



# Modélisation simplifiée de l'effet de serre

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

---

Mathieu MAGUET

Laboratoire de Météorologie Dynamique

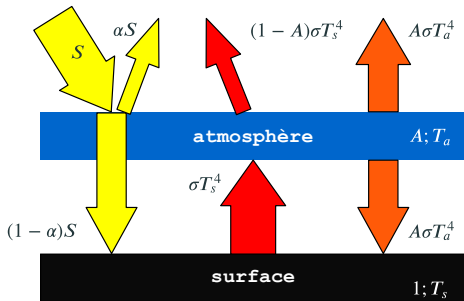
Équipe Étude et Modélisation du Climat et du Changement Climatique

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



$$2\sigma T_a^4 = \sigma T_s^4$$

$$\sigma T_s^4 = A\sigma T_a^4 + (1 - \alpha)S$$

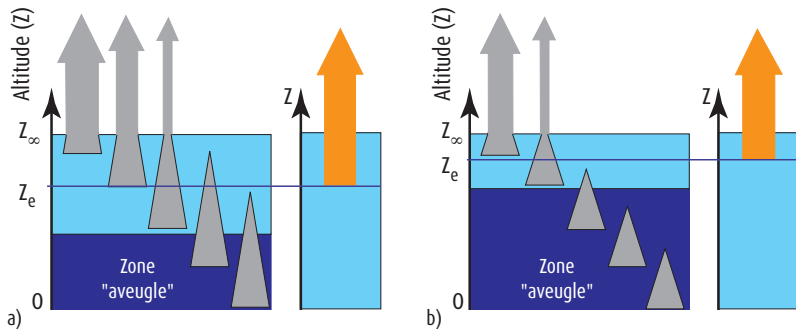
soit

$$\sigma T_s^4 = \frac{(1 - \alpha)S}{1 - A/2}$$

Modélisation de l'effet de serre par une atmosphère isotherme

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

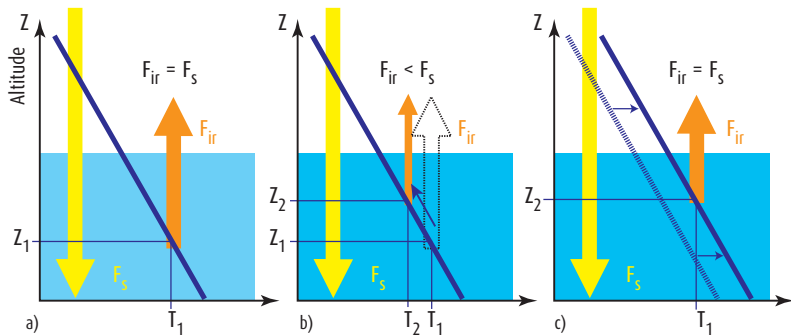
# Effet de serre atmosphérique : Altitude d'émission



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 :  $RF = F_{ir} - F_S$

1. Effet de serre atmosphérique
2. Réalisation du modèle
  - 2.1 Méthode
  - 2.2 Modélisation de l'effet du  $\text{CO}_2$
  - 2.3 Modélisation de l'effet de la vapeur d'eau
  - 2.4 Combinaison des effets du  $\text{CO}_2$  et de la vapeur d'eau
3. Validité du modèle
4. Conclusion

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

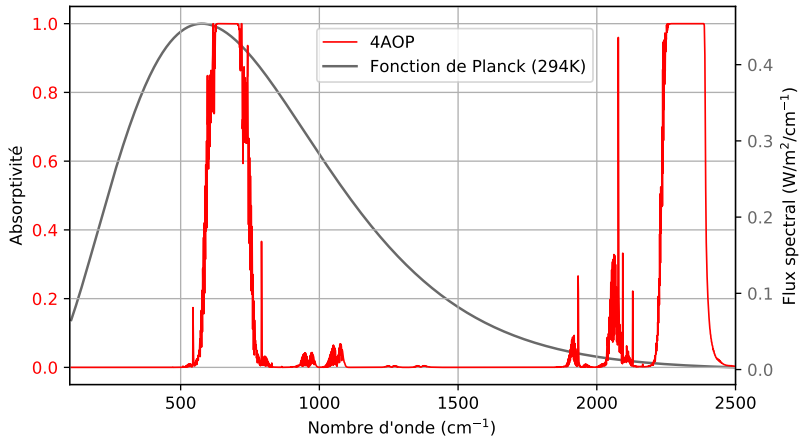


- Modèle de référence 4AOP [1] : spectres d'absorptivité et de flux sortant
- Mise en place d'un modèle conceptuel reposant sur l'altitude d'émission

- 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  $T_s$
  - Seulement  $\text{CO}_2$  et vapeur d'eau ; pas de nuages
  - Seulement l'effet de la troposphère

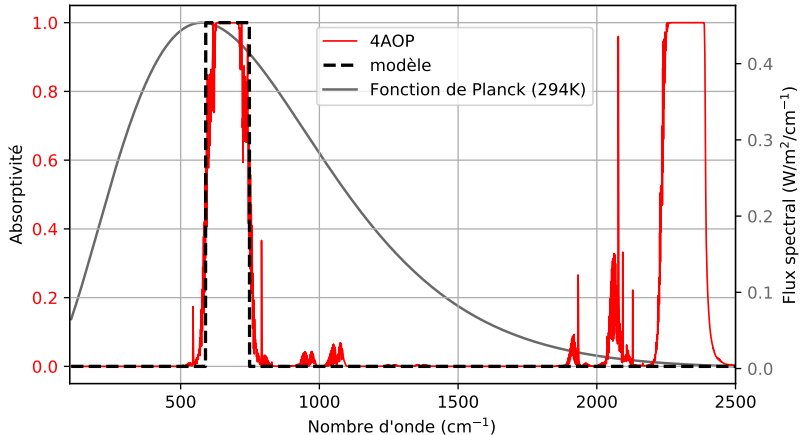
# Réalisation du modèle : Modélisation de l'effet du CO<sub>2</sub>



Absorptivité spectrale du CO<sub>2</sub> à la concentration 300 ppmv

$$\text{Nombre d'onde} : \nu = \frac{1}{\lambda} = \frac{f}{c}$$

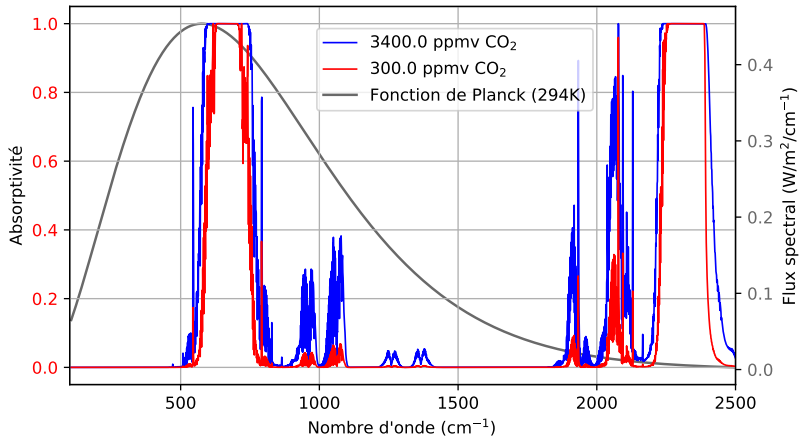
# Réalisation du modèle : Modélisation de l'effet du CO<sub>2</sub>



Absorptivité spectrale du CO<sub>2</sub> à la concentration 300 ppmv

$$\text{Nombre d'onde} : \nu = \frac{1}{\lambda} = \frac{f}{c}$$

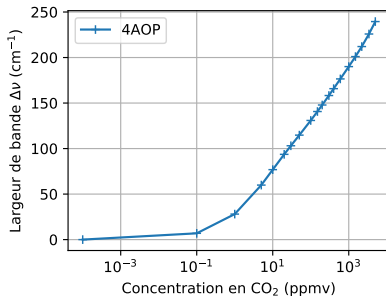
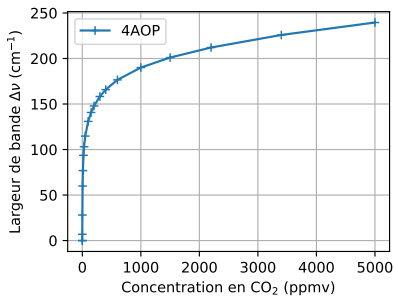
# Réalisation du modèle : Modélisation de l'effet du CO<sub>2</sub>



Absorptivité spectrale du CO<sub>2</sub> aux concentrations 300 et 3400 ppmv

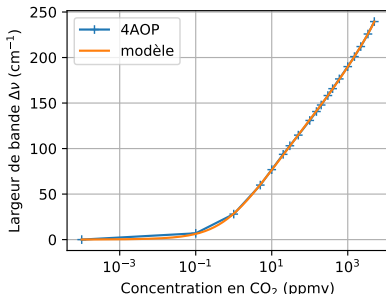
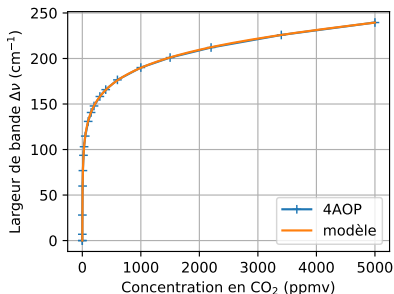
Nombre d'onde :  $\nu = \frac{1}{\lambda} = \frac{f}{c}$

# Réalisation du modèle : Modélisation de l'effet du CO<sub>2</sub>



Largeur de bande  $\Delta\nu$  en fonction de la concentration en CO<sub>2</sub>

# Réalisation du modèle : Modélisation de l'effet du CO<sub>2</sub>



Largeur de bande  $\Delta\nu$  en fonction de la concentration en CO<sub>2</sub>

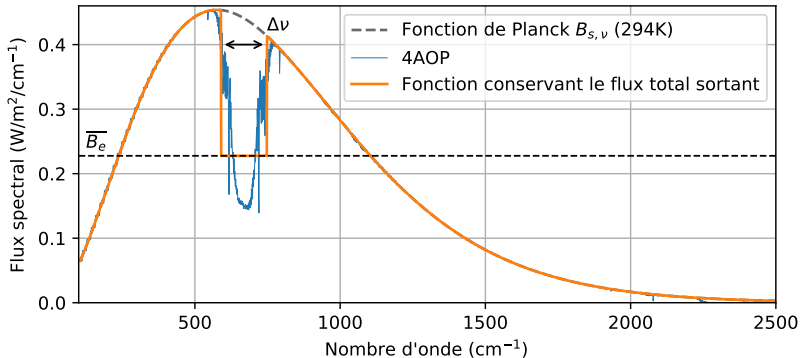
Fonction d'ajustement :

$$\Delta\nu = K(1 - e^{-\alpha x - \omega\sqrt{x}}) + \beta \log(\gamma x + \delta\sqrt{x} + 1)$$

$x$  : concentration en CO<sub>2</sub>

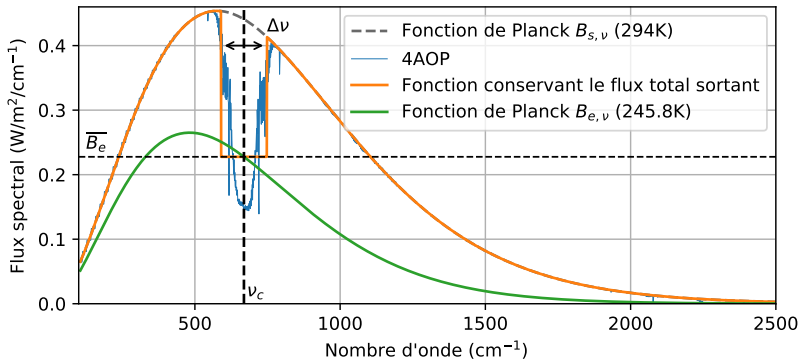


# Réalisation du modèle : Modélisation de l'effet du CO<sub>2</sub>



Détermination de la température d'émission pour une concentration en CO<sub>2</sub> de 300 ppmv

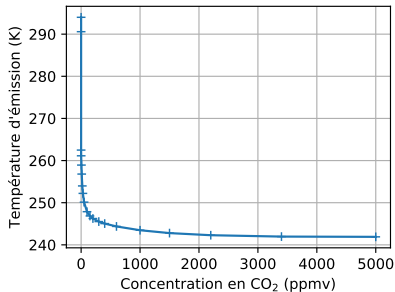
# Réalisation du modèle : Modélisation de l'effet du CO<sub>2</sub>



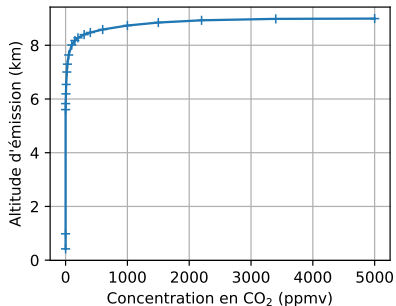
Détermination de la température d'émission pour une concentration en CO<sub>2</sub> de 300 ppmv

$$T_e = \frac{hc\nu_c}{k_B} \frac{1}{\ln\left(1 + \frac{2\pi hc^2 \nu_c^3}{\overline{B_e}}\right)}$$

# Réalisation du modèle : Modélisation de l'effet du CO<sub>2</sub>

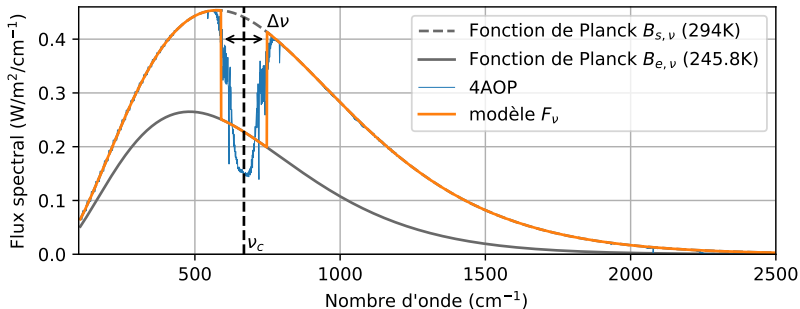


Température d'émission en fonction de la concentration en CO<sub>2</sub>



Altitude d'émission en fonction de la concentration en CO<sub>2</sub>

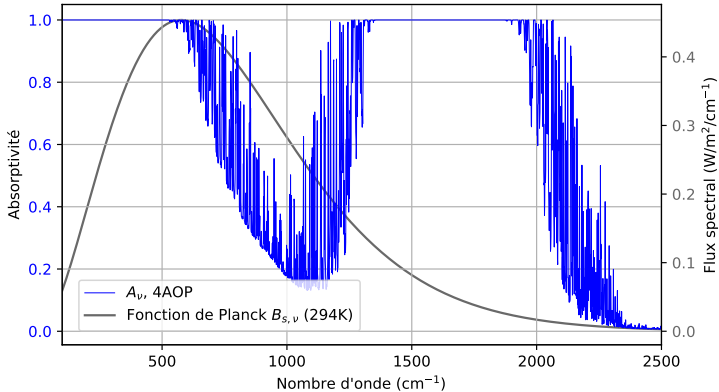
# Réalisation du modèle : Modélisation de l'effet du CO<sub>2</sub>



Flux spectral sortant de l'atmosphère avec une concentration en CO<sub>2</sub> de 300 ppmv

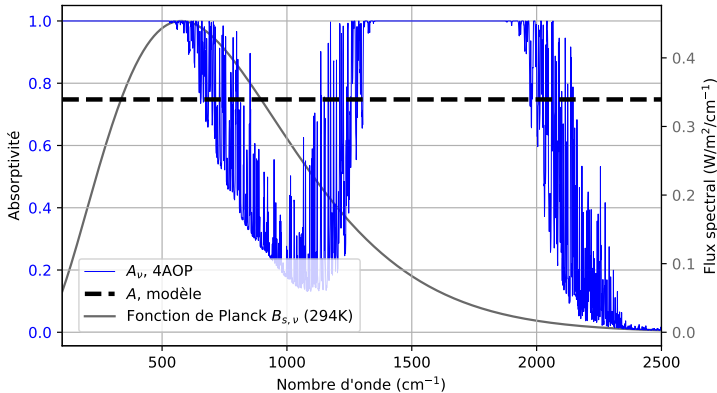
$$\begin{aligned} F_{\text{CO}_2} &= \int (B_{s,\nu}(1 - A_\nu) + B_{e,\nu}A_\nu) d\nu \\ &= \int_{\nu \in [\nu_c - \Delta\nu/2; \nu_c + \Delta\nu/2]} B_{e,\nu} d\nu + \int_{\nu \notin [\nu_c - \Delta\nu/2; \nu_c + \Delta\nu/2]} B_{s,\nu} d\nu \end{aligned}$$

# 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

$$A = \frac{\int B_{s,\nu} A_\nu d\nu}{B_s} \quad \text{où} \quad B_s = \int B_{s,\nu} d\nu$$

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

$$\begin{aligned}F_{\text{H}_2\text{O}} &= \int (B_{s,\nu}(1 - A_\nu) + B_{e,\nu}A_\nu) d\nu \\ &= B_s(1 - A) + B_eA\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}F_{\text{H}_2\text{O}} &= \int (B_{s,\nu}(1 - A_\nu) + B_{e,\nu}A_\nu) d\nu \\ &= B_s(1 - A) + B_e A\end{aligned}$$

soit

$$B_e = \frac{F_{\text{H}_2\text{O}} - B_s(1 - A)}{A}$$

$$T_e = \sqrt[4]{\frac{B_e}{\sigma}}$$



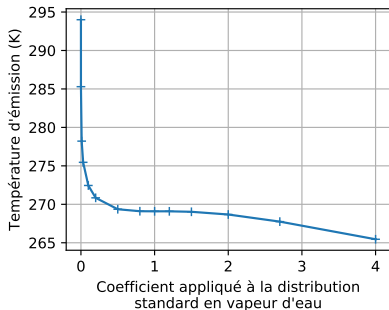
# Réalisation du modèle : Modélisation de l'effet de la vapeur d'eau

$$F_{\text{H}_2\text{O}} = \int (B_{s,\nu}(1 - A_\nu) + B_{e,\nu}A_\nu) d\nu$$
$$= B_s(1 - A) + B_e A$$

soit

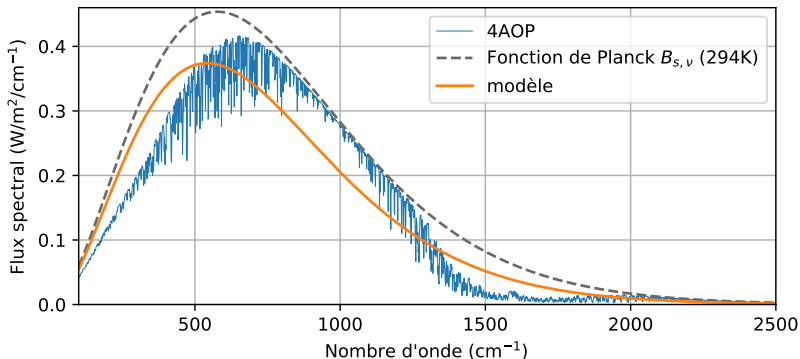
$$B_e = \frac{F_{\text{H}_2\text{O}} - B_s(1 - A)}{A}$$

$$T_e = \sqrt[4]{\frac{B_e}{\sigma}}$$



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

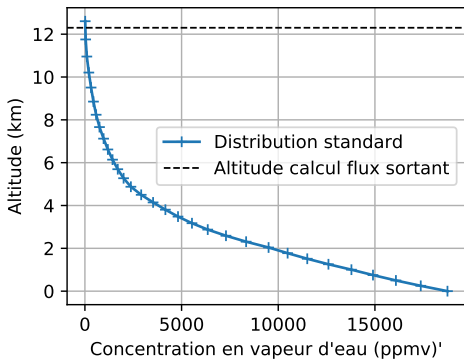
# Réalisation du modèle : Modélisation de l'effet de la vapeur d'eau



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

$$F_{\text{H}_2\text{O},\nu} = B_{s,\nu}(1 - A) + B_{e,\nu}A$$

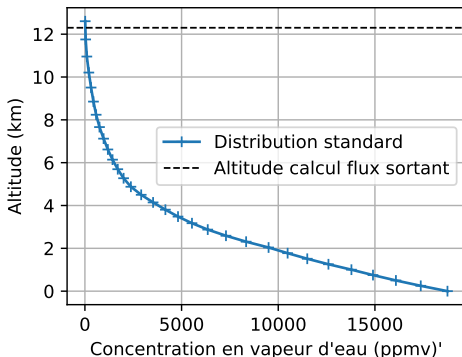
# Réalisation du modèle : Combinaison des effets du CO<sub>2</sub> et de la vapeur d'eau



Distribution verticale du  
CO<sub>2</sub> uniforme

Distribution verticale standard en vapeur  
d'eau

# Réalisation du modèle : Combinaison des effets du CO<sub>2</sub> et de la vapeur d'eau

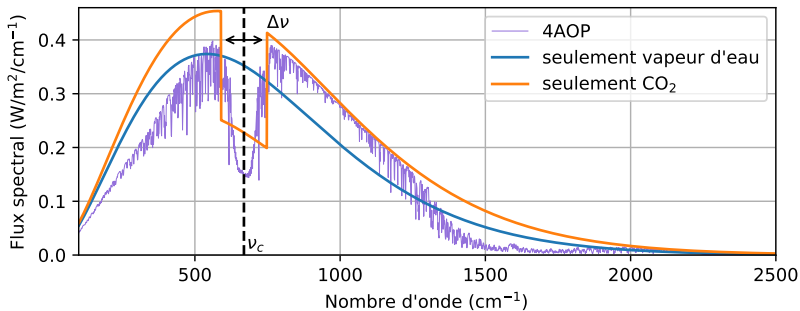


Distribution verticale du CO<sub>2</sub> uniforme

Distribution verticale standard en vapeur d'eau

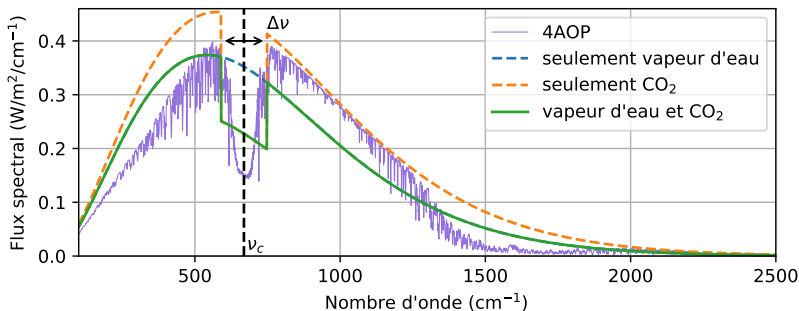
Hypothèse : l'intégralité de la vapeur d'eau est considérée comme «en dessous» du CO<sub>2</sub>

# Réalisation du modèle : Combinaison des effets du CO<sub>2</sub> et de la vapeur d'eau



Flux sortant de l'atmosphère

# Réalisation du modèle : Combinaison des effets du CO<sub>2</sub> et de la vapeur d'eau

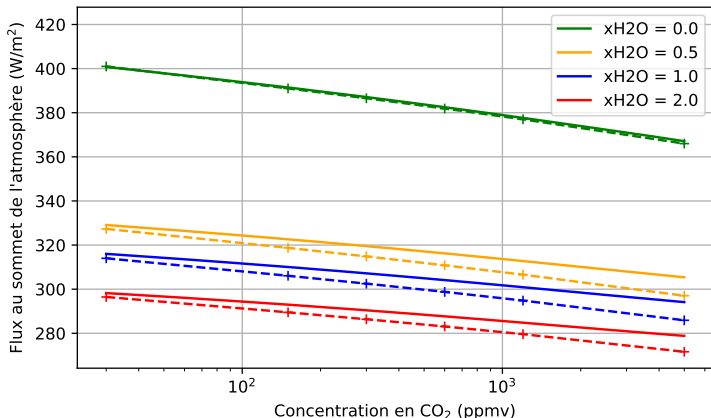


Flux sortant de l'atmosphère

$$F = \int (B_{s,\nu}(1 - A_\nu) + B_{e,\nu}A_\nu) d\nu$$
$$= \int_{\nu \in [\nu_c - \Delta\nu/2; \nu_c + \Delta\nu/2]} B_{e,\text{CO}_2,\nu} d\nu + \int_{\nu \notin [\nu_c - \Delta\nu/2; \nu_c + \Delta\nu/2]} F_{\text{H}_2\text{O},\nu} d\nu$$

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

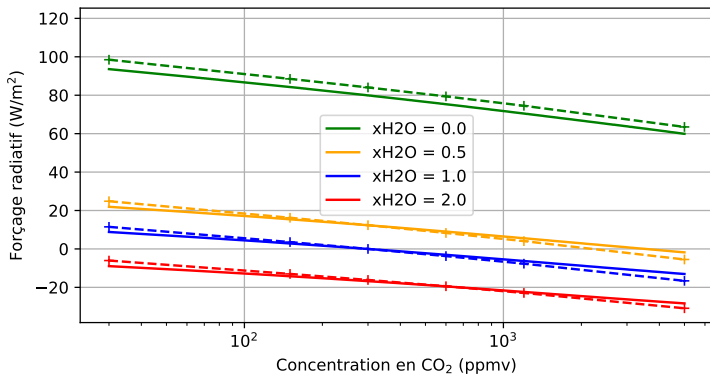
# Validité du modèle : Flux sortant au sommet de l'atmosphère



Flux total sortant au sommet de l'atmosphère en fonction de la concentration en CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> pour différentes quantités de vapeur d'eau (référence : 300 ppmv CO<sub>2</sub>, distribution standard en vapeur d'eau); 4AOP en pointillés, modèle en continu

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

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

# 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

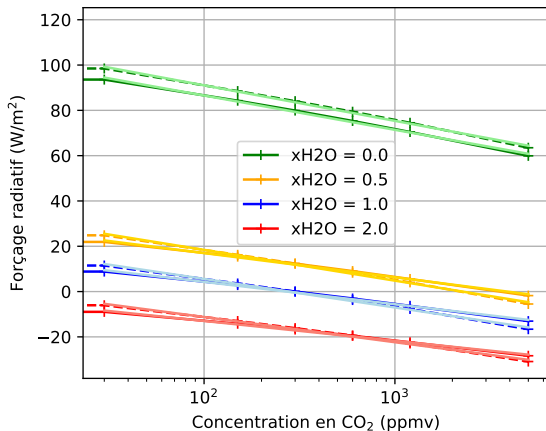
- Modèle simple ayant un bon comportement qualitatif et donnant de bons ordre de grandeur de flux au sommet de l'atmosphère et de forçage radiatif
- Erreur faible sur le forçage radiatif pour la vapeur d'eau et le CO<sub>2</sub> seuls

- 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 CO<sub>2</sub> seuls
- Méthode de combinaison des effets de la vapeur d'eau et du CO<sub>2</sub> à améliorer

# Remerciements

# Coefficient donnant le forçage radiatif

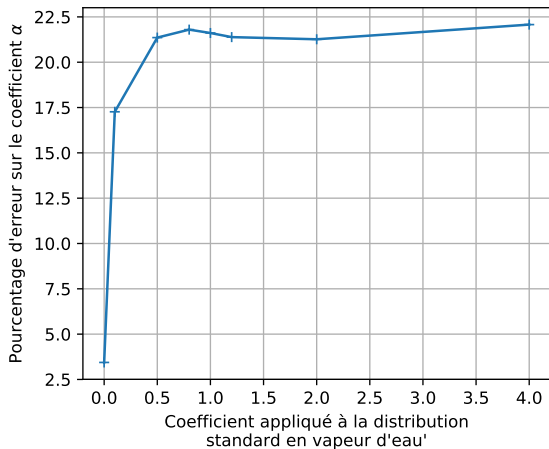
$$RF = \alpha \log \left( \frac{C}{C_0} \right)$$



Forçage radiatif et régression linéaire en fonction de la concentration en CO<sub>2</sub> en échelle logarithmique

# Coefficient donnant le forçage radiatif

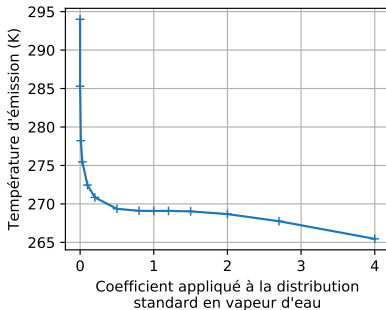
$$RF = \alpha \log \left( \frac{C}{C_0} \right)$$



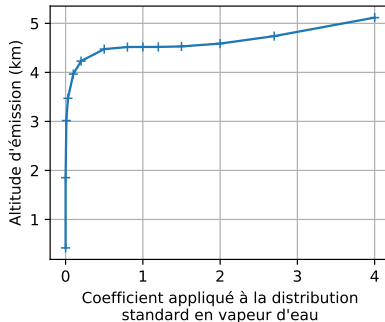
Erreur sur le coefficient  $\alpha$  en fonction du coefficient appliqué à la distribution standard en vapeur d'eau



# 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 CO<sub>2</sub>

$$\nu_c = \frac{\int \nu B_{s,\nu} A_\nu d\nu}{\int B_{s,\nu} A_\nu d\nu}$$

## Détermination de la largeur de la bande d'absorption du $\text{CO}_2$

$$\Delta\nu \cdot B_{S,\nu_c} = \int B_{S,\nu} A_\nu d\nu$$

soit

$$\Delta\nu = \frac{\int B_{S,\nu} A_\nu d\nu}{B_{S,\nu_c}}$$

## Détermination de la température d'émission du CO<sub>2</sub>

$$F = \int B_{S,\nu}(1-A_\nu)d\nu + \int B_{e,\nu}A_\nu d\nu = B_S - \int B_{S,\nu}A_\nu d\nu + \int B_{e,\nu}A_\nu d\nu$$

$$F = B_S + (B_{e,\nu_c} - B_{S,\nu_c})\Delta\nu$$

$$B_{e,\nu_c} = B_{S,\nu_c} + \frac{F - B_S}{\Delta\nu}$$

$$T_e = \frac{hc\nu_c}{k_B} \frac{1}{\ln\left(1 + \frac{2\pi hc^2\nu_c^3}{B_{e,\nu_c}}\right)}$$

$$B_\nu = 2\pi hc^2 \nu^3 \frac{1}{\exp\left(\frac{hc\nu}{k_B T}\right) - 1}$$

# Loi de Stefan-Boltzmann

$$F = \sigma T^4$$

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

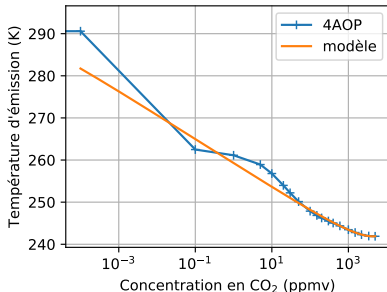
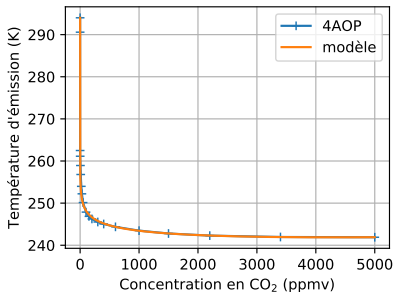
## Calcul du flux total sortant de l'atmosphère

$$F = \int_{\nu \in [\nu_c - \Delta\nu/2; \nu_c + \Delta\nu/2]} B_{e, \text{CO}_2, \nu} d\nu + \int_{\nu \notin [\nu_c - \Delta\nu/2; \nu_c + \Delta\nu/2]} F_{\text{H}_2\text{O}, \nu} d\nu$$

où

$$F_{\text{H}_2\text{O}, \nu} = B_{s, \nu}(1 - A) + B_{e, \text{H}_2\text{O}, \nu}A$$

# Ajustement sur la température d'émission du CO<sub>2</sub>



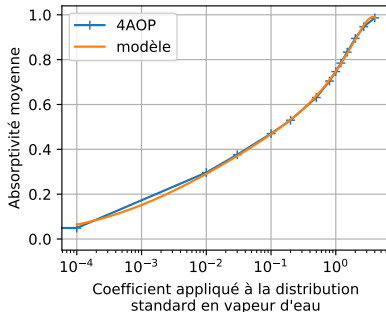
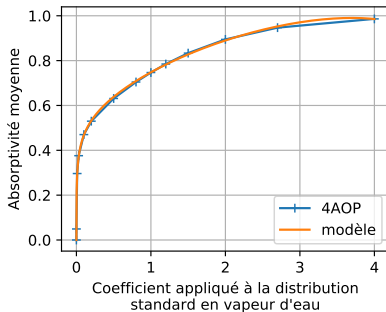
Température d'émission en fonction de la concentration en CO<sub>2</sub>

Fonction d'ajustement :  $T_e = T_s - \beta \log(\gamma x + \delta \sqrt{x})$

$x$  : concentration en CO<sub>2</sub>



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



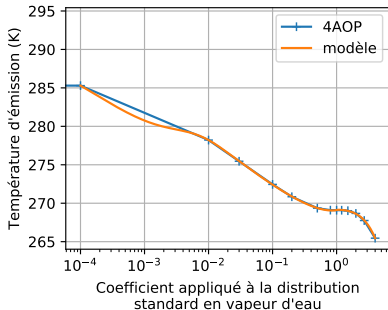
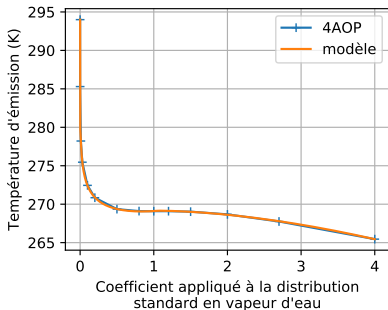
Absorptivité moyenne en fonction du coefficient appliqué à la distribution standard en vapeur d'eau

Fonction d'ajustement :

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

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

$$T_e = f(x) = T_s - K(1 - \exp(-\alpha x)) - \beta \log(\gamma x + \delta \sqrt{x} + 1) \text{ si } x \in [0, x_0]$$

$$T_e = f(x_0) - Z(x - x_0)^\kappa \text{ sinon}$$

$x$  : 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. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative 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. *Journal of Climate*, in rev.
- [3] J.-L. Dufresne and J. Treiner. L'effet de serre atmosphérique : plus subtil qu'on ne le croit! *La Météorologie*, 72 :31–41, 2011.

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