrations de CO_2 et CH_4 de 500 ppm et 2.1 ppm respectivement et que l'on parvienne à stabiliser ces concentrations. Le paramètre d'effet de serre vaudrait alors $\varepsilon = 0.392$ (au lieu de 0.388 en 2020).

- a) La Figure ci-dessous indique l'état des flux avant que la planète ajuste son flux thermique et stabilise la température. Calculer la valeur F'_{IR} du flux IR sortant de la planète une fois que la température de la planète se sera stabilisée.
- b) En déduire la valeur F_{th} du flux IR thermique émis par la surface. Raisonner comme dans l'exercice 13 : ici on sait que le flux IR réémis par les GES vaut 39% du flux IR thermique, donc le flux s'échappant de l'atmosphère vaut ... %.



Solutions : $F'_{IR} = 240 \text{ W/m}^2$, $F_{th} = \frac{F'_{IR}}{(1-\varepsilon)} \approx 394.74 \text{ W/m}^2$

24. En réalité, si la température moyenne de la surface de la Terre augmente, il est probable que cela engendre une diminution de la cryosphère et par là une diminution de l'albédo (rétroaction des glaces), ainsi qu'une augmentation de la concentration de vapeur d'eau par évaporation (rétroaction de la vapeur d'eau), ce qui augmentera davantage l'effet de serre. Des valeurs plus réalistes seraient alors $\alpha = 0.28$ et $\varepsilon = 0.396$.
- a) Calculer le flux visible F'_{VIS} sortant de la planète en tenant compte de la nouvelle valeur d'albédo.
- b) En déduire le flux IR F'_{IR} qui devrait s'échapper de l'atmosphère pour stabiliser la température.
- c) En tenant compte de la nouvelle valeur d'effet de serre, calculer la valeur F_{th} du flux IR thermique qui devrait être émis par la surface.

Solutions : $F'_{VIS} = 95.2 \text{ W/m}^2$, $F'_{IR} = 244.8 \text{ W/m}^2$, $F_{th} = \frac{F'_{IR}}{(1-\varepsilon)} \simeq 405.3 \text{ W/m}^2$

Calculer une température d'équilibre à partir du flux thermique

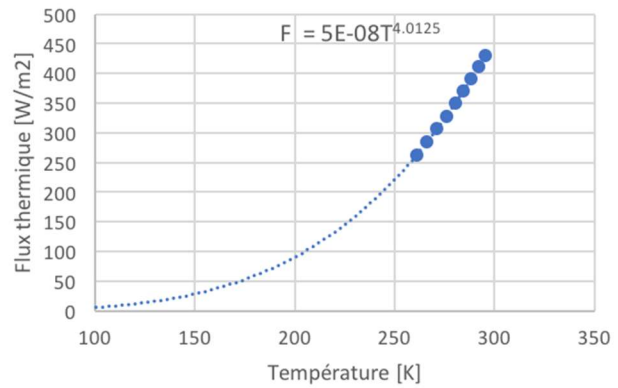
Sachant le paramètre d'effet de serre, on est donc en mesure de déterminer le flux thermique IR que la surface de la planète doit émettre pour retrouver un état d'équilibre et stabiliser sa température. Si on pouvait déterminer la relation entre la valeur du flux IR thermique et la température, on pourrait alors prédire la nouvelle température de la planète.

Flux thermique en fonction de T :

$$F_{th} = \quad ,$$

avec T [] et $\sigma \approx 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

On appelle cette relation la *loi de Stefan-Boltzmann*.



25. Pour la situation de l'exercice 23 (accroissement de l'effet de serre), calculer la température de la surface de la Terre pour qu'elle émette le flux IR thermique que vous avez calculé.

Solution : $T \approx 288.6 \text{ K} = 15.6 \text{ }^\circ\text{C}$

26. Pour la situation de l'exercice 17 (accroissement de l'effet de serre et fonte des glaces), calculer la température de la surface de la Terre pour qu'elle émette le flux IR thermique que vous avez calculé.

Solution : $T \approx 290.7 \text{ K} = 17.7 \text{ }^\circ\text{C}$