	TSE101
	TP 4
	Modèle et Analyse de l'effet de serre atmosphérique

Dans ce TP, nous allons simuler un modèle d'effet de serre qui permettra de mesurer l'impact d'une augmentation de la concentration de CO_2 sur le forçage radiatif supplémentaire induit et finalement sur la hausse de température induite.
Avant de préciser le modèle, nous rappelons plusieurs éléments vus en cours :

- Tout corps (dont le Soleil et la Terre) émet un rayonnement électromagnétique dont le spectre dépend de sa température. Ainsi, selon la loi de Planck, ce spectre est donné par

$$M(\lambda, T) = \frac{2h\pi c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1}$$

  avec λ la longueur d'onde (en m), T la température en Kelvin du corps, c la célérité de l'onde, k la constante de Boltzmann et h la constante de Planck.
- En intégrant sur tout le spectre, on obtient la puissance surfacique suivante pour ce rayonnement, qu'on appellera *forçage radiatif* et qu'on notera par F

$$F = \int_\lambda M(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \tag{1}$$

  avec σ la constante de Stefan-Boltzmann.
- La valeur de ce forçage au niveau de son entrée dans l'atmosphère vaut environ

$$F_{\text{ext}} = 340\text{W/m}^2.$$

La Terre (planète+atmosphère) admet un équilibre radiatif ce qui signifie que

$$F_{\text{ext}} = F_{\text{int}}(T, C)$$

avec $F_{\text{int}}(T, C)$ le forçage radiatif en sortie de l'atmosphère issu de la planète ayant une température au sol de T et une concentration de CO_2 de C.

L'objectif du TP est de simuler la fonction $(T, C) \mapsto F_{\text{int}}(T, C)$ en fonction de C et de comprendre l'impact sur T de la contrainte $F_{\text{ext}} = F_{\text{int}}(T, C)$.

Pour construire cette fonction F_{int}, nous allons découper l'atmosphère en couche de hauteur « infinitésimal » dz et nous allons également raisonner sur une largeur de spectre « infinitésimale » $d\lambda$. Nous considérons que la couche n a une température T_n et que le système admet N couches telle Ndz correspond à la hauteur de sortie d'atmosphère que nous fixerons à 80km.
A la longueur d'onde λ, le forçage radiatif à la couche n sera noté $F_n(\lambda)$. Nous avons la récurrence suivante

- Couche initiale : $F_0(\lambda) = M(\lambda, T_0)$ avec $T_0 := T$ la température au sol
- Couche n : $F_n(\lambda) = (1 - \alpha_n(z_n, \lambda, C))F_{n-1}(\lambda) + \alpha_n(z_n, \lambda, C)M(\lambda, T_n)$ avec z_n la hauteur de la couche n. Cette égalité provient d'un équilibre des forçages radiatifs à chaque couche et de la loi de Kirchhoff indiquant que le taux d'émission d'un corps est identique à son taux d'absorption.
- Couche finale : $F_N(\lambda, T, C) = (1 - \alpha_N(z_N, \lambda, C))F_{N-1}(\lambda) + \alpha_N(z_N, \lambda, C)M(\lambda, T_N)$

avec $\alpha_n(z, \lambda, C)$ le taux d'absorption à la hauteur z, la longueur d'onde λ dû à la concentration C de CO_2.

Finalement, nous avons

$$F_{\text{int}}(T, C) = \int F_N(\lambda, T, C) d\lambda$$

Nous noterons

- ΔF le déséquilibre radiatif qui vaut

$$\Delta F(T, C) = |F_{\text{int}}(T, C) - F_{\text{ext}}|.$$

- C_0 et T_0 respectivement la concentration de CO_2 (280ppm) et la température induite ($288,2^o$K) à l'ère pré-industrielle.
- ΔT l'écart de température $T - T_0$ avec T la température obtenue avec la concentration de CO_2 C.

Le modèle en couche est résumé sur la figure et provient de [1].

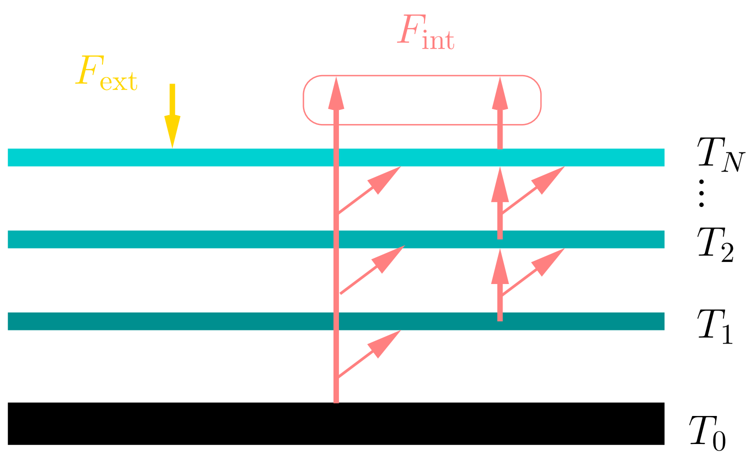

FIGURE 1 – Modèle par couche de l'effet de serre

Questions :

1.1 Tracer le profil de gradient de la température selon la hauteur dans l'atmosphère selon le modèle US1976.

1.2 Tracer le profil de gradient de pression selon la hauteur dans l'atmosphère

1.3 Tracer l'allure $A(\lambda)$ du spectre d'absorption du CO_2 en fonction de λ avec

$$A(\lambda) = A_0.10^{-22,5-24.|\lambda-\lambda_0|/\lambda_0}$$

où $\lambda_0 = 15\mu$m et A_0 un facteur de normalisation permettant de comparer visuellement au spectre de Planck calculé à la température pré-industrielle.

On va maintenant s'intéresser au forçage sortant de l'atmosphère.

2.1 Examiner le spectre du forçage $\lambda \mapsto F_N(\lambda, T_0, C_0)$ avec celui de $\lambda \mapsto F_N(\lambda, T_0, C)$ pour trois modèles de gradient de température (constante, simple, US1976) et différentes valeurs de C allant de C_0 à $4C_0$. Qu'en conclure ?

2.2 Supposer aux courbes de **2.1** les spectres de Planck au sol aux températures $288,2^o$K et 216^o. Commenter.

2.3 Dorénavant on considère le modèle simplifié du gradient de température. Tracer $C \mapsto \Delta F(T_0, C)$.

2.4 On considère la fonction

$$g(C) = a \log_{10}(C/C_0)$$

Trouver le a permettant d'ajuster au mieux les fonctions ΔF et g au sens des moindres carrés. Le terme a sera le coefficient de régression. Pour se faire, trouver sous forme analytique le terme a minimisant la distance quadratique entre les sorties des fonctions ΔF et g sur la grille de C testée. Que vaut a qu'on notera a_F ?

2.5 Tracer en fonction de C les fonctions $\Delta(T_0, C)$ et $g(C)$ avec le a obtenu en 2.4. Qu'observez-vous ?

On va maintenant s'intéresser à la température T que le sol doit avoir lorsque la concentration est de C pour que $F_{\text{int}}(T, C) = F_{\text{int}}(T_0, C_0) = (F_{\text{ext}})$.

3.1 Tracer la fonction ΔT en fonction de C.

3.2 Ajuster en suivant l'approche de **2.4** la fonction g à ΔT. Que vaut le nouveau a qu'on notera a_T ? Evaluer a_F/a_T et montrer que cette valeur était prévisible en se basant sur l'équation (1).

3.3 Tracer alors le g correspondant et comparer à ΔT. Qu'observez-vous ?

3.4 Sachant que 30% de l'ampleur du réchauffement est dû à l'effet radiatif (les 70% restant sont dûs aux réactions du système-Terre à cette modification du bilan radiatif et donc de température), en déduire le nom de l'« unité » permettant de passer de C/C_0 à l'écart total de température.

3.5 Rechercher dans la littérature la valeur de l'écart de température engendré par un doublement de la concentration de CO_2 ? Qu'en déduisez-vous sur le modèle utilisé dans ce TP ?

Bibliographie :

1. J.-L. Dufresne, "l'effet de serre atmosphérique : plus subtil qu'on ne le croit !", Météorologie, 2011.
2. N. Jeevanjee et al., "An analytical model for spatially-varying clear-sky CO_2 forcing", Journal of Climate, 2021.
3. Modèle MODTRAN, https ://climatemodels.uchicago.edu/modtran, Université de Chicago.
