



Modélisation simplifiée de l'effet de serre

Un modèle basé sur le concept d'altitude d'émission

Mathieu MAGUET

Laboratoire de Météorologie Dynamique

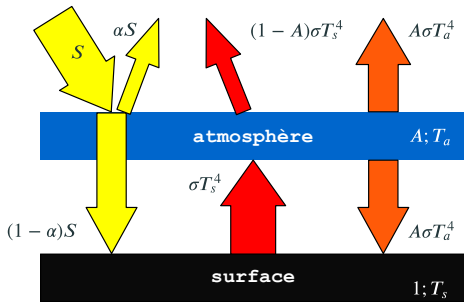
Équipe Étude et Modélisation du Climat et du Changement Climatique

Encadrant : Jean-Louis DUFRESNE

1. Effet de serre atmosphérique
2. Réalisation du modèle
3. Validité du modèle
4. Conclusion

1. Effet de serre atmosphérique
 - 1.1 Une première modélisation
 - 1.2 Altitude d'émission
2. Réalisation du modèle
3. Validité du modèle
4. Conclusion

Effet de serre atmosphérique : Une première modélisation



$$2\sigma_s^4 = \sigma_a^4$$

$$\sigma_s^4 = \sigma_a^4 + (1 - \alpha)$$

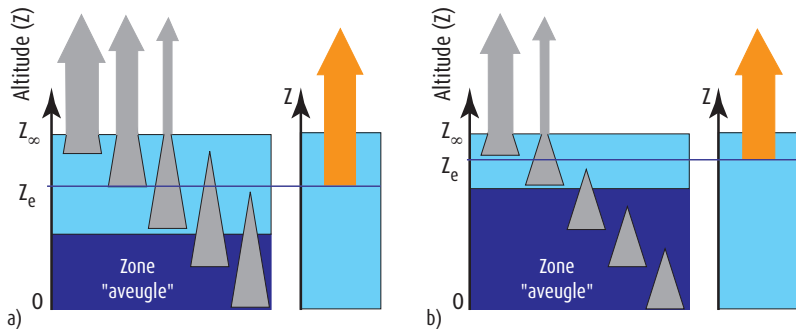
soit

$$\sigma_s^4 = \frac{(1 - \alpha)}{1 - \frac{1}{2}}$$

Modélisation de l'effet de serre par une atmosphère isotherme

- Albédo α : rapport du rayonnement réfléchi au rayonnement incident (0,31 pour le flux solaire)
- Absorptivité : rapport du flux radiatif absorbé au flux incident (0,90 pour le flux infrarouge émis par la surface)
- Émissivité = Absorptivité

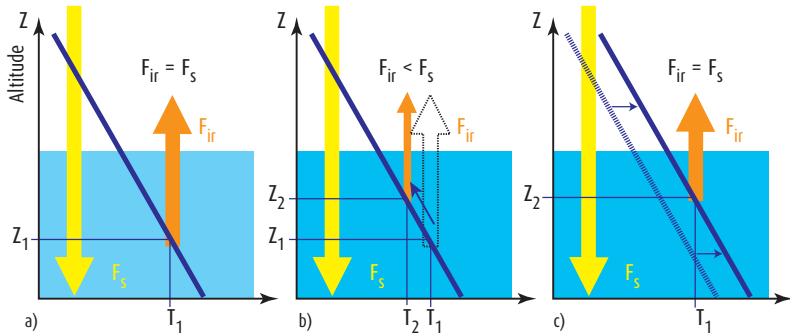
Effet de serre atmosphérique : Altitude d'émission



Définition de l'altitude d'émission [3]

Altitude d'émission : altitude moyenne à laquelle le rayonnement atteignant l'espace a été émis.

Effet de serre atmosphérique : Altitude d'émission



Définition de la température d'émission [3]

Forçage radiatif : $\dot{u}_o = o - o$

1. Effet de serre atmosphérique
2. Réalisation du modèle
 - 2.1 Méthode
 - 2.2 Modélisation de l'effet du ; a_{\downarrow}
 - 2.3 Modélisation de l'effet de la vapeur d'eau
 - 2.4 Combinaison des effets du ; a_{\downarrow} et de la vapeur d'eau
3. Validité du modèle
4. Conclusion

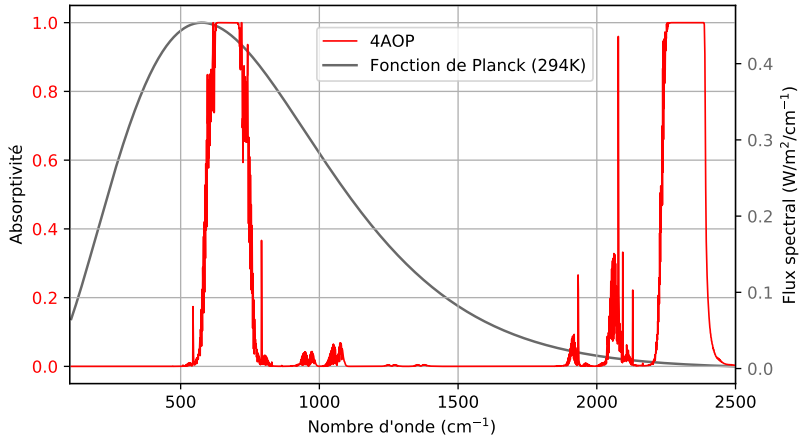
- Modèle de référence 4AOP [1] : spectres d'absorptivité et de flux sortant

- Modèle de référence 4AOP [1] : spectres d'absorptivité et de flux sortant
- Mise en place d'un modèle conceptuel reposant sur l'altitude d'émission

- Modèle de référence 4AOP [1] : spectres d'absorptivité et de flux sortant
- Mise en place d'un modèle conceptuel reposant sur l'altitude d'émission
- Ajustements sur les grandeurs nécessaires pour le modèle

- Modèle de référence 4AOP [1] : spectres d'absorptivité et de flux sortant
- Mise en place d'un modèle conceptuel reposant sur l'altitude d'émission
- Ajustements sur les grandeurs nécessaires pour le modèle
- Hypothèses de travail :
 - Surface : corps noir à
 - Seulement ; a_{\downarrow} et vapeur d'eau ; pas de nuages
 - Seulement l'effet de la troposphère

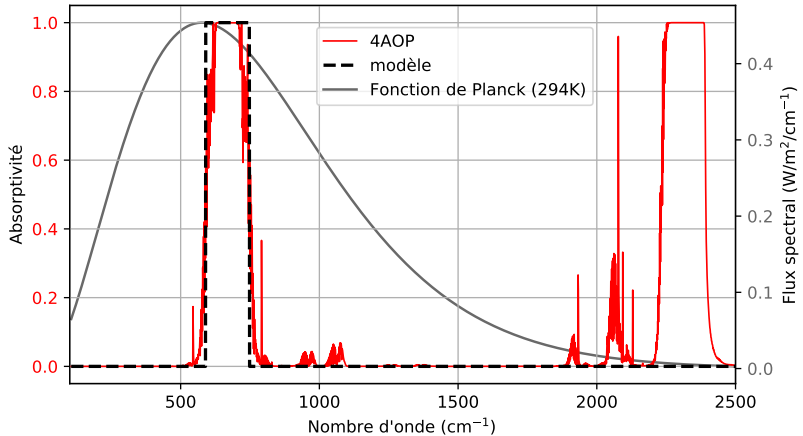
Réalisation du modèle : Modélisation de l'effet du ; a |



Absorptivité spectrale du ; a | à la concentration 300 ppmv

Nombre d'onde : $\nu = \frac{1}{\lambda} = -$

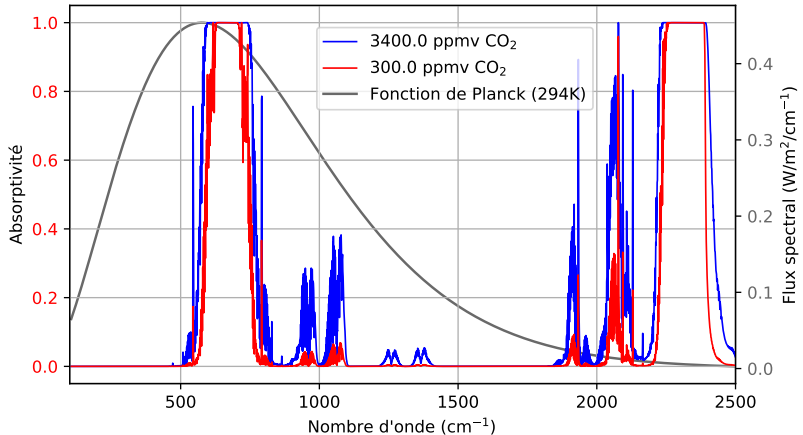
Réalisation du modèle : Modélisation de l'effet du ; a |



Absorptivité spectrale du ; a | à la concentration 300 ppmv

Nombre d'onde : $\nu = \frac{1}{\lambda} = -$

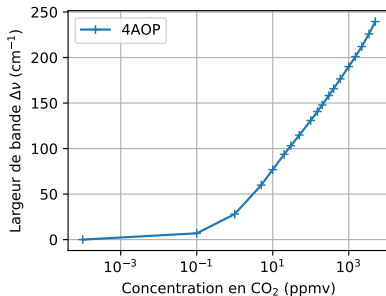
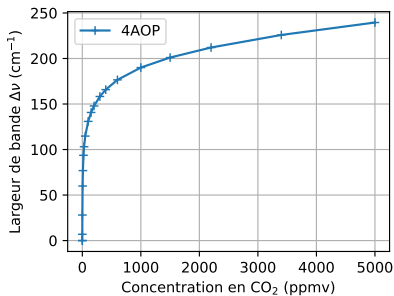
Réalisation du modèle : Modélisation de l'effet du ; a |



Absorptivité spectrale du ; a | aux concentrations 300 et 3400 ppmv

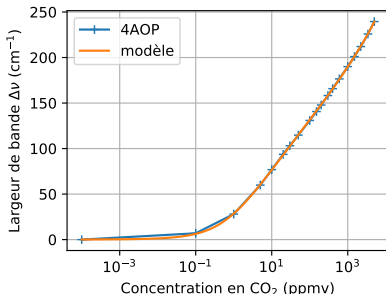
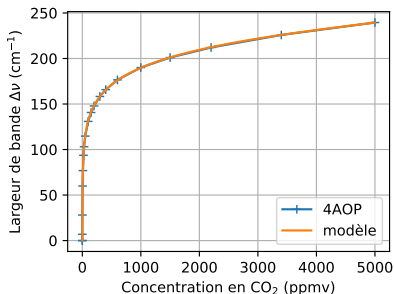
Nombre d'onde : $\nu = \frac{1}{\lambda} = -$

Réalisation du modèle : Modélisation de l'effet du ; a |



Largeur de bande $\Delta\nu$ en fonction de la concentration en ; a |

Réalisation du modèle : Modélisation de l'effet du ; a |



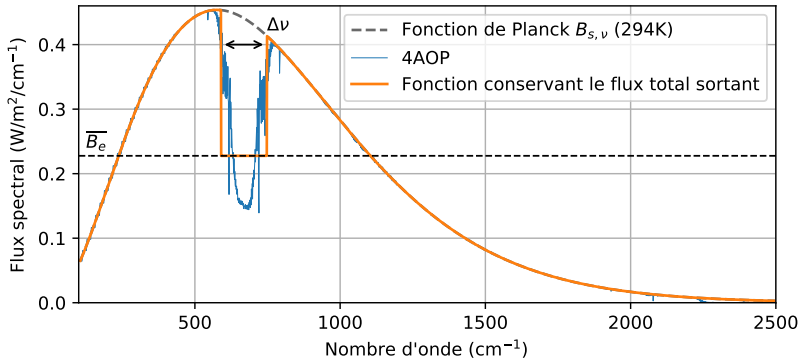
Largeur de bande $\Delta\nu$ en fonction de la concentration en ; a |

Fonction d'ajustement :

$$\Delta\nu = \alpha \left(1 - \frac{\beta}{\gamma + \delta\sqrt{c}}\right) + \beta \log(\gamma + \delta\sqrt{c} + 1)$$

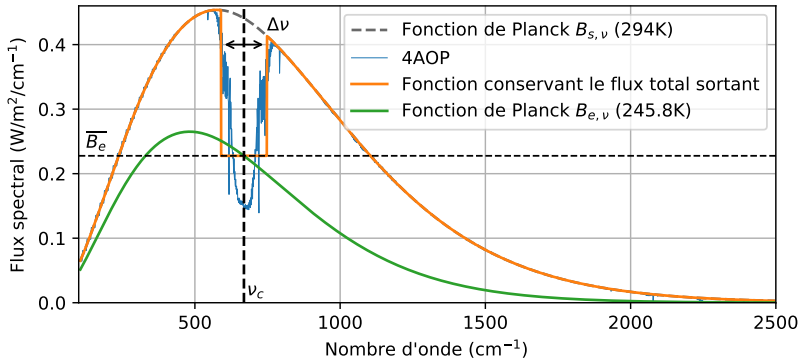
: concentration en ; a |

Réalisation du modèle : Modélisation de l'effet du ; a_l



Détermination de la température d'émission pour une concentration en ; a_l de 300 ppmv

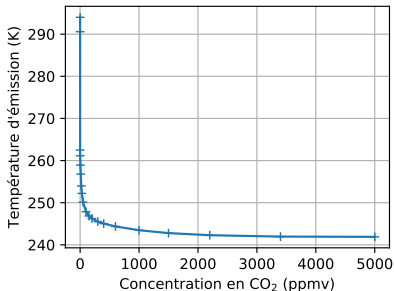
Réalisation du modèle : Modélisation de l'effet du ; a_l



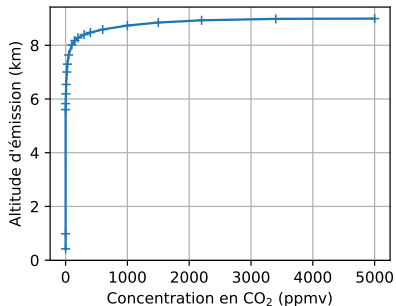
Détermination de la température d'émission pour une concentration en ; a_l de 300 ppmv

$$= \frac{\nu}{4} \frac{1}{\ln \left(1 + \frac{2\pi^2 \nu^3}{4} \right)}$$

Réalisation du modèle : Modélisation de l'effet du ; a |

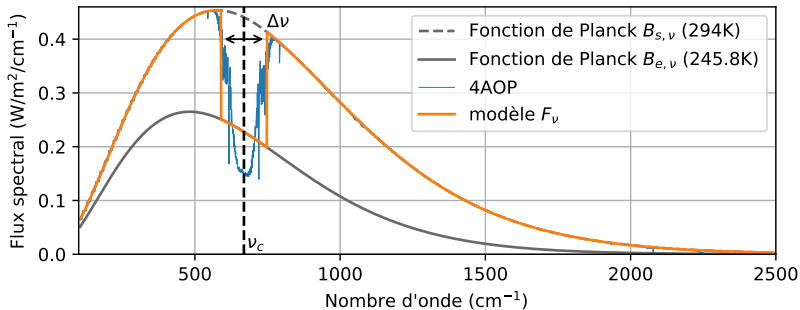


Température d'émission en fonction de la concentration en ; a |



Altitude d'émission en fonction de la concentration en ; a |

Réalisation du modèle : Modélisation de l'effet du ; a |

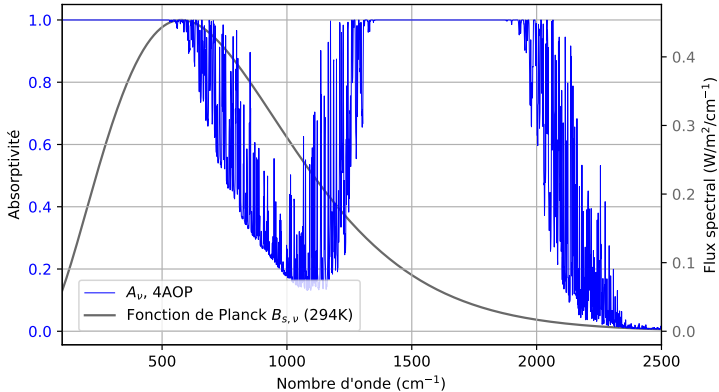


Flux spectral sortant de l'atmosphère avec une concentration en ; a | de 300 ppmv

$$Q_{a_i} = \int_Z (4_{,\nu}(1 - \nu) + 4_{,\nu} \nu) \nu$$

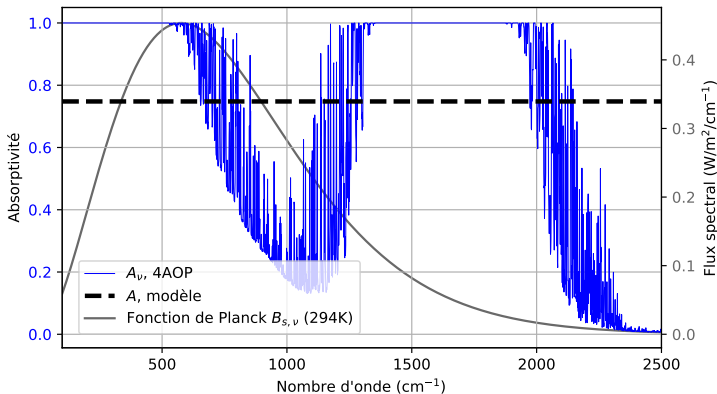
$$= \int_{\nu \in [\nu - \nu/2; \nu + \nu/2]} 4_{,\nu} \nu + \int_{\nu \notin [\nu - \nu/2; \nu + \nu/2]} 4_{,\nu} \nu$$

Réalisation du modèle : Modélisation de l'effet de la vapeur d'eau



Absorptivité de la distribution standard en vapeur d'eau

Réalisation du modèle : Modélisation de l'effet de la vapeur d'eau



Absorptivité de la distribution standard en vapeur d'eau

$$= \frac{4_{,\nu} \nu \nu}{4} \text{ où } 4 = 4_{,\nu} \nu$$

Réalisation du modèle : Modélisation de l'effet de la vapeur d'eau

$$\begin{aligned} Z \\ \alpha_{0|a} &= (4_{,\nu}(1 - \nu) + 4_{,\nu} \nu) \nu \\ &= 4(1 -) + 4 \end{aligned}$$

Réalisation du modèle : Modélisation de l'effet de la vapeur d'eau

$$\begin{aligned} \alpha_{|a} &= (4_{,\nu}(1 - \nu) + 4_{,\nu} \nu) \nu \\ &= 4(1 -) + 4 \end{aligned}$$

soit

$$\begin{aligned} 4 &= \frac{\alpha_{|a} - 4(1 -)}{\nu} \\ &= \frac{4}{\sigma} \end{aligned}$$

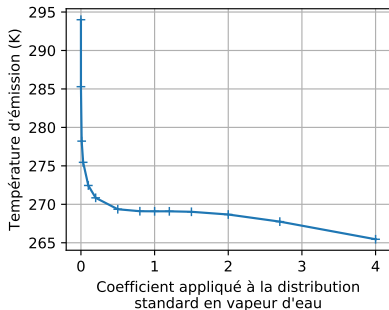
Réalisation du modèle : Modélisation de l'effet de la vapeur d'eau

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{a}} &= \frac{Z}{4} (4_{,\nu}(1 - \nu) + 4_{,\nu} \nu) \nu \\ &= 4 (1 - \nu) + 4 \nu \end{aligned}$$

soit

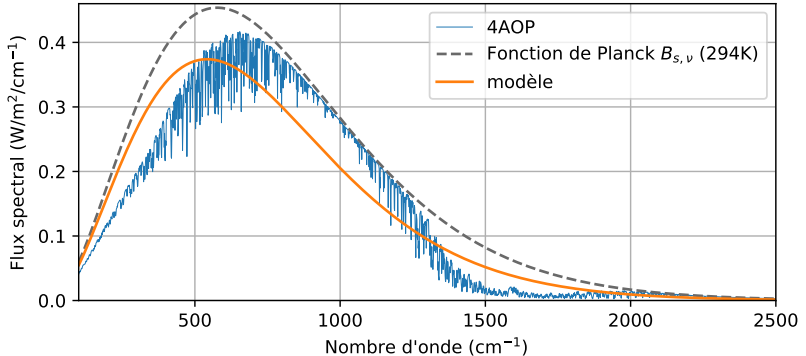
$$4 = \frac{\alpha_{\text{a}} - 4 (1 - \nu)}{\nu}$$

$$= \frac{r}{\sigma} \frac{4}{\sigma}$$



Température d'émission en fonction de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère

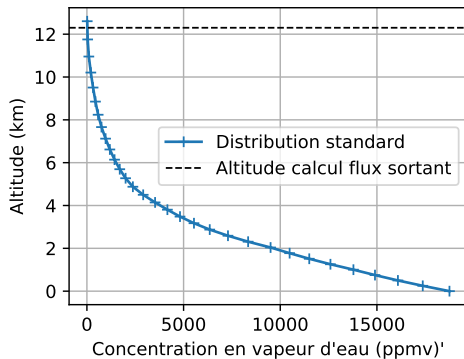
Réalisation du modèle : Modélisation de l'effet de la vapeur d'eau



Flux spectral sortant de l'atmosphère avec la distribution standard en vapeur d'eau

$$\alpha_{0|a,\nu} = 4_{,\nu}(1 -) + 4_{,\nu}$$

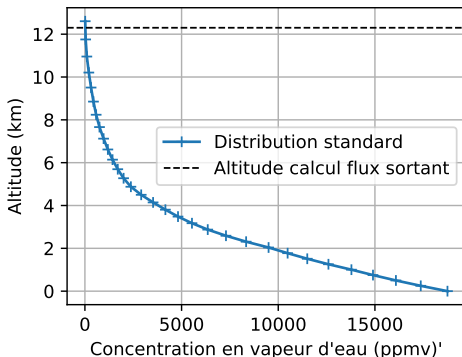
Réalisation du modèle : Combinaison des effets du ; a_1 et de la vapeur d'eau



Distribution verticale du ; a_1 uniforme

Distribution verticale standard en vapeur d'eau

Réalisation du modèle : Combinaison des effets du ; a_1 et de la vapeur d'eau

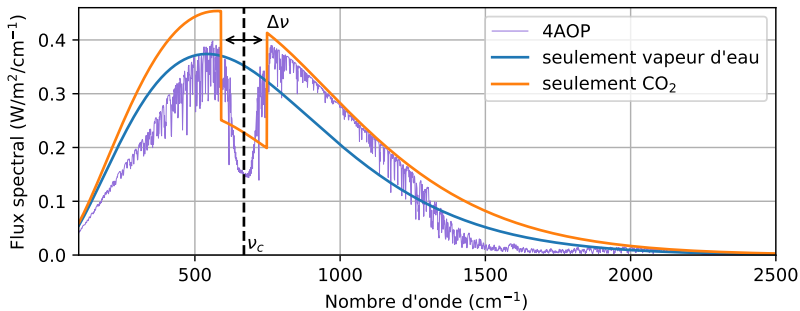


Distribution verticale du ; a_1 uniforme

Distribution verticale standard en vapeur d'eau

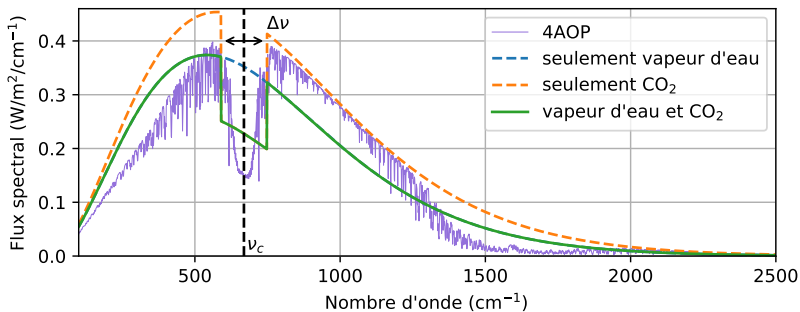
Hypothèse : l'intégralité de la vapeur d'eau est considérée comme «en dessous» du ; a_1

Réalisation du modèle : Combinaison des effets du ; a_{\parallel} et de la vapeur d'eau



Flux sortant de l'atmosphère

Réalisation du modèle : Combinaison des effets du ; a_l et de la vapeur d'eau

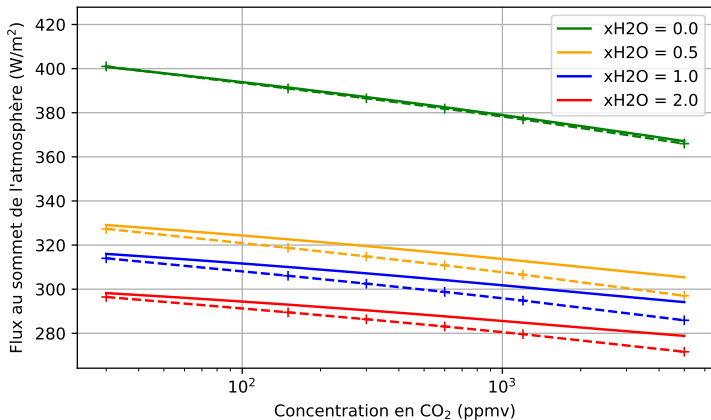


Flux sortant de l'atmosphère

$$\begin{aligned}
 O &= \int_{Z_0}^Z (4_{,\nu}(1 - \nu) + 4_{,\nu} \nu) \nu \\
 &= \int_{\nu \in [\nu - \nu/2; \nu + \nu/2]} 4_{,; a_l, \nu} \nu + \int_{\nu \notin [\nu - \nu/2; \nu + \nu/2]} \infty_{|a_l, \nu} \nu
 \end{aligned}$$

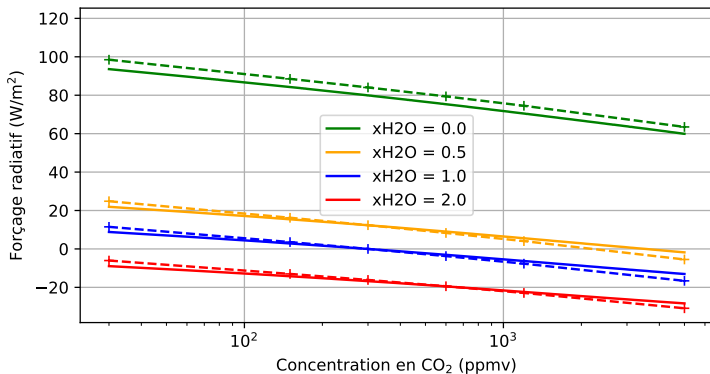
1. Effet de serre atmosphérique
2. Réalisation du modèle
3. Validité du modèle
 - 3.1 Flux sortant au sommet de l'atmosphère
 - 3.2 Forçage radiatif instantané
4. Conclusion

Validité du modèle : Flux sortant au sommet de l'atmosphère



Flux total sortant au sommet de l'atmosphère en fonction de la concentration en ; a_1 pour différentes quantités de vapeur d'eau ; 4AOP en pointillés, modèle en continu

Validité du modèle : Forçage radiatif instantané



Forçage radiatif en fonction de la concentration en ; a_1 pour différentes quantités de vapeur d'eau (référence : 300 ppmv ; a_1 , distribution standard en vapeur d'eau); 4AOP en pointillés, modèle en continu

$$\text{Forçage radiatif} = Q_{\text{sortant}} - Q_{\text{sortant,réf}}$$

1. Effet de serre atmosphérique
2. Réalisation du modèle
3. Validité du modèle
4. Conclusion

- Modèle simple ayant un bon comportement qualitatif et donnant de bons ordre de grandeur de flux au sommet de l'atmosphère et de forçage radiatif

Conclusion

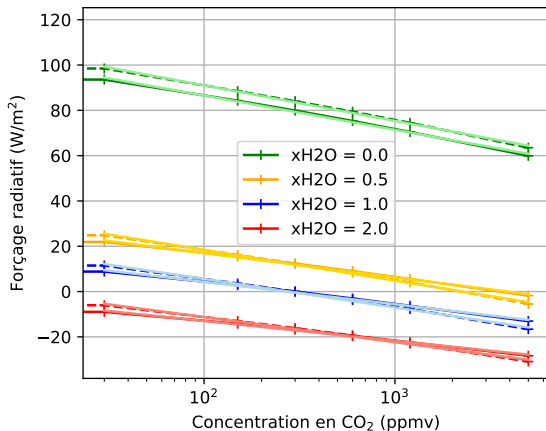
- Modèle simple ayant un bon comportement qualitatif et donnant de bons ordre de grandeur de flux au sommet de l'atmosphère et de forçage radiatif
- Erreur faible sur le forçage radiatif pour la vapeur d'eau et le ; α_1 seuls

- Modèle simple ayant un bon comportement qualitatif et donnant de bons ordre de grandeur de flux au sommet de l'atmosphère et de forçage radiatif
- Erreur faible sur le forçage radiatif pour la vapeur d'eau et le ; a_1 seuls
- Méthode de combinaison des effets de la vapeur d'eau et du ; a_1 à améliorer

Remerciements

Coefficient donnant le forçage radiatif

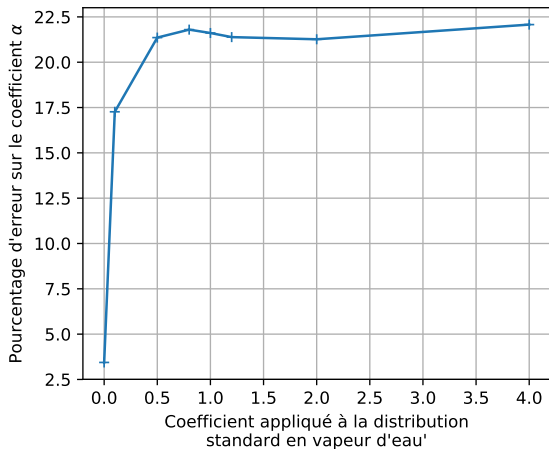
$$\dot{u}_O = \alpha \log \frac{\dot{u}_O}{\dot{u}_O}$$



Forçage radiatif et régression linéaire en fonction de la concentration en ; α en échelle logarithmique

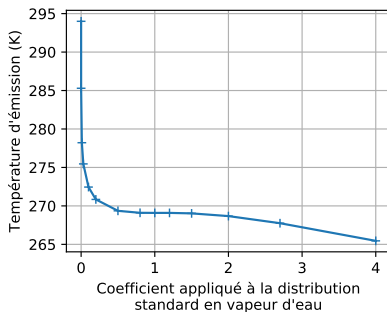
Coefficient donnant le forçage radiatif

$$\dot{u}_0 = \alpha \log \frac{\cdot}{;0}$$

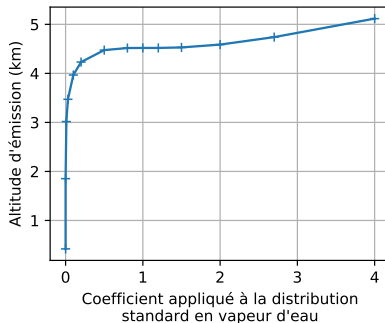


Erreur sur le coefficient α en fonction du coefficient appliqué à la distribution standard en vapeur d'eau

Altitude d'émission de la vapeur d'eau



Température d'émission en fonction de la quantité de vapeur d'eau



Altitude d'émission en fonction de la quantité de vapeur d'eau

Détermination du centre de la bande d'absorption du ; a |

$$\nu = \frac{R}{4} \frac{\nu_1 \nu_2 \nu_3}{\nu_4 \nu_5 \nu_6}$$

Détermination de la largeur de la bande d'absorption du ; a |

$$\Delta\nu \cdot 4_{,\nu} = \frac{Z}{4_{,\nu} \nu \nu}$$

soit

$$\Delta\nu = \frac{R}{4_{,\nu} \nu \nu}$$

Détermination de la température d'émission du ; a |

$$0 = \frac{Z}{4, \nu} (1 - \nu) + \frac{Z}{4, \nu} \nu - \frac{Z}{4, \nu} \nu + \frac{Z}{4, \nu} \nu$$

$$0 = 4 + (4, \nu - 4, \nu) \Delta \nu$$

$$4, \nu = 4, \nu + \frac{0 - 4}{\Delta \nu}$$

$$= \frac{\nu}{4 \ln 1 + \frac{2\pi^2 \nu^3}{4, \nu}}$$

$$4_{\nu} = 2\pi \cdot 2\nu^3 \frac{1}{\exp \frac{\nu}{4} - 1}$$

Loi de Stefan-Boltzmann

$$O = \sigma T^4$$

avec $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

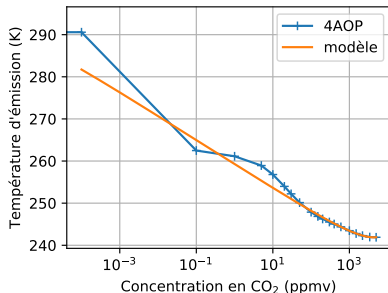
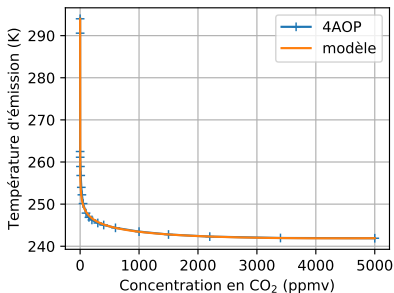
Calcul du flux total sortant de l'atmosphère

$$O = \int_{\nu \in [\nu - \nu/2; \nu + \nu/2]} Z_{a, \nu} d\nu + \int_{\nu \notin [\nu - \nu/2; \nu + \nu/2]} Z_{o, a, \nu} d\nu$$

où

$$Z_{o, a, \nu} = 4_{, \nu} (1 - \tau_{, \nu}) + 4_{, o, a, \nu}$$

Ajustement sur la température d'émission du ; a |

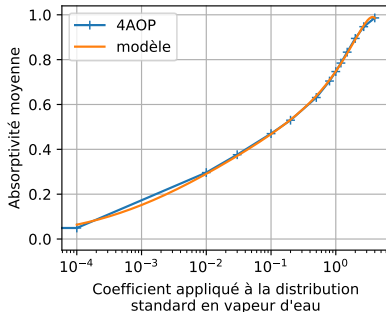
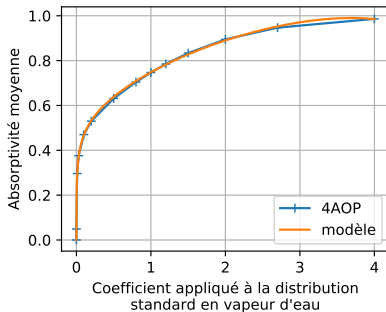


Température d'émission en fonction de la concentration en ; a |

Fonction d'ajustement : $T = -\beta \log(\gamma + \delta\sqrt{C})$

: concentration en ; a |

Ajustement sur l'absorptivité moyenne de la vapeur d'eau



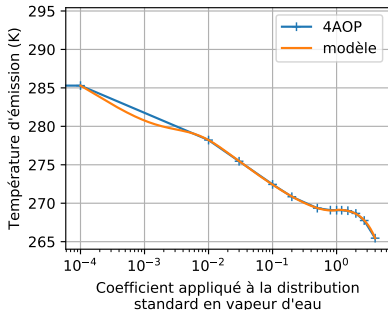
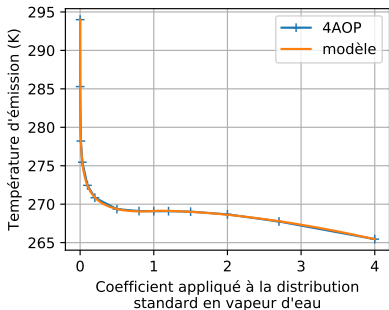
Absorptivité moyenne en fonction du coefficient appliqué à la distribution standard en vapeur d'eau

Fonction d'ajustement :

$$= \frac{1}{\alpha} (1 - \exp(-\alpha x)) + \beta \log(\gamma + \delta \sqrt{x} + 1)$$

x : coefficient appliqué à la distribution standard en vapeur d'eau

Ajustement sur la température d'émission de la vapeur d'eau



Température d'émission en fonction du coefficient appliqué à la distribution standard en vapeur d'eau

$$= () = - \int (1 - \exp(-\alpha)) - \beta \log(\gamma + \delta\sqrt{\quad} + 1) \text{ si } \in [0, 0]$$

$$= (0) - (- 0)^\kappa \text{ sinon}$$

: coefficient appliqué à la distribution standard en vapeur d'eau

- [1] F. Cheruy, N. Scott, R. Armante, B. Tournier, and A. Chedin. Contribution to the development of radiative transfer models for high spectral resolution observations in the infrared. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 53(6):597 – 611, 1995.
- [2] J.-L. Dufresne, V. Eymet, C. Crévoisier, and J.-Y. Grandpeix. Greenhouse effect : the relative contributions of emission height and total absorption. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, in rev.
- [3] J.-L. Dufresne and J. Treiner. L'effet de serre atmosphérique : plus subtil qu'on ne le croit! *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 72:31–41, 2011.

- [4] R. T. Pierrehumbert. Infrared radiation and planetary temperature. *ò*, 64 :33–38, 2011.
- [5] W. Zhong and J. D. Haigh. The greenhouse effect and carbon dioxide. , 68(4) :100–105, 2013.