

TD n° 7

Forçages climatiques et rétroactions

Objectifs

- Se familiariser avec la notion de forçage
- Appréhender la notion de couplage (ou rétroaction) ; apprendre à en faire une représentation diagrammatique
- Voir quelques exemples de rétroactions dans le système climatique et quantifier leurs effets

7.1 Le forçage radiatif

Le forçage radiatif ΔF est défini comme le déséquilibre radiatif imposé depuis 1750 si on fige la température ($\Delta T_s = 0$) et qu'on considère seulement les effets **directs** des émissions anthropiques (gaz à effet de serre et aérosols) sur les flux sans les rétroactions. Dans ce contexte, l'équation $\Delta G = \Delta F + \eta \Delta T_s$ se réduit à :

$$\Delta G = \Delta F = \Delta F_{\text{in}} - \Delta F_{\text{out}}. \quad (7.1)$$

1. L'effet de serre \mathcal{E} est défini comme étant la différence entre la densité de flux émise par la surface et celle émise au sommet de l'atmosphère :

$$\mathcal{E} = F^+(\tau_s) - F_{\text{out}} \quad (7.2)$$

À l'équilibre radiatif, que vaut F_{out} ? Calculer l'effet de serre \mathcal{E} pour l'épaisseur optique pré-industrielle $\tau_s = 1,25$.

Correction

À l'équilibre $F_{\text{out}} = F_{\text{in}} = \frac{E}{4}(1 - A_b) = 240 \text{ W m}^{-2}$. On trouve pour l'effet de serre 150 W m^{-2} .

2. Entre 1750 et 2020, l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère a modifié le flux sortant F_{out} , avec une variation d'environ $\Delta F_{\text{out}} = -3 \text{ W m}^{-2}$. Montrer que τ_s peut s'exprimer :

$$\tau_s = 2 \left(\frac{\sigma T_s^4}{F_{\text{out}}} - 1 \right). \quad (7.3)$$

En déduire une expression de $\frac{\partial \tau_s}{\partial F_{\text{out}}}$ en supposant T_s constante. Entre 1750 et 2020, de combien doit augmenter τ_s à T_s constant pour correspondre à $\Delta F_{\text{out}} = -3 \text{ W m}^{-2}$?

Correction

On trouve :

$$\tau_s = 2 \left(\frac{\sigma T_s^4}{F_{\text{out}}} - 1 \right)$$

En dérivant : $\frac{\partial \tau_s}{\partial F_{\text{out}}} = -2\sigma T_s^4 / F_{\text{out}}^2$

D'où une variation de τ_s :

$$\Delta \tau_s = -2 \frac{\sigma T_s^4}{F_{\text{out}}^2} \Delta F_{\text{out}} = -2 \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \times 288^4}{240^2} \times (-3) = 0,04.$$

On obtient une variation positive de τ_s , comme attendu. On remarque qu'il suffit d'une petite augmentation de τ_s pour induire le forçage observé, car nous faisons ici l'hypothèse d'une atmosphère grise. Cela signifie que l'atmosphère absorbe de la même façon toutes les longueurs d'onde de l'infrarouge, ce qui n'est pas le cas en réalité. Les GES ont des bandes d'absorption bien marquées. Par exemple la principale bande d'absorption du CO_2 est à $15\ \mu\text{m}$. En absorbant toutes les longueurs d'onde, notre modèle surestime donc fortement la sensibilité à τ_s , l'opacité totale en GES.

3. Les aérosols modifient quant à eux le flux incident F_{in} . Cette variation vaut environ $\Delta F_{\text{in}} = -1,3\ \text{W m}^{-2}$. Exprimer A_b en fonction de F_{in} puis $\frac{\partial A_b}{\partial F_{\text{in}}}$. À quelle augmentation de l'albédo correspond le forçage des aérosols ? Commenter la valeur.

Correction

On a

$$A_b = 1 - \frac{4F_{\text{in}}}{E} \rightarrow \frac{\partial A_b}{\partial F_{\text{in}}} = -\frac{4}{E}$$

D'où une variation de l'albédo

$$\Delta A_b = \frac{\partial A_b}{\partial F_{\text{in}}} \Delta F_{\text{in}} = -\frac{4}{E} \Delta F_{\text{in}} = -\frac{4}{1368} \times (-1,3) = 0,004$$

La variation relative d'albédo est très faible $\frac{0,004}{0,31} = 1\ \%$. Une faible variation d'albédo permet de comprendre cette variation de flux incident. L'effet d'albédo est significatif et atténue l'effet de l'augmentation des gaz à effet de serre (mais pas suffisamment pour le compenser). On comprend ici que les humains soient tentés d'utiliser des techniques de géo-ingénierie (par exemple injection de poussières réfléchissantes dans l'atmosphère) pour augmenter l'albédo et compenser l'effet de l'augmentation des gaz à effet de serre. Ce type d'idée présente néanmoins de nombreux problèmes, technologiques, climatiques, météorologiques, et éthiques.

7.2 Les rétroactions, approche par diagrammes systémiques

Lorsque la température de surface est perturbée ($\Delta T_s \neq 0$), toutes les composantes du système climatique vont être modifiées. Le système climatique peut alors amplifier ou atténuer la perturbation initiale par le biais de rétroactions dites positives si amplification et négative si atténuation. Un diagramme systémique permet de cartographier les composantes d'un système et d'y mettre en évidence les boucles de rétroactions.

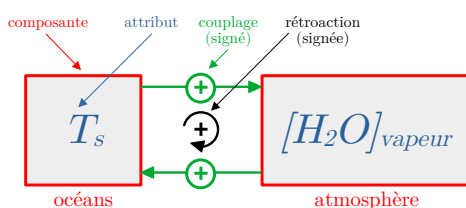
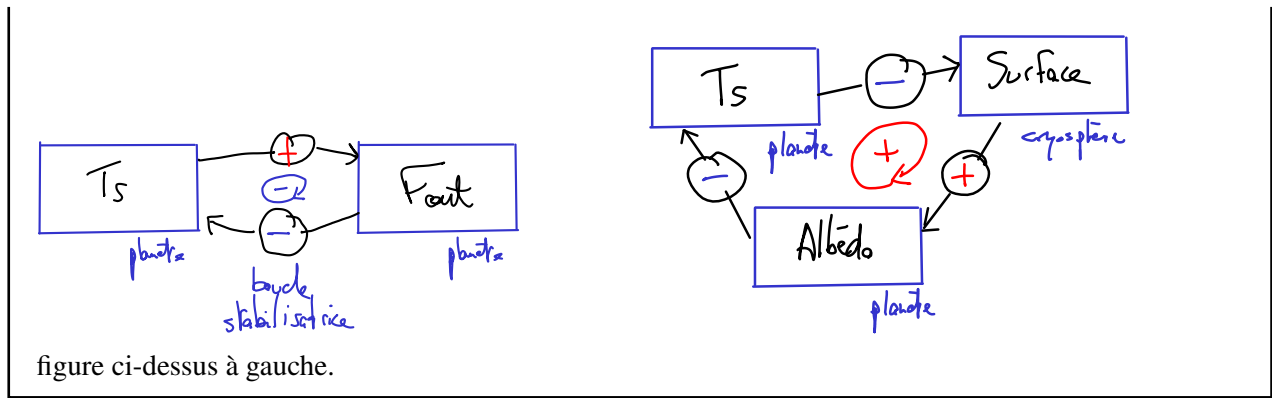


FIGURE 7.1 – Diagramme systémique : rétroaction de la vapeur d'eau. Une augmentation de la température de surface des océans augmente leur évaporation et la concentration de vapeur d'eau dans l'atmosphère : il s'agit donc d'un **couplage positif**. Une augmentation de vapeur d'eau engendre quant à elle une augmentation de la température de surface par effet de serre : il s'agit encore une fois d'un **couplage positif**. Comme $(+1) \times (+1) = +1$, la boucle de rétroaction est **positive** : une augmentation initiale de température est amplifiée par la boucle de rétroaction de la vapeur d'eau.

4. En plaçant T_s et F_{out} sur un diagramme systémique comme la figure 7.1, décrire ce qu'est la rétroaction de Planck, à savoir qu'une surface plus chaude se refroidit plus efficacement puisque son émittance suit la loi de Stefan-Boltzmann σT^4 .

Correction



5. Décrire ce qu'est la rétroaction de l'albédo en plaçant sur un diagramme systémique la surface de glace de mer, la température de surface et l'albédo moyen de la Terre. Cette rétroaction est-elle positive (amplificatrice) ou négative (stabilisatrice) ?

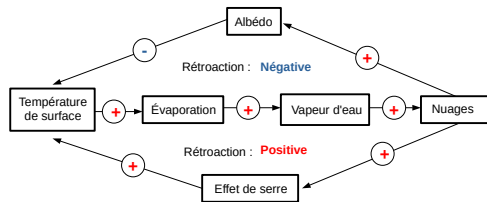
Correction

figure ci-dessus à droite.

6. La figure ci-dessous montre la double rétroaction des nuages sur la température de surface. Compléter le diagramme systémique ci-dessous en indiquant le signe des couplages et des deux boucles de rétroactions mises en évidence. Peut-on conclure quant à l'effet des nuages sur T_s ? Que peut-on dire sur le rôle des nuages sur l'évolution de la température de surface en situation de changement climatique ?

Correction

Les nuages augmentent l'albédo donc ont un effet refroidissant, mais ils augmentent aussi l'effet de serre car les gouttelettes/cristaux absorbent et émettent efficacement l'infrarouge. La plupart des modèles prédisent un effet plutôt réchauffant des nuages, mais la valeur exacte de ce réchauffement reste incertaine.



7.3 Les rétroactions, approche quantitative

Nous continuons l'analyse de l'équation $\Delta G = \Delta F + \eta \Delta T_s$ avec maintenant le terme lié aux rétroactions $\eta \Delta T_s$ qui reflète l'effet **indirect** sur les flux radiatifs des rétroactions associées à la variation de la température de surface T_s . Le bilan radiatif $G = F_{in} - F_{out}$ dépend de nombreux paramètres qui eux-mêmes dépendent de la température :

$$G = f(E, T_s, A_b(T_s), \tau_s(T_s)) \quad (7.4)$$

On cherche par la suite à quantifier les variations de G selon chacun des paramètres, et à les comparer à la figure 7.2 qui donne les différentes valeurs des paramètres de rétroaction¹. Nous écrivons la variation dG sous la forme :

$$dG = \underbrace{\frac{\partial G}{\partial F_{out}} \frac{\partial F_{out}}{\partial T_s}}_{\eta_{Planck}} dT_s + \underbrace{\frac{\partial G}{\partial A_b} \frac{\partial A_b}{\partial T_s}}_{\eta_{alb}} dT_s + \underbrace{\frac{\partial G}{\partial \tau_s} \frac{\partial \tau_s}{\partial T_s}}_{\eta_{vap}} dT_s = (\eta_{Planck} + \eta_{alb} + \eta_{vap}) dT_s \quad (7.5)$$

7.3.1 Rétroaction de Planck

On s'intéresse d'abord à la variation directe de G en fonction de T_s , qu'on appelle rétroaction de Planck.

7. Exprimer le paramètre de rétroaction de Planck η_{Planck} (voir équation 7.5) en fonction de T_s et τ_s en utilisant le modèle à deux faisceaux. Calculer η_{Planck} pour $\tau_s = 1.25$. Commenter.

1. Nous n'évaluerons pas le paramètre de rétroaction des nuages, qui est trop complexe à estimer à la main, voir question 7.2.6).

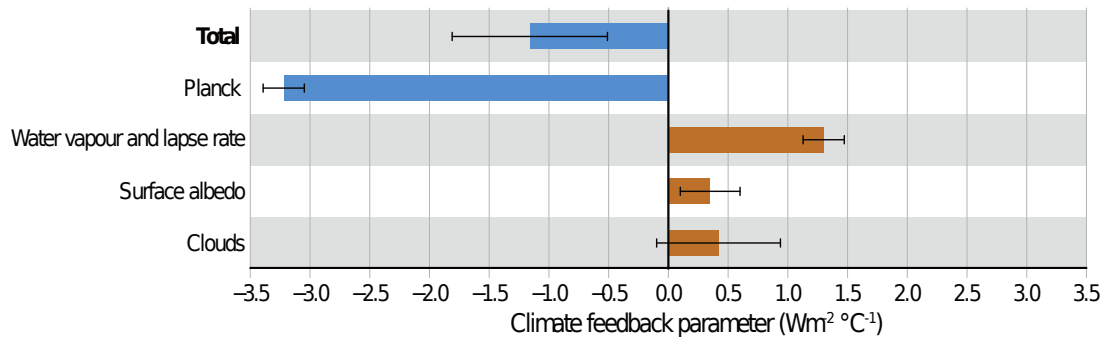


FIGURE 7.2 – Paramètre de rétroaction η pour les quatre rétroactions principales du système climatique. Source : 6^e rapport du GIEC.

Correction

On a

$$F_{\text{out}} = \frac{\sigma T_s^4}{1 + \tau_s/2}$$

d'où

$$\eta_{\text{Planck}} = \frac{\partial G}{\partial F_{\text{out}}} \frac{\partial F_{\text{out}}}{\partial T_s} = (-1) \times \frac{4\sigma T_s^3}{1 + \tau_s/2} = -\frac{4 \times 5,67 \cdot 10^{-8} \times 288^3}{1 + 1,25/2} = -3,33 \text{ (W/m}^2\text{)/K}$$

Le résultat est vraiment en accord avec le résultat expérimental de la figure 7.2.

8. Entre 1750 et 2020, le bilan radiatif G s'est déséquilibré de $\Delta G = 0,8 \text{ W m}^{-2}$. Le forçage radiatif ΔF est quant à lui de 2 W m^{-2} . De combien serait l'augmentation de température de surface ΔT_s si la rétroaction de Planck était la seule à l'œuvre ? Comparer cette valeur à l'augmentation de température effectivement constatée entre 1750 et 2020 de 1°C . Que peut-on en conclure sur le rôle des autres rétroactions ?

Correction

S'il n'y a que la rétroaction de Planck :

$$\Delta G = \Delta F + \eta_{\text{Planck}} \Delta T_s$$

d'où

$$\Delta T_s = \frac{\Delta G - \Delta F}{\eta_{\text{Planck}}} = \frac{0,8 - 2}{-3,33} = 0,36 \text{ K.}$$

On observe actuellement une élévation de température plus grande (déjà 1°C en 2020), ce qui suggère l'existence de rétroactions positives et leur importance capitale dans la réponse du système climatique aux modifications anthropiques.

7.3.2 Effet dû à l'albédo

9. On mesure une variation de l'albédo de la surface en fonction de sa température $\frac{\partial A_b}{\partial T_s} = -1 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Montrer que le paramètre de rétroaction de l'albédo peut s'écrire :

$$\eta_{\text{alb}} = -\frac{E}{4} \frac{\partial A_b}{\partial T_s} \quad (7.6)$$

et en déduire la valeur de η_{alb} .

Correction

On a

$$\eta_{\text{alb}} = \frac{\partial G}{\partial A_b} \frac{\partial A_b}{\partial T_s} = \frac{\partial F_{\text{in}}}{\partial A_b} \frac{\partial A_b}{\partial T_s} = -\frac{E}{4} \frac{\partial A_b}{\partial T_s} = -\frac{1368}{4} \times (-1 \cdot 10^{-3}) = 0,342 \text{ (W/m}^2\text{)/K}$$

On trouve effectivement une valeur en accord avec la figure 7.2.

7.3.3 Effet dû à la vapeur d'eau

10. La vapeur d'eau étant un GES, son augmentation dans l'atmosphère en raison d'une évaporation accrue modifie l'épaisseur optique totale τ_s et l'augmente. Montrer que le paramètre de rétroaction de la vapeur d'eau peut s'écrire :

$$\eta_{\text{vap}} = \frac{\sigma T_s^4}{2(1 + \frac{\tau_s}{2})^2} \frac{\partial \tau_s}{\partial T_s} \quad (7.7)$$

Correction

On a :

$$\frac{\partial G}{\partial \tau_s} = -\frac{\partial F_{\text{out}}}{\partial \tau_s} = -\frac{\partial}{\partial \tau_s} \left(\frac{\sigma T_s^4}{1 + \frac{\tau_s}{2}} \right) = \frac{\sigma T_s^4}{2(1 + \frac{\tau_s}{2})^2}$$

d'où l'expression recherchée

$$\eta_{\text{vap}} = \frac{\partial G}{\partial \tau_s} \frac{\partial \tau_s}{\partial T_s} = \frac{\sigma T_s^4}{2(1 + \frac{\tau_s}{2})^2} \frac{\partial \tau_s}{\partial T_s}$$

Reste à déterminer la variation de l'épaisseur optique τ_s avec la température T_s lorsque la rétroaction de la vapeur d'eau est active. Nous utilisons pour cela l'expression (7.3) trouvée à la question 7.1.2 de τ_s en fonction de σT_s^4 et F_{out} . La dépendance en T_s vient du numérateur mais aussi du dénominateur puisque le flux sortant F_{out} dépend de la température T_s . Sans l'effet des rétroactions de la vapeur d'eau, ce flux dépendrait de T_s^4 , mais on observe expérimentalement sur la figure 7.3 que par l'effet de la vapeur d'eau le flux au sommet de l'atmosphère varie linéairement avec T_s . On obtient ainsi que :

$$F_{\text{out}} = aT_s + b \quad \text{avec} \quad a = 2,22 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1} \quad \text{et} \quad b = -370 \text{ W m}^{-2}. \quad (7.8)$$

11. Calculer la dérivée $\frac{\partial \tau_s}{\partial T_s}$ et l'évaluer à la température moyenne de la Terre $T_s = 288 \text{ K}$.

Correction

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tau_s}{\partial T_s} &= 2\sigma \frac{4T_s^3(aT_s + b) - T_s^4 a}{(aT_s + b)^2} = 2\sigma T_s^3 \frac{3aT_s + 4b}{(aT_s + b)^2} \\ &= 2 \times 5,67 \cdot 10^{-8} \times 288^3 \frac{3 \times 2,22 \times 288 + 4 \times (-370)}{(2,22 \times 288 - 370)^2} = 0,0167 \text{ K}^{-1} \end{aligned}$$

12. En déduire une estimation du paramètre de rétroaction donné par l'équation (7.7). Comment se compare cette valeur à celle de la figure du rapport du GIEC ? Rappel : $\tau_s = 1,25$.

Correction

On obtient finalement :

$$\eta_{\text{vap}} = \frac{\sigma T_s^4}{2(1 + \frac{\tau_s}{2})^2} \frac{\partial \tau_s}{\partial T_s} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \times 288^4}{2(1 + \frac{1,25}{2})^2} \times 0,0167 = 1,23 \text{ (W/m}^2\text{)/K}$$

On trouve un résultat très proche de ce qui est présenté sur la figure du rapport du GIEC.

Syukuro Manabe a conclu les travaux qui lui ont valu le Prix Nobel de Physique en 2021 par ce type de calculs ainsi que par la mise au point de modèles simplifiés mais retenant toute la physique de première ordre importante pour comprendre les mécanismes du changement climatique, notamment le rôle central de la rétroaction de la vapeur d'eau. Ces travaux prédisaient déjà, dès les années 70, l'amplitude du changement climatique avec une précision remarquable.

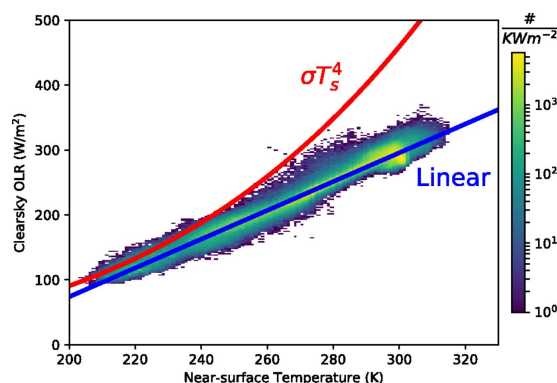


FIGURE 7.3 – Tracé du flux surfacique sortant F_{out} au sommet de la Terre en fonction de la température de surface T_s . La dépendance dévie largement du modèle du corps noir (pointillés) et est approximativement linéaire (ajustement en traits pleins). Manabe et Strickler avaient prédit théoriquement dans les années 60 cette forme approximativement linéaire. Les points montrés ici sont des mesures moyennes mensuelles de F_{out} mesurées par temps clair par satellite. La couleur indique la densité du nombres de points. *Source : Koll & Cronin, PNAS 115 (41) 10293-10298 (2018).*