Un calcul précis du rayonnement atmosphérique par la méthode de Monte-Carlo pour le dimensionnement des installations solaires

Yaniss NYFFENEGGER-PÉRÉ[a], Stéphane BLANCO[b], Richard FOURNIER[c], Mouna EL HAFI[d]

[a,b,c]laboratoire Plasma et Conversion d'Energie (LAPLACE), UMR 5213 CNRS, Université Toulouse III, France
[d]laboratoire RAPSODEE, UMR CNRS 5302, Mines Albi, Campus Jarlard,81013 Albi CT Cedex 09, France

Journées Nationales sur l'Énergie Solaire
27 Août 2021

Enjeu

Dans le contexte de la transition énergétique, les modélisations couplant la dimension énergétique au sol et la météorologie locale sont aujourd'hui au centre de très nombreuses études. La météorologie impacte :

- Le flux solaire incident :
  - dimensionnement des centrales solaires à concentration en fonction de la météorologie
  - stratégie de commande en fonction des prédictions de l'évolution climatique sur de longues périodes
- Le rayonnement infrarouge
  - rendement d'un panneau photovoltaïque fonction de sa température
  - stabilité atmosphérique, brouillard, îlot de chaleur
- Le rayonnement solaire et thermique dans l'atmosphère est modélisé par le transfert radiatif

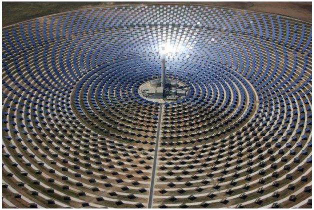
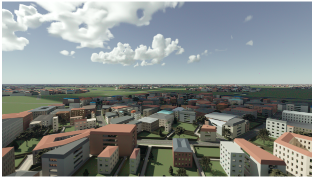
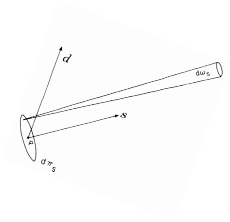




Figure: Illustrations des domaines d'applications : couplage toit végétal - panneaux photovoltaïques, tour à concentration solaire, étude énergétique d'une ville.

On se propose d'élaborer une méthodologie pour obtenir des résulats de référence sur un calcul de flux incident au sol.

Transfert radiatif et absorption atmosphérique



- Une grandeur charactéristique du transfert radiatif : la luminance
  - La luminance, $L_\nu(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\omega})$, est une densité de flux radiative en un point, $\boldsymbol{x}$, dans une direction $\boldsymbol{\omega}$ et pour une fréquence donnée ν.

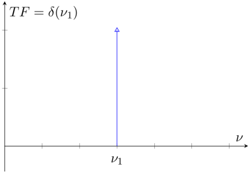
- Le transfert radiatif est basé sur l'ETR (Équation du Transfert Radiatif):

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\omega} \cdot \nabla_r L_\nu(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\omega}) = &- k_{ext,\nu}(\boldsymbol{x}) L_\nu(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\omega}) \\ &+ k_{s,\nu}(\boldsymbol{x}) \int_{4\pi} \phi(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega}') L_\nu(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\omega}') \, d\boldsymbol{\omega} \\ &+ S(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\omega}).\end{aligned}$$

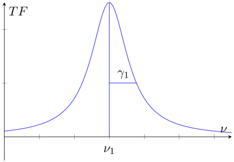
  - Terme d'extinction par absorption et diffusion $k_{ext,\nu}(\boldsymbol{x}) = k_{a,\nu}(\boldsymbol{x}) + k_{s,\nu}(\boldsymbol{x})$
  - Terme source de diffusion : $k_{s,\nu}(\boldsymbol{x}) \int_{4\pi} \phi(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega}') L_\nu(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\omega}', t) \, d\boldsymbol{\omega}$
  - Terme source : dans l'atmosphère terrestre avec l'hypothèse d'équilibre thermodynamique local (LTE), le terme source vaut $S(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\omega}, t) = k_{a,\nu}(\boldsymbol{x}) L_\nu^{eq}(T(\boldsymbol{x}))$. $L_\nu^{eq}(T(\boldsymbol{x}))$ est la luminance d'équilibre du corps noir.
  - Conditions aux limites : Le sol considéré comme un corps noir à une température T_{sol} et la luminance incidente du Soleil au sommet de l'atmosphère.

Transfert radiatif et absorption atmosphérique

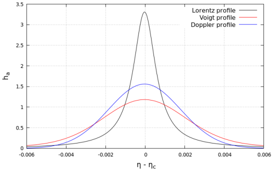
- L'absorption par les gaz
  - Particule à deux niveaux énergétiques E_1 et E_2: un atome ou molécule ne peut qu'absorber ou émettre des paquets de photons (quanta) à une énergie $\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu_1$
  - Une transition moléculaire entre le niveau d'énergie E_1 et E_2 peut etre représentée comme un dirac sur le domaine fréquentiel :



$\Longrightarrow$



- Élargissement des raies : effet collisionnel et Doppler
  - Profil de raie de Lorentz : collisions entre molécules
  - Profil de raie de Doppler : rends compte de la vitesse des molécules
  - Profil de raire de Voigt : convolution de Lorentz et Doppler

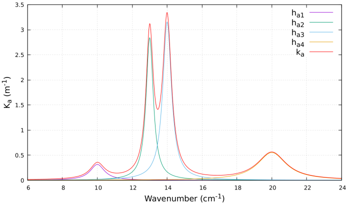


- Une raie d'absorption est donnée par : $h_{a,\nu} = \rho\, S_j\; f(\nu - \nu_c, \gamma_c)$ avec $\int h_{a,\nu} d\nu = S_j$ l'intensité de la raie. Le centre de raie, la largeur de raie ainsi que son intensité sont calculés à l'aide de base spectroscopique (HITRAN, GEISA, ...).

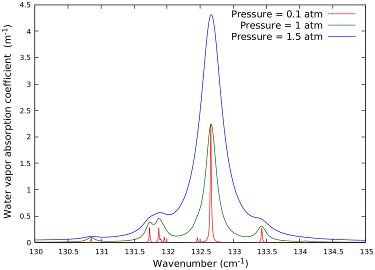
Transfert radiatif et absorption atmosphérique

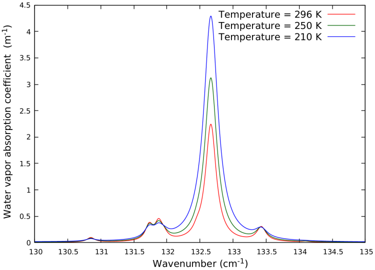
- Notion de spectres de raies :

Un nombre important de transitions moléculaires, N_t, caractérise l'absorption d'une molécule. On définit le coefficient d'absorption de cette molécule comme la somme de toutes ces transitions moléculaires : $k_{a,\nu} = \sum_j^{N_t} h_{a,j,\nu}$.



- Forte dépendance des spectres aux paramètres thermodynamiques et à la fréquence

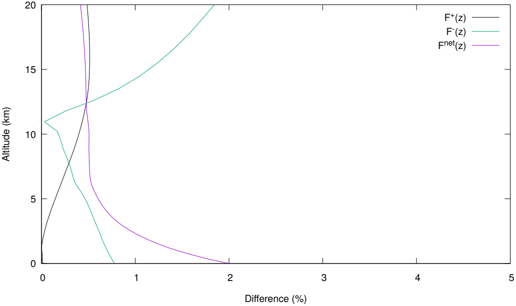




Les modèles raies par raies sont coûteux à estimer en transfert radiatif car il faut estimer le coefficient d'absorption pour toutes les fréquences et à toutes les positions du milieu.

Transfert radiatif et absorption atmosphérique

- Des modèles approximés moins couteux existent :
  - K-distribution : statistique sur la distribution du coefficient d'absorption.
  - Modèles à bandes étroites : Repose souvent sur le fait que la luminance d'équilibre est constante sur une plage étroite en fréquence (de l'ordre de 25cm^{-1})
  - Modèles globaux : SLW (Spectral Line Weighted Sum of Gray Gases), ADF (Absorption Distribution Function) et FSK (Full-Spectrum Correlated-k Distribution).
- Inconvénient des modèles approximés :
  - On estime l'erreur introduite par l'utilisation d'un modèle en K-corrélés sur un flux de l'ordre de quelques pourcents :



  - Les modèles approximés dépendent souvent des raies par raies et doivent etre recalculé pour chaque changement d'èspeces moléculaire ou conditions thermodynamique du milieu.

Transfert radiatif et Monte-Carlo : formulation intégrale

- A partir de l'ETR on peut écrire :

$$\boldsymbol{\omega} \cdot \nabla_r L_\nu(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\omega}) = - k_{ext,\nu} L_\nu(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\omega}) + k_{ext,\nu} \left[P_a L_\nu^{eq}(T(\boldsymbol{x})) + P_s \int_{4\pi} \phi(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega}') L_\nu(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\omega}', t) \, d\boldsymbol{\omega} \right]$$

  - Avec la probabilité, $P_a = k_{a,\nu}/k_{ext,\nu}$, d'être absorbé et $P_s = k_{s,\nu}/k_{ext,\nu}$ d'être diffusé.
- Cette expression différentielle se traduit en formulation intégrale. La luminance au point x_0 et dans la direction ω_0 est donnée par :

$$L_\nu(\boldsymbol{x_0}, \boldsymbol{\omega_0}) = \int_0^{+\infty} dl \, \underbrace{k_{ext,\nu} \; \exp(-\textstyle\int k_{ext,\nu} \, dl')}_{p_L(l)} \left\{ {\color{blue}P_a(\boldsymbol{x_1})} L_\nu^{eq}(\boldsymbol{x_1}) + {\color{red}P_s(\boldsymbol{x_1})} \int_{4\pi} \phi(\boldsymbol{\omega}_0, \boldsymbol{\omega}_1) L_\nu(\boldsymbol{x_1}, \boldsymbol{\omega}_1) \, d\boldsymbol{\omega} \right\}$$

Problème :

Il est imposible d'échantillonner exactement une longeur, l, selon la densité de probabilité définie par $p_L(l) = k_{ext,\nu} \; \exp(-\int k_{ext,\nu} dl')$

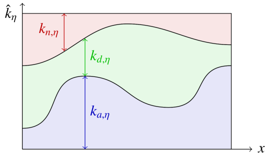
- Contournement du problème de l'hétérogénéité du milieu par la méthode des collisions nulles : introduction d'un majorant spatial **[Galtier et al, Integral formulation of null-collision Monte Carlo algorithms, (2013), JQSRT]** .

$$\hat{k}_\nu = k_{a,\nu}(\boldsymbol{x}) + k_{s,\nu}(\boldsymbol{x}) + k_{n,\nu}(\boldsymbol{x})$$

- Reformulation de l'ETR différentielle :

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\omega} \cdot \nabla_r L_\nu(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\omega}) = &- \hat{k}_\nu L_\nu(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\omega}) \\ &+ \hat{k}_\nu \left[P_N L_\nu(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\omega}) + P_a L_\nu^{eq}(T(\boldsymbol{x})) + P_s \int_{4\pi} \phi(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega}') L_\nu(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\omega}', t) \, d\boldsymbol{\omega} \right]\end{aligned}$$

$$P_N = \frac{k_{n,\nu}(\boldsymbol{x})}{\hat{k}_\nu} \; ; \; P_s = \frac{k_{s,\nu}(\boldsymbol{x})}{\hat{k}_\nu} \; ; \; P_a = \frac{k_{a,\nu}(\boldsymbol{x})}{\hat{k}_\nu}$$



- Formulation intégrale en collisions nulles :

$$L_\nu(\boldsymbol{x}_0, \boldsymbol{\omega}_0) = \int_0^{+\infty} dl \; \underbrace{\hat{k}_\nu \; \exp(-\hat{k}_\nu \; l)}_{p_L(l)}$$

$$\left\{ P_a(\boldsymbol{x}_1) L_\nu^{eq}(\boldsymbol{x}_1) + P_s(\boldsymbol{x}_1) \int_{4\pi} \phi(\boldsymbol{\omega}_0, \boldsymbol{\omega}_1) L_\nu(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{\omega}_1) \, d\boldsymbol{\omega} + P_N(\boldsymbol{x}) L_\nu(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{\omega}_0) \right\}$$

- A partir de l'équation précèdente (sans diffusion par simplicité) :

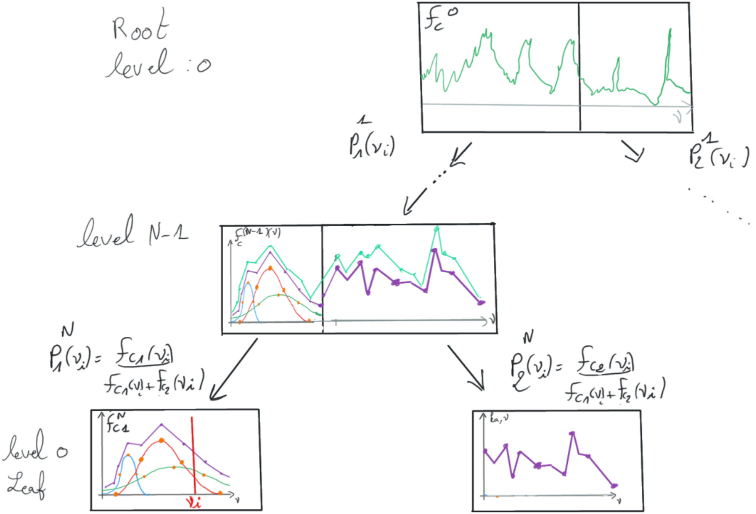
$$L_\nu(\boldsymbol{x_0},\boldsymbol{\omega_0}) = \int_0^{+\infty} dl\, p_L(l) \left\{ \frac{k_{a,\nu}(\boldsymbol{x_1})}{\hat{k}_\nu} L_\nu^{eq}(\boldsymbol{x_1}) + \frac{k_{n,\nu}(\boldsymbol{x_1})}{\hat{k}_\nu} L_\nu(\boldsymbol{x_1},\boldsymbol{\omega_0}) \right\}$$

l'expression du coefficient d'absorption, $k_{a,\nu} = \sum_j^{N_t} h_{a,j,\nu}$, peut etre directement écrite et la probabilité $P_{J,\nu}(j)$ de choisir une transition est introduite.

$$L_\nu(\boldsymbol{x_0},\boldsymbol{\omega_0}) = \int_0^{+\infty} dl\, p_L(l) \Bigg\{ \sum_{j=1}^{Nt(s)} P_{J,\nu}(j) \Big(P_{a,\nu,j}(\boldsymbol{x}_1)\, L_\nu^{eq}(T(\boldsymbol{x}_1)) + (1 - P_{a,\nu,j}(\boldsymbol{x}_1))\, L_\nu(\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{\omega_0}) \Big) \Bigg\}$$

- Toute la difficulté est de trouver un jeu de probabilité qui s'approche de l'idéale (première proposition par Galtier **[Galtier et al, Radiative transfer and spectroscopic databases: A line-sampling monte carlo approach, JQSRT, (2016)]**) .

- Travail en collaboration avec l'IRIT : estimer le jeu de probabilité $P_{J,\nu}(j)$



Transfert radiatif et Monte-Carlo : expression du flux au sol

- Le flux moyen au sol en W/m^2 s'exprime comme :

$$\varphi(\boldsymbol{x}_{sol}) = \int d\boldsymbol{\omega}_{\textsf{sun}} \, (\boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{n}) \int_0^{+\infty} d\nu \, L_\nu(\boldsymbol{x_0}, \boldsymbol{\omega})$$

$$\varphi(\boldsymbol{x}_{sol}) = \int d\boldsymbol{\omega}_{\textsf{sun}} \, (\boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{n}) \int_0^{+\infty} d\nu \int_0^{+\infty} \hat{k}_\nu \exp\left(-\hat{k}_\nu \sigma\right) d\sigma \Bigg\{$$

$$\left[\sum_{s=1}^{N_s} P_S(s) \Bigg[P_{0,\nu} \right.$$

$$\left\{ \sum_{j=1}^{Nt(s)} P_{J,\nu}(j) \Big(P_{a,\nu,j}[0] + (1 - P_{a,\nu,j}) \, L_\nu(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{\omega}) \Big) \right\}$$

$$\left. + (1 - P_{0,\nu}) \int_{4\pi} \phi_i(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega'}) \, L_\nu(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{\omega'}) \, d\omega(\boldsymbol{\omega'}) \Bigg] \right] \mathcal{H}(\boldsymbol{x}_1 \in \textsf{atmosphere})$$

$$+ L_\nu^{eq}(T_{sun}) \mathcal{H}(\boldsymbol{x_1} \in \textsf{ground})$$

$$+ [0] \mathcal{H}(\boldsymbol{x}_1 \in \textsf{space}) \Bigg\}$$

- Le flux moyen au sol en W/m^2 s'exprime comme :

$$\varphi(\boldsymbol{x}_{sol}) = \int d\boldsymbol{\omega}_{\mathsf{sun}} \; (\boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{n}) \int_0^{+\infty} d\nu \; L_\nu(\boldsymbol{x_0}, \boldsymbol{\omega})$$

$$\varphi(\boldsymbol{x}_{sol}) = \int d\boldsymbol{\omega}_{\mathsf{sun}} \; (\boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{n}) \int_0^{+\infty} d\nu \int_0^{+\infty} \hat{k}_\nu \exp\left(-\hat{k}_\nu \sigma\right) d\sigma \Bigg\{$$

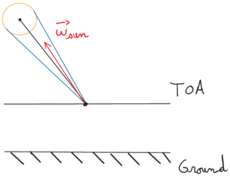
$$\left[\sum_{s=1}^{N_s} P_S(s) \Bigg[P_{0,\nu}\right.$$

$$\left\{ \sum_{j=1}^{Nt(s)} P_{J,\nu}(j) \Big(P_{a,\nu,j}[0] + (1 - P_{a,\nu,j}) \, L_\nu(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{\omega}) \Big) \right\}$$

$$+ (1 - P_{0,\nu}) \int_{4\pi} \phi_i(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega'}) \; L_\nu(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{\omega'}) \; d\omega(\boldsymbol{\omega'}) \Bigg] \Bigg] \mathcal{H}(\boldsymbol{x}_1 \in \text{atmosphere})$$

$$+ L_\nu^{eq}(T_{sun}) \mathcal{H}(\boldsymbol{x_1} \in \text{ground})$$

$$+ [0] \mathcal{H}(\boldsymbol{x}_1 \in \text{space}) \Bigg\}$$



Transfert radiatif et Monte-Carlo : expression du flux au sol

- Le flux moyen au sol en W/m^2 s'exprime comme :

$$\varphi(\boldsymbol{x}_{sol}) = \int d\boldsymbol{\omega}_{\mathbf{sun}} \, (\boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{n}) \int_0^{+\infty} d\nu \, L_\nu(\boldsymbol{x_0}, \boldsymbol{\omega})$$

$$\varphi(\boldsymbol{x}_{sol}) = \int d\boldsymbol{\omega}_{\mathbf{sun}} \, (\boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{n}) \int_0^{+\infty} d\nu \int_0^{+\infty} \hat{k}_\nu \exp\left(-\hat{k}_\nu \sigma\right) d\sigma \Bigg\{$$

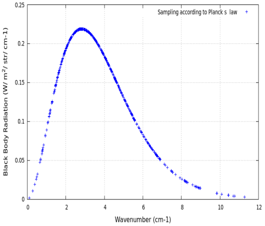
$$\left[\sum_{s=1}^{N_s} P_S(s) \Bigg[P_{0,\nu} \right.$$

$$\left\{ \sum_{j=1}^{Nt(s)} P_{J,\nu}(j) \Bigg(P_{a,\nu,j}[0] + (1 - P_{a,\nu,j}) \, L_\nu(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{\omega}) \Bigg) \right\}$$

$$\left. + (1 - P_{0,\nu}) \int_{4\pi} \phi_i(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega'}) \, L_\nu(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{\omega'}) \, d\omega(\boldsymbol{\omega'}) \Bigg] \right] \mathcal{H}(\boldsymbol{x}_1 \in \text{atmosphere})$$

$$+ L_\nu^{eq}(T_{sun}) \mathcal{H}(\boldsymbol{x_1} \in \text{ground})$$

$$+ [0] \mathcal{H}(\boldsymbol{x}_1 \in \text{space}) \Bigg\}$$



- Le flux moyen au sol en W/m^2 s'exprime comme :

$$\varphi(\boldsymbol{x}_{sol}) = \int d\boldsymbol{\omega}_{\textbf{sun}} \, (\boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{n}) \int_0^{+\infty} d\nu \, L_\nu(\boldsymbol{x_0}, \boldsymbol{\omega})$$

$$\varphi(\boldsymbol{x}_{sol}) = \int d\boldsymbol{\omega}_{\textbf{sun}} \, (\boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{n}) \int_0^{+\infty} d\nu \int_0^{+\infty} \hat{k}_\nu \exp\left(-\hat{k}_\nu \sigma\right) d\sigma \Bigg\{$$

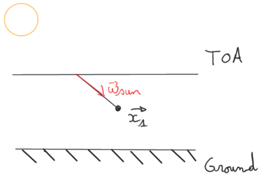
$$\left[\sum_{s=1}^{N_s} P_S(s) \Bigg[P_{0,\nu}\right.$$

$$\left\{ \sum_{j=1}^{Nt(s)} P_{J,\nu}(j) \left(P_{a,\nu,j}[0] + (1 - P_{a,\nu,j}) \, L_\nu(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{\omega}) \right) \right\}$$

$$\left. + (1 - P_{0,\nu}) \int_{4\pi} \phi_i(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega'}) \, L_\nu(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{\omega'}) \, d\omega(\boldsymbol{\omega'}) \Bigg]\right] \mathcal{H}(\boldsymbol{x}_1 \in \text{atmosphere})$$

$$+ L_\nu^{eq}(T_{sun}) \mathcal{H}(\boldsymbol{x_1} \in \text{ground})$$

$$+ [0] \mathcal{H}(\boldsymbol{x}_1 \in \text{space}) \Bigg\}$$



Transfert radiatif et Monte-Carlo : expression du flux au sol

- Le flux moyen au sol en W/m^2 s'exprime comme :

$$\varphi(\boldsymbol{x}_{sol}) = \int d\boldsymbol{\omega}_{\mathsf{sun}} \; (\boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{n}) \int_0^{+\infty} d\nu \; L_\nu(\boldsymbol{x_0}, \boldsymbol{\omega})$$

$$\varphi(\boldsymbol{x}_{sol}) = \int d\boldsymbol{\omega}_{\mathsf{sun}} \; (\boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{n}) \int_0^{+\infty} d\nu \int_0^{+\infty} \hat{k}_\nu \exp\left(-\hat{k}_\nu \sigma\right) d\sigma \left\{ \right.$$

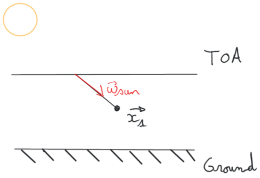
$$\left[\sum_{s=1}^{N_s} P_S(s) \left[P_{0,\nu} \right.\right.$$

$$\left\{ \sum_{j=1}^{Nt(s)} P_{J,\nu}(j) \left(P_{a,\nu,j}[0] + (1 - P_{a,\nu,j}) \, L_\nu(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{\omega}) \right) \right\}$$

$$\left.\left. + (1 - P_{0,\nu}) \int_{4\pi} \phi_i(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega'}) \; L_\nu(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{\omega'}) \; d\omega(\boldsymbol{\omega'}) \right]\right] \mathcal{H}(\boldsymbol{x}_1 \in \mathsf{atmosphere})$$

$$+ \, L_\nu^{eq}(T_{sun}) \mathcal{H}(\boldsymbol{x_1} \in \mathsf{ground})$$

$$/ + [0] \mathcal{H}(\boldsymbol{x}_1 \in \mathsf{space}) \left. \right\}$$



- Le flux moyen au sol en W/m^2 s'exprime comme :

$$\varphi(\boldsymbol{x}_{sol}) = \int d\boldsymbol{\omega}_{\mathsf{sun}}\ (\boldsymbol{\omega}\cdot\boldsymbol{n}) \int_0^{+\infty} d\nu\ L_\nu(\boldsymbol{x_0}, \boldsymbol{\omega})$$

$$\varphi(\boldsymbol{x}_{sol}) = \int d\boldsymbol{\omega}_{\mathsf{sun}}\ (\boldsymbol{\omega}\cdot\boldsymbol{n}) \int_0^{+\infty} d\nu \int_0^{+\infty} \hat{k}_\nu \exp\left(-\hat{k}_\nu\sigma\right) d\sigma \Bigg\{$$

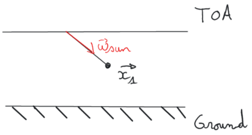
$$\left[\sum_{s=1}^{N_s} P_S(s)\left[P_{0,\nu}\right.\right.$$

$$\left\{\sum_{j=1}^{Nt(s)} P_{J,\nu}(j)\left(P_{a,\nu,j}[0] + (1 - P_{a,\nu,j})\, L_\nu(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{\omega})\right)\right\}$$

$$\left.\left. + (1 - P_{0,\nu}) \int_{4\pi} \phi_i(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega'})\ L_\nu(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{\omega'})\ d\omega(\boldsymbol{\omega'})\right]\right]\mathcal{H}(\boldsymbol{x}_1 \in \mathsf{atmosphere})$$

$$+ L_\nu^{eq}(T_{sun})\mathcal{H}(\boldsymbol{x_1} \in \mathsf{ground})$$

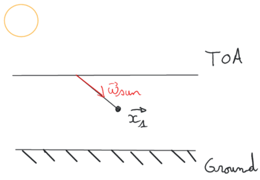
$$+ [0]\mathcal{H}(\boldsymbol{x}_1 \in \mathsf{space}) \Bigg\}$$



Transfert radiatif et Monte-Carlo : expression du flux au sol

- Le flux moyen au sol en W/m^2 s'exprime comme :

$$\varphi(\boldsymbol{x}_{sol}) = \int d\boldsymbol{\omega}_{\mathbf{sun}}\ (\boldsymbol{\omega}\cdot\boldsymbol{n}) \int_0^{+\infty} d\nu\ L_\nu(\boldsymbol{x_0},\boldsymbol{\omega})$$



$$\varphi(\boldsymbol{x}_{sol}) = \int d\boldsymbol{\omega}_{\mathbf{sun}}\ (\boldsymbol{\omega}\cdot\boldsymbol{n}) \int_0^{+\infty} d\nu \int_0^{+\infty} \hat{k}_\nu \exp\left(-\hat{k}_\nu\sigma\right) d\sigma \Bigg\{$$

$$\color{blue}{\Bigg[}\color{red}{\sum_{s=1}^{N_s} P_S(s)}\color{black}{\Bigg[P_{0,\nu}}$$

$$\left\{\sum_{j=1}^{Nt(s)} P_{J,\nu}(j)\Bigg(P_{a,\nu,j}[0] + (1-P_{a,\nu,j})\,L_\nu(\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{\omega})\Bigg)\right\}$$

$$+ (1-P_{0,\nu})\int_{4\pi}\phi_i(\boldsymbol{\omega},\boldsymbol{\omega'})\,L_\nu(\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{\omega'})\,d\omega(\boldsymbol{\omega'})\Bigg]\color{blue}{\Bigg]\mathcal{H}(\boldsymbol{x}_1 \in \text{atmosphere})}$$

$$+ L_\nu^{eq}(T_{sun})\mathcal{H}(\boldsymbol{x_1} \in \text{ground})$$

$$+ [0]\mathcal{H}(\boldsymbol{x}_1 \in \text{space})\Bigg\}$$

Choix de l'espèce moléculaire en $\boldsymbol{x_1}$ (H_2O, O_3, ...)

- Le flux moyen au sol en W/m^2 s'exprime comme :

$$\varphi(\boldsymbol{x}_{sol}) = \int d\boldsymbol{\omega}_{\mathsf{sun}} \, (\boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{n}) \int_0^{+\infty} d\nu \, L_\nu(\boldsymbol{x_0}, \boldsymbol{\omega})$$

$$\varphi(\boldsymbol{x}_{sol}) = \int d\boldsymbol{\omega}_{\mathsf{sun}} \, (\boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{n}) \int_0^{+\infty} d\nu \int_0^{+\infty} \hat{k}_\nu \exp\left(-\hat{k}_\nu \sigma\right) d\sigma \Bigg\{$$

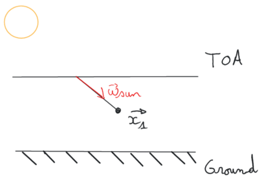
$$\Bigg[\sum_{s=1}^{N_s} P_S(s) \Bigg[P_{0,\nu}$$

$$\Bigg\{ \sum_{j=1}^{Nt(s)} P_{J,\nu}(j) \Big(P_{a,\nu,j}[0] + (1 - P_{a,\nu,j}) \, L_\nu(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{\omega}) \Big) \Bigg\}$$

$$+ (1 - P_{0,\nu}) \int_{4\pi} \phi_i(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega'}) \, L_\nu(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{\omega'}) \, d\omega(\boldsymbol{\omega'}) \Bigg] \Bigg] \mathcal{H}(\boldsymbol{x}_1 \in \mathsf{atmosphere})$$

$$+ L_\nu^{eq}(T_{sun}) \mathcal{H}(\boldsymbol{x_1} \in \mathsf{ground})$$

$$+ [0] \mathcal{H}(\boldsymbol{x}_1 \in \mathsf{space}) \Bigg\}$$



- Le flux moyen au sol en W/m^2 s'exprime comme :

$$\varphi(\boldsymbol{x}_{sol}) = \int d\boldsymbol{\omega}_{\mathbf{sun}}\ (\boldsymbol{\omega}\cdot\boldsymbol{n}) \int_0^{+\infty} d\nu\ L_\nu(\boldsymbol{x_0},\boldsymbol{\omega})$$

$$\varphi(\boldsymbol{x}_{sol}) = \int d\boldsymbol{\omega}_{\mathbf{sun}}\ (\boldsymbol{\omega}\cdot\boldsymbol{n}) \int_0^{+\infty} d\nu \int_0^{+\infty} \hat{k}_\nu \exp\left(-\hat{k}_\nu \sigma\right) d\sigma \Bigg\{$$

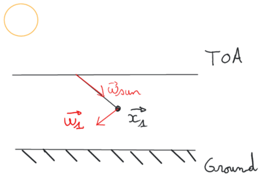
$$\Bigg[\sum_{s=1}^{N_s} P_S(s) \Bigg[P_{0,\nu}$$

$$\left\{ \sum_{j=1}^{Nt(s)} P_{J,\nu}(j) \Big(P_{a,\nu,j}[0] + (1-P_{a,\nu,j})\, L_\nu(\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{\omega}) \Big) \right\}$$

$$+ (1-P_{0,\nu}) \int_{4\pi} \phi_i(\boldsymbol{\omega},\boldsymbol{\omega'})\, L_\nu(\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{\omega'})\, d\omega(\boldsymbol{\omega'}) \Bigg]\Bigg] \mathcal{H}(\boldsymbol{x}_1 \in \text{atmosphere})$$

$$+ L_\nu^{eq}(T_{sun}) \mathcal{H}(\boldsymbol{x_1} \in \text{ground})$$

$$+ [0]\mathcal{H}(\boldsymbol{x}_1 \in \text{space}) \Bigg\}$$



- Le flux moyen au sol en W/m^2 s'exprime comme :

$$\varphi(\boldsymbol{x}_{sol}) = \int d\boldsymbol{\omega}_{\mathsf{sun}} \ (\boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{n}) \int_0^{+\infty} d\nu \ L_\nu(\boldsymbol{x_0}, \boldsymbol{\omega})$$

$$\varphi(\boldsymbol{x}_{sol}) = \int d\boldsymbol{\omega}_{\mathsf{sun}} \ (\boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{n}) \int_0^{+\infty} d\nu \int_0^{+\infty} \hat{k}_\nu \exp\left(-\hat{k}_\nu \sigma\right) d\sigma \Bigg\{$$

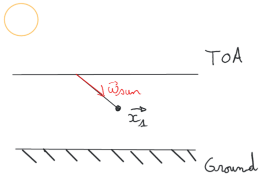
$$\Bigg[\sum_{s=1}^{N_s} P_S(s) \Bigg[P_{0,\nu}$$

$$\Bigg\{ \sum_{j=1}^{Nt(s)} P_{J,\nu}(j) \Bigg(P_{a,\nu,j}[0] + (1 - P_{a,\nu,j}) \, L_\nu(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{\omega}) \Bigg) \Bigg\}$$

$$+ (1 - P_{0,\nu}) \int_{4\pi} \phi_i(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega'}) \ L_\nu(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{\omega'}) \ d\omega(\boldsymbol{\omega'}) \Bigg] \Bigg] \mathcal{H}(\boldsymbol{x}_1 \in \mathsf{atmosphere})$$

$$+ L_\nu^{eq}(T_{sun}) \mathcal{H}(\boldsymbol{x_1} \in \mathsf{ground})$$

$$+ [0] \mathcal{H}(\boldsymbol{x}_1 \in \mathsf{space}) \Bigg\}$$



- Le flux moyen au sol en $\mathrm{W/m^2}$ s'exprime comme :

$$\varphi(\boldsymbol{x}_{sol}) = \int d\boldsymbol{\omega}_{\mathbf{sun}}\ (\boldsymbol{\omega}\cdot\boldsymbol{n}) \int_0^{+\infty} d\nu\ L_\nu(\boldsymbol{x_0},\boldsymbol{\omega})$$

$$\varphi(\boldsymbol{x}_{sol}) = \int d\boldsymbol{\omega}_{\mathbf{sun}}\ (\boldsymbol{\omega}\cdot\boldsymbol{n}) \int_0^{+\infty} d\nu \int_0^{+\infty} \hat{k}_\nu \exp\left(-\hat{k}_\nu \sigma\right) d\sigma \Bigg\{$$

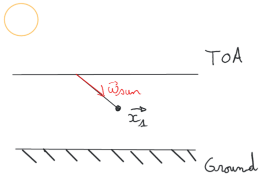
$$\Bigg[\sum_{s=1}^{N_s} P_S(s) \Bigg[P_{0,\nu}$$

$$\Bigg\{ \sum_{j=1}^{Nt(s)} P_{J,\nu}(j) \Big(P_{a,\nu,j}\,[0] + (1 - P_{a,\nu,j})\, L_\nu(\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{\omega}) \Big) \Bigg\}$$

$$+ (1 - P_{0,\nu}) \int_{4\pi} \phi_i(\boldsymbol{\omega},\boldsymbol{\omega'})\ L_\nu(\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{\omega'})\ d\omega(\boldsymbol{\omega'}) \Bigg]\Bigg] \mathcal{H}(\boldsymbol{x}_1 \in \text{atmosphere})$$

$$+ L_\nu^{eq}(T_{sun}) \mathcal{H}(\boldsymbol{x_1} \in \text{ground})$$

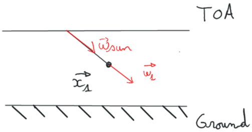
$$+ [0] \mathcal{H}(\boldsymbol{x}_1 \in \text{space}) \Bigg\}$$



- Le flux moyen au sol en $\mathrm{W/m^2}$ s'exprime comme :

$$\varphi(\boldsymbol{x}_{sol}) = \int d\boldsymbol{\omega}_{\mathsf{sun}} \; (\boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{n}) \int_0^{+\infty} d\nu \; L_\nu(\boldsymbol{x_0}, \boldsymbol{\omega})$$

$$\begin{aligned}
\varphi(\boldsymbol{x}_{sol}) = \int d\boldsymbol{\omega}_{\mathsf{sun}} \; (\boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{n}) \int_0^{+\infty} d\nu \int_0^{+\infty} \hat{k}_\nu \exp\left(-\hat{k}_\nu \sigma\right) d\sigma \Bigg\{ \\
\Bigg[\sum_{s=1}^{N_s} P_S(s) \Bigg[P_{0,\nu} \\
\Bigg\{ \sum_{j=1}^{Nt(s)} P_{J,\nu}(j) \Big(P_{a,\nu,j}[0] + (1 - P_{a,\nu,j}) \, L_\nu(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{\omega}) \Big) \Bigg\} \\
+ (1 - P_{0,\nu}) \int_{4\pi} \phi_i(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega'}) \; L_\nu(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{\omega'}) \; d\omega(\boldsymbol{\omega'}) \Bigg] \Bigg] \mathcal{H}(\boldsymbol{x}_1 \in \text{atmosphere}) \\
+ L_\nu^{eq}(T_{sun}) \mathcal{H}(\boldsymbol{x_1} \in \text{ground}) \\
+ [0] \mathcal{H}(\boldsymbol{x}_1 \in \text{space}) \Bigg\}
\end{aligned}$$



Resultats

- Résultats dans l'infrarouge : [100, 2500] cm^{-1}
  H_2O, CO_2, O_3

	Flux MC (W/m^2)	Reference	time	Realization number
TOA				
[1]	$293.243 +/- 0.04586$	293.2	30 min 42 secs	6502400
[2]	$284.416 +/- 0.04443$	284.37	32 min 17 secs	6502400
Ground				
	$348.547 +/- 1.39395$	347.4	1 sec 77 msecs	12000

[1] Sans le continuum de vapeur d'eau
[2] Avec le continuum de vapeur d'eau

- Résultats dans le visible : [13000, 25000] cm^{-1}
  H_2O, CO_2, O_2, continuum de vapeur d'eau et diffusion de Rayleigh

	Flux MC (W/m^2)	Reference	time	Realization number
Ground				
$CO_2 = 300$ppm	TODO			
$CO_2 = 600$ppm,	TODO			

Perspectives

- Forçage radiatif : différence de flux en TOA pour un changement du champs de concentration de CO2 intégré sur toute la Terre et durant une période de 100 ans.
  - Exemple de résultat pour une durée de un mois intégré sur tout le domaine infrarouge et sur toute la Terre :

	Mean Flux MC (W/m^2)	time	Realization number
$CO_2 = 280$ppm	$257.948 +/- 0.20837$	10 mins 29 secs	256000
$CO_2 = 2*280$ppm	$255.36 +/- 0.20727$	6 mins 29 secs 708	256000

$\hookrightarrow$ Forçage radiatif estimé à $2.588 +/- 0.2939$ W/m^2.

- Calcul de sensibilités (thèse en cours de Nada Chems Mourtaday, LAPLACE):
  - Sensibilité géométriques : Influence d'un nuage sur le flux au sol.
  - Sensibilités paramétriques : Influence d'un changement du champs de concentration des gaz ou aérosol sur le flux au sol.

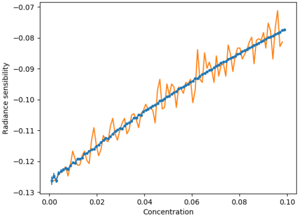


Figure: Sensibilité de la luminance à la concentration