

Validation des résultats de transfert radiatif dans *htrdr-planeto*

12 janvier 2023

|Més|Star>
(<http://www.meso-star.com>)

Table des matières

1	Introduction	2
2	Rappels sur <i>htrdr-planeto</i>	2
3	Développement de <i>TOM</i>	5
4	Résurrection de <i>planet_EMC</i>	5
5	Refactoring des algorithmes	6
6	Tests numériques	8
6.1	Configuration géométrique	8
6.2	Sol parfaitement noir uniquement	9
6.3	Sol parfaitement réfléchissant uniquement	9
6.4	Sol et atmosphère purement absorbante homogène	9
6.5	Sol et atmosphère purement absorbante hétérogène	9
6.6	Sol et atmosphère absorbante et diffusante hétérogène	10
6.7	Premier test d'intégration spectrale	10
6.8	Intégration spectrale multi-intervalles	10
6.9	Présence d'un aérosol absorbant	11
6.10	Présence d'un aérosol absorbant et diffusant	11
6.11	Nuage localisé	11
6.12	Test du modèle complet	12
6.13	Utilisation d'un spectre haute résolution de radiance solaire	14
6.14	Source de rayonnement interne	14
7	planet_generator	15

1 Introduction

Ce document résume tout le travail réalisé par Mésio-Star dans le cadre de la validation des résultats du code de transfert radiatif *htrdr-planeto* : non seulement les tests numériques réalisés, mais également tout le travail sur le code lui-même, et sur des codes tiers, qui ont permis de réaliser lesdits tests.

2 Rappels sur *htrdr-planeto*

Il n'est pas inutile de commencer par rappeler rapidement les ambitions initiales ayant motivé le développement de *htrdr-planeto* :

- Transfert radiatif 3D en présence de matériaux solides, d'un mélange de gaz et d'un nombre arbitraire d'aérosols
- En ce qui concerne les solides (=“le sol”) : la géométrie est décrite par un ensemble de triangles ; chaque triangle se voit affecter un matériau, dont les propriétés spectrales (réflectivité, émissivité) sont connues pour tous les domaines spectraux d'intérêt ; la géométrie de la surface solide n'a pas besoin d'être topologiquement connexe : il est ainsi possible de définir dans un même fichier une planète à orographie quelconque, un nombre arbitraire de lunes, etc.
- Les propriétés spectrales du mélange de gaz et des modes d'aérosol sont fournies sur un maillage tétraédrique ; un maillage différent peut être utilisé pour le mélange de gaz et pour chaque mode d'aérosol. Modèle spectral en k-distributions. Même remarque que pour les surfaces : un maillage tétraédrique donné n'a nul besoin d'être connexe.
- Le résultat générique est un flux radiatif, dans un domaine spectral quelconque (possiblement dégénéré à une seule valeur), incident sur un capteur virtuel de taille, d'orientation et d'ouverture angulaire quelconque. Ce qui permet de réaliser à la fois des simulations d'observations spatiales (position hors de l'atmosphère, taille ponctuelle et ouverture angulaire faible) et le calcul des flux aux interfaces horizontales des mailles d'un GCM (position dans l'atmosphère, taille égale à celle de l'interface GCM visée, ouverture angulaire=un hémisphère).
- Notion de source : il est possible de réaliser le transfert radiatif pour une source solaire (sphère de position, taille et spectre d'émission arbitraires) ou pour la source interne au système (surfaces solides + atmosphère), et ce de façon indépendante de la plage spectrale d'intégration. Par exemple : rien n'empêche d'intégrer sur la plage $[5, 100] \mu\text{m}$ pour une source de type solaire. L'intérêt sera limité, jusqu'au jour où la source solaire rayonne à une température de 300K. Précision pour la source solaire : il est possible d'utiliser une distribution de Planck ou une distribution spécifiée via un spectre à haute résolution spectrale de l'intensité solaire.

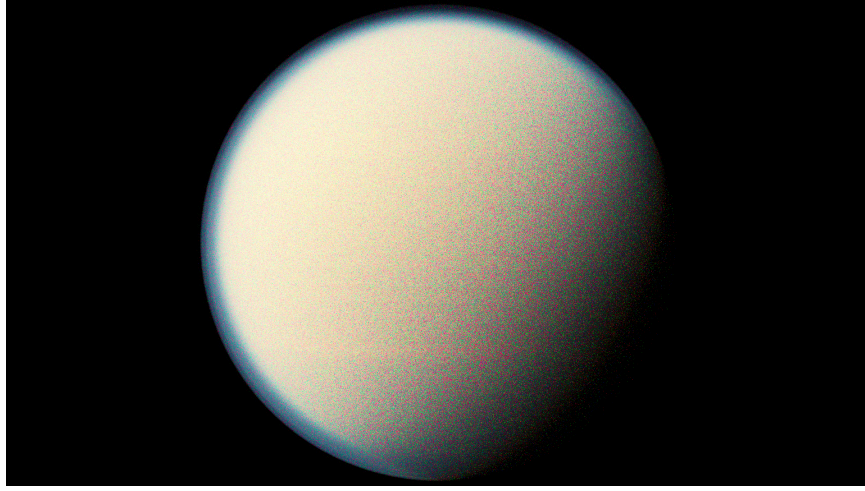


FIGURE 1 – Image dans le visible [380, 780] nm obtenue en présence d’une configuration de type “Titan”, où le sol est représenté par une sphère de 2575 km de rayon discrétisée en trianglemesh comportant 64621 noeuds permettant de définir 128880 triangles. Le matériau affecté à ce trianglemesh possède une réflectivité grise égale à 0.2 dans la plage spectrale d’intérêt. Un mélange de gaz et deux modes d’aérosol définissent le milieu semi-transparent (atmosphère). Les trois composantes utilisent un maillage volumique tétraédrique indépendant (mais identiques), basé sur 1064672 noeuds qui définissent 1552320 tétraèdres. Les propriétés optiques du mélange de gaz, du mode d’aérosol appelé “nuage” et du mode d’aérosol appelé “brume” ont été fournis par P. Rannou, et ont permis d’alimenter le code *GCM2htrdr* afin de produire les fichiers d’entrée de *htrdr-planeto*. Le capteur virtuel est placé à 12000 km du centre de la scène, dans la direction longitude=0° et latitude=0° ; la direction “up” du capteur est l’axe (Oz) de la scène. La source est un corps noir sphérique de rayon $6,96.10^5$ km, de température 5773 K, située à une distance de 1 U.A., dans la direction longitude=-60° et latitude=-40°. La résolution du capteur est 1920x1080 pixels, et 512 réalisations MC ont été utilisées pour chaque pixel. Le temps de rendu de cette image par *htrdr-planeto* est de 7 h 27 min sur 12 threads.

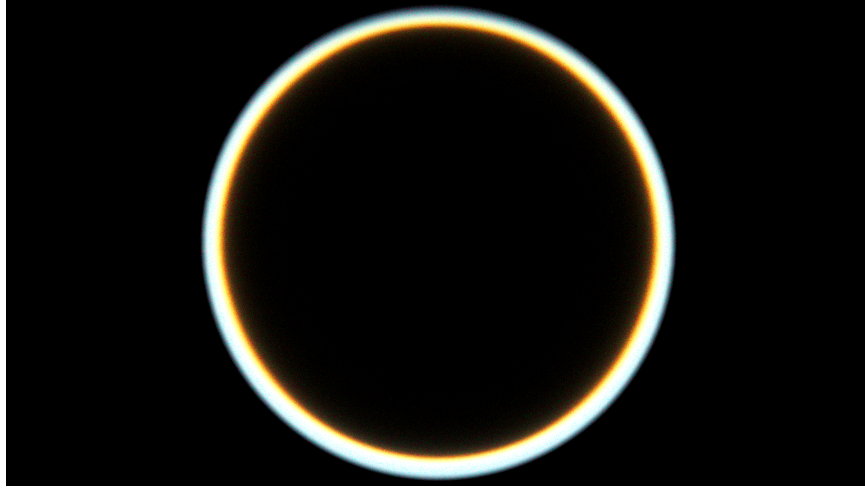


FIGURE 2 – Image dans le visible [380, 780] nm obtenue pour la même scène, et avec le même point de vue, que pour la figure 1, mais pour une configuration de “transit”, ou plutôt d’éclipse totale : afin de ne pas obtenir une image complètement saturée, la source est placée en position longitude= 180° , latitude= 0° , et à une distance de 3233089 km, de façon à ce que le disque solaire et le disque planétaire aient exactement la même taille vu depuis la position d’observation. La résolution du capteur est 1920x1080 pixels, et 2048 réalisations MC ont été utilisées pour chaque pixel. Le temps de rendu de cette image par *htrdr-planeto* est de 19 h 31 min sur 12 threads.

3 Développement de *TOM*

La première idée qui vient lorsqu'on souhaite valider les résultats d'un code est de les comparer aux résultats d'un autre code. Nous avons donc rapidement écrit un petit solver de transfert radiatif appelé *TOM* (The Oignon Model), totalement séparé de *htrdr-planeto*¹ permettant de résoudre le modèle physique suivant :

- Surface : sphère parfaite, de température homogène, et de propriétés radiatives également homogènes (spatialement, pas spectralement).
- Atmosphère : succession de coquilles sphériques (mailles) homogènes spatialement, de température uniforme. Utilisation du modèle en k-distributions.
- Source solaire : sphère de taille et position arbitraire, rayonnant selon la distribution de Planck à une température de brillance donnée, ou selon une distribution spécifiée de radiance à haute résolution spectrale.
- Aérosols : spécifiés par maille atmosphérique ; ils recouvrent donc entièrement la planète.

L'avantage principal de ce toy-model est que l'algorithme de transfert radiatif (toujours basé sur notre solution MC formulée en collisions nulles) est très rapide à mettre en place : il n'y a en effet besoin d'accéder qu'aux intersections entre une ligne de visée arbitraire et les interfaces (sphériques) entre mailles atmosphériques. Le principal inconvénient est qu'il ne permettra pas de valider des configurations faisant appel à des inhomogénéités spatiales (nuages localisés, ou propriétés spectrales variant à l'échelle de la maille).

C'est à l'occasion du développement de *TOM* que nous nous sommes rendus compte que les deux algorithmes de Monte-Carlo que nous utilisons jusque là, respectivement pour une source externe (solaire) et une source interne (atmosphère + surface) peuvent en fait être totalement fusionnés. Les différences ne s'expriment qu'au moment d'évaluer la source, mais toute la mécanique de construction des trajectoires optiques peut être capitalisée dans un unique algorithme... ce qui facilite énormément sa maintenance. La partie 5 est dédiée au travail effectué sur ce sujet.

4 Résurrection de *planet_EMC*

Le code *planet_EMC* a été développé entre 2008 et 2012 au Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux. Il permet de résoudre le modèle physique suivant :

- Sol sphérique, température et propriétés radiatives imposées sur un maillage longitude / latitude.
- Chaque colonne du maillage longitude / latitude précédent est discrétisé en un certain nombre de mailles. Les interfaces entre mailles sont donc des morceaux de sphère. La discrétisation verticale de chaque colonne est potentiellement indépendamment des autres. Chaque maille est homogène en propriétés radiatives et en température.
- Chaque maille atmosphérique peut également contenir un ou plusieurs modes d'aérosol, mais la maille reste homogène en propriétés optiques. Le modèle spectral utilisé est celui des k-distributions.
- Comme dans *TOM* ou *htrdr-planeto*, la source externe peut rayonner selon Planck à une température de brillance prescrite, ou selon une distribution de radiance spécifiée.

L'avantage d'utiliser *planet_EMC* est de pouvoir réaliser des tests sur une atmosphère inhomogène (ou plutôt homogène par morceaux), ce qui va un cran plus loin que ce qu'il est possible de valider à l'aide de *TOM*. Par ailleurs, ce code a été largement utilisé et validé. Cependant, la difficulté réside dans l'utilisation

1. *TOM* est écrit en fortran, et n'utilise aucune librairie de *htrdr*

elle-même du code, qui comporte un nombre conséquent d'options, et demande la manipulation d'un grand nombre de fichiers de configuration. Le comportement du code (ce qui est calculé, dans quelle unité...) est terriblement difficile à maîtriser. L'essentiel du travail a consisté à retrouver la bonne combinaison d'options permettant de reproduire un calcul *htrdr-planeto*. Mais il a également fallu reprendre l'outil de production de données d'entrées spécifique à ce code afin de produire les configurations de validation.

5 Refactoring des algorithmes

Pour des raisons historiques, *htrdr-planeto* utilisait des algorithmes de Monte-Carlo différents pour calculer une luminance monochromatique selon que la source est interne ou externe au système étudié. Lors du travail d'écriture de *TOM*, nous avons décidé de mettre en place les algorithmes décrits dans [1] pour le "LW" (source interne) et le "SW" (source externe) ; dans cette partie, nous allons faire appel aux formes intégrales de la solution générale à l'équation de transfert radiatif qui sont explicitées dans le document [1]. En effet, non seulement ces formes intégrales fournissent directement l'algorithme de Monte-Carlo qui en découle (chaque somme correspond à un échantillonnage : selon une densité de probabilité $pdf(x)$ pour $\int_{\mathcal{D}} pdf(x)dx...$, selon un jeu de probabilités p_i pour $\sum_{i=1}^N p_i...$), mais en plus ces intégrales découlent directement de la solution à l'ETR, éventuellement après quelques reformulations mathématiques qui n'enlèvent rien à leur caractère rigoureux. On est ainsi sûrs que les algorithmes de Monte-Carlo qui apparaissent à partir de ces intégrales permettent bien de résoudre l'ETR en présence de parois solides et d'un milieu semi-transparent hétérogène.

L'algorithme de Monte-Carlo utilisé dans *TOM* pour calculer une luminance en présence d'une source interne au système est : (relation 81 dans [1])

$$\begin{aligned}
L_{\nu}(\vec{x}_0, \vec{u}_0) = & \int_0^{+\infty} \hat{k}_{\nu} \exp(-\hat{k}_{\nu} \sigma) d\sigma \left\{ \right. \\
& \left[\frac{k_{a,\nu}(\vec{x}_1)}{\hat{k}_{\nu}} L_{\nu}^{eq}(T(\vec{x}_1)) + \frac{k_{s,\nu}(\vec{x}_1)}{\hat{k}_{\nu}} \sum_{i=1}^{N_s} \frac{k_{s,i,\nu}(\vec{x}_1)}{k_{s,\nu}(\vec{x}_1)} \int_{4\pi} \Phi_{i,\nu}(\vec{u}_1, \vec{u}_0) L_{\nu}(\vec{x}_1, \vec{u}_1) d\omega(\vec{u}_1) \right. \\
& \left. + \left(1 - \frac{k_{\nu}(\vec{x}_1)}{\hat{k}_{\nu}} \right) L_{\nu}(\vec{x}_1, \vec{u}_0) \right] \mathcal{H}(\vec{x}_1 \in \mathcal{V}) \\
& \left. + \left[\epsilon_{\nu}(x_{int}) L_{\nu}^{eq}(T(x_{int})) + \left(1 - \epsilon_{\nu}(x_{int}) \right) \int_{2\pi} p_{ref,\nu}(\vec{u}_1, \vec{u}_0) L_{\nu}(x_{int}, \vec{u}_1) d\omega(\vec{u}_1) \right] \mathcal{H}(\vec{x}_1 \notin \mathcal{V}) \right\}
\end{aligned} \tag{1}$$

Et l'algorithme de Monte-Carlo utilisé pour calculer la partie diffuse de la luminance dans le cas d'une source externe (solaire) est le suivant : (relation 104 dans [1])

$$\begin{aligned}
L_{diff,\nu}(\vec{x}_0, \vec{u}_0) = & \int_0^{+\infty} \hat{k}_\nu \exp(-\hat{k}_\nu \sigma) d\sigma \left\{ \left[\frac{k_{a,\nu}(\vec{x}_1)}{\hat{k}_\nu} \right]_0 \right. \\
& + \frac{k_{s,\nu}(\vec{x}_1)}{\hat{k}_\nu} \sum_{i=1}^{N_s} \frac{k_{s,i,\nu}(\vec{x}_1)}{k_{s,\nu}(\vec{x}_1)} \left[\int_{\Omega^*} \frac{1}{\Omega^*} d\omega(\vec{u}_1) \left\{ \Phi_{i,\nu}(\vec{u}_1, \vec{u}_0) L_{dir,\nu}(\vec{x}_1, \vec{u}_1) \Omega^* \right\} \right. \\
& + \left. \int_{4\pi} \Phi_{i,\nu}(\vec{u}_1, \vec{u}_0) L_{diff,\nu}(\vec{x}_1, \vec{u}_1) d\omega(\vec{u}_1) \right] \\
& + \left(1 - \frac{k_\nu(\vec{x}_1)}{\hat{k}_\nu} \right) L_\nu(\vec{x}_1, \vec{u}_0) \left. \right] \mathcal{H}(\vec{x}_1 \in \mathcal{V}) \\
& + \left[\epsilon_\nu(x_{int}) 0 + \left(1 - \epsilon_\nu(x_{int}) \right) \left[\int_{\Omega^*} \frac{1}{\Omega^*} d\omega(\vec{u}_1) \left\{ p_{ref,\nu}(\vec{u}_1, \vec{u}_0) L_{dir,\nu}(x_{int}, \vec{u}_1) \Omega^* \right\} \right. \right. \\
& + \left. \left. \int_{2\pi} p_{ref,\nu}(\vec{u}_1, \vec{u}_0) L_{diff,\nu}(x_{int}, \vec{u}_1) d\omega(\vec{u}_1) \right] \right] \mathcal{H}(\vec{x}_1 \notin \mathcal{V}) \left. \right\}
\end{aligned} \tag{2}$$

On ne peut s'empêcher de remarquer la similarité frappante entre ces deux algorithmes ; en effet, dans les deux cas, la partie principale qu'est la génération d'un trajet optique depuis une position sonde $\vec{x}_0$ pour une direction sonde $\vec{u}_0$ est identique :

- échantillonnage d'un libre parcours σ sur $[0, +\infty)$ selon la densité de probabilité $\hat{k}_\nu \exp(-\hat{k}_\nu \sigma)$ et calcul de la position de collision correspondante $\vec{x}_1 = \vec{x}_0 - \sigma \vec{u}_0$;
- dans le cas où la ligne de visée $(\vec{x}_0, -\vec{u}_0)$ ne rencontre pas de paroi avant la position de collision $\vec{x}_1$ (branche bleue), le type de collision est échantillonné au prorata du jeu de probabilités $\left\{ \frac{k_{a,\nu}(\vec{x}_1)}{\hat{k}_\nu} \text{ (absorption)}, \frac{k_{s,\nu}(\vec{x}_1)}{\hat{k}_\nu} \text{ (diffusion)}, 1 - \frac{k_\nu(\vec{x}_1)}{\hat{k}_\nu} \text{ (collision nulle)} \right\}$. Dans le cas d'une diffusion, il reste à échantillonner l'espèce diffusante (gaz / mode d'aérosol) au prorata du jeu de probabilités $\left\{ \frac{k_{s,i,\nu}(\vec{x}_1)}{k_{s,\nu}(\vec{x}_1)}, i = 1, N_s \right\}$ afin de pouvoir accéder à la fonction de phase $\Phi_{i,\nu}(\vec{u}_1, \vec{u}_0)$ de l'espèce en question, qui permettra d'échantillonner la direction de propagation après diffusion $-\vec{u}_1$ à partir de la direction de propagation avant diffusion $-\vec{u}_0$.
- dans le cas où la ligne de visée $(\vec{x}_0, -\vec{u}_0)$ rencontre une paroi (en x_{int}) avant la position de collision $\vec{x}_1$ (branche rouge), le type d'interaction avec la paroi est échantillonné au prorata du jeu de probabilités $\left\{ \epsilon_\nu(x_{int}) \text{ (absorption)}, 1 - \epsilon_\nu(x_{int}) \text{ (réflexion)} \right\}$. En cas de réflexion, il restera à échantillonner une direction de propagation après réflexion $-\vec{u}_1$ selon la BRDF en paroi $p_{ref,\nu}(\vec{u}_1, \vec{u}_0)$.

Tout le code correspondant à la génération de cette trajectoire peut être capitalisé pour les deux algorithmes ! Ce n'est en effet qu'au moment de mettre à jour le poids de la réalisation que les choses diffèrent selon la source :

- dans le cas d'une source interne, le poids de la réalisation est fixé uniquement pour les événements d'absorption : il s'agit de la luminance de corps noir $L_\nu^{eq}(T(\vec{x}_1))$ en volume et $L_\nu^{eq}(T(x_{int}))$ en paroi.
- dans le cas d'une source externe, le poids de la réalisation courant est retourné en cas d'absorption (la réalisation s'arrête), et il doit être augmenté d'une quantité $\int_{\Omega^*} \frac{1}{\Omega^*} d\omega(\vec{u}_1) \left\{ \Phi_{i,\nu}(\vec{u}_1, \vec{u}_0) L_{dir,\nu}(\vec{x}_1, \vec{u}_1) \Omega^* \right\}$ dans le cas d'une diffusion ou d'une quantité $\int_{\Omega^*} \frac{1}{\Omega^*} d\omega(\vec{u}_1) \left\{ p_{ref,\nu}(\vec{u}_1, \vec{u}_0) L_{dir,\nu}(x_{int}, \vec{u}_1) \Omega^* \right\}$ pour une réflexion. Dans les deux cas il s'agit d'échantillonner de façon uniforme une direction $-\vec{u}_1$ dans

l'angle solide Ω^* sous lequel la source est visible depuis la position de collision courante, pour ensuite ajouter au poids de Monte-Carlo courant le terme entre accolades, où $L_{dir,\nu}(\vec{x}, \vec{u}_1)$ est la luminance directe pour la position de collision courante $\vec{x}$, dans la direction $-\vec{u}_1$; l'évaluation de cette luminance fait appel à une réalisation d'un algorithme séparé, consistant à établir une ligne de visée directe entre la position de collision courante $\vec{x}$ et la source, dans la direction $-\vec{u}_1$, pour aller évaluer sa transmissivité. Le calcul en présence d'une source externe fait donc appel à un algorithme de Monte-Carlo séparé, permettant d'évaluer la partie directe de la luminance (=rayonnement n'ayant jamais subi de diffusion) en une position et dans une direction arbitraire. Mais cet algorithme était bien entendu nécessaire, étant donné que la relation 2 ne donne la solution que pour le calcul de la partie diffuse de la luminance (=rayonnement ayant subi au moins une diffusion).

Suite à la prise de conscience sur le fait que la différentiation sur les sources peut n'être réalisée qu'au moment de la mise à jour des poids, un seul algorithme de transfert radiatif a été mis en place dans *TOM* ; les algorithmes de transfert radiatif dans *htrdr-planeto* ont à leur tour été remaniés de façon à ce que tout le code correspondant à la partie commune soit partagé par les deux estimateurs.

6 Tests numériques

Cette partie est consacrée à la description des tests numériques où les résultats de *htrdr-planeto* ont été comparés à ceux de *TOM* (dans les cas où les problèmes sont comparables) et de *planet_EMC*.

6.1 Configuration géométrique

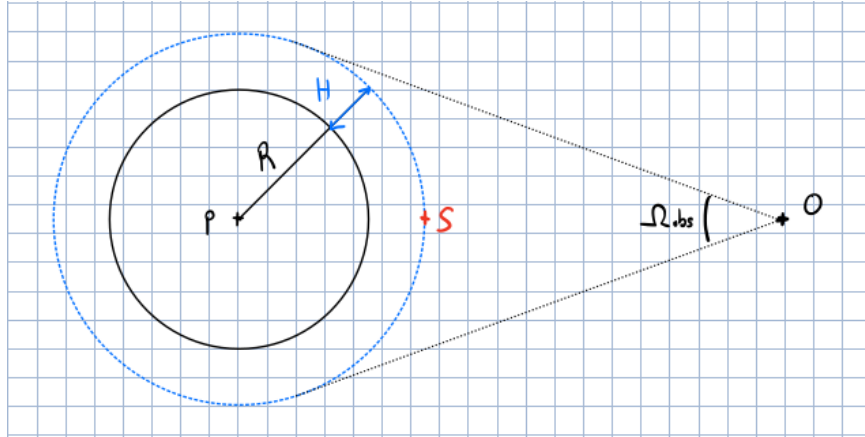


FIGURE 3 – Configuration géométrique pour la majorité des tests

Sauf mention contraire, la grande majorité des tests ont été conduits sur la base de la configuration géométrique présentée en figure 3. La surface de la planète est une sphère de rayon $R = 10^3$ km, et l'atmosphère a une hauteur totale $H = 10^2$ km. Le capteur est placé au point d'observation O, avec une distance $d(OP) = 2.10^4$ km. Son angle d'ouverture permet de récupérer le rayonnement émis / réfléchi par l'ensemble de la surface et de l'atmosphère. Pour les applications solaires, le point sub-solaire S est situé sur le segment OP, et la source elle-même est représentée par une sphère de rayon $6,96.10^5$ km, située à 10^6 km, et rayonnant à une température de brillance de 5773 K (certains tests ont été réalisés avec un spectre

de radiance à haute résolution). La grandeur calculée est la puissance totale reçue par le capteur virtuel, dans l'angle solide d'observation [$W.m^{-2}$].

6.2 Sol parfaitement noir uniquement

Plage d'intégration spectrale : [250, 350] nm ; le sol est une sphère parfaitement absorbante dans l'intervalle spectral d'intégration, et il n'y a ni mélange de gaz, ni aérosols. La puissance calculée par les trois codes est nulle.

6.3 Sol parfaitement réfléchissant uniquement

Plage d'intégration spectrale : [250, 350] nm ; le sol est une sphère parfaitement réfléchissante dans l'intervalle spectral d'intégration, et il n'y a ni mélange de gaz, ni aérosols.

- *TOM* : $3229.8 \pm 0.7 W.m^{-2}$
- *planet_EMC* : $3226.5 \pm 0.5 W.m^{-2}$
- *htrdr-planeto* : $3216.9 \pm 0.75 W.m^{-2}$

L'origine des différences observées est dans ce cas le fait que les différents codes ne résolvent pas le même modèle physique : tandis que *TOM* et *planet_EMC* calculent le rayonnement solaire réfléchi par une sphère parfaite dans l'angle solide du capteur, *htrdr-planeto* résout la même quantité pour une sphère discrétisée en facettes triangulaires. La puissance calculée par *htrdr-planeto* lorsqu'on multiplie le nombre de facettes par 100 devient $3222 \pm 0.75 W.m^{-2}$.

6.4 Sol et atmosphère purement absorbante homogène

Plage d'intégration spectrale : [250, 350] nm ; le sol est une sphère parfaitement réfléchissante dans l'intervalle spectral d'intégration. Le mélange de gaz est caractérisé par un coefficient d'absorption $k_a = 10^{-5}m^{-1}$ et un coefficient de diffusion $k_s = 0m^{-1}$ (milieu gris et homogène). Une seule maille de gaz est utilisée entre le sol et l'altitude de sommet de l'atmosphère (100 km).

- *TOM* : $241.89 \pm 0.6 W.m^{-2}$
- *planet_EMC* : $241.96 \pm 0.25 W.m^{-2}$
- *htrdr-planeto* : $241.70 \pm 0.60 W.m^{-2}$

Les différences sont totalement gommées par les barres d'erreur : à ce stade, les trois codes donnent le même résultat.

6.5 Sol et atmosphère purement absorbante hétérogène

Plage d'intégration spectrale : [250, 350] nm ; le sol est une sphère parfaitement réfléchissante dans l'intervalle spectral d'intégration. Le mélange de gaz est caractérisé par un coefficient d'absorption gris, mais décroissant avec l'altitude (entre $10^{-5}m^{-1}$ au sol et 0 au sommet de l'atmosphère) et un coefficient de diffusion $k_s = 0m^{-1}$. Une centaine de mailles sont utilisées dans *TOM* et *planet_EMC* afin d'approximer le profil linéaire par une succession de mailles homogènes. Dans *htrdr-planeto*, une première discrétisation en longitude / latitude / altitude est utilisée, avant de discrétiser chacune des mailles "gcm" ainsi obtenues en 6 tétraèdres.

- *TOM* : $837.0 \pm 1.3 W.m^{-2}$
- *planet_EMC* : $837.6 \pm 0.75 W.m^{-2}$

— *htrdr-planeto* : $834.6 \pm 0.53 \text{ W.m}^{-2}$

Même si les différences sont comprises dans l'incertitude numérique (somme des barres d'erreur x3) on peut estimer qu'on observe l'effet de la discrétisation de l'atmosphère en mailles homogènes dans *TOM* et *planet_EMC*.

6.6 Sol et atmosphère absorbante et diffusante hétérogène

Plage d'intégration spectrale : [250, 350] nm ; le sol est une sphère parfaitement réfléchissante dans l'intervalle spectral d'intégration. Le mélange de gaz est caractérisé par un coefficient d'absorption gris, décroissant avec l'altitude (entre 10^{-5} m^{-1} au sol et 0 au sommet de l'atmosphère) et un coefficient de diffusion gris, décroissant avec l'altitude (entre 2.10^{-5} m^{-1} au sol et 0 au sommet de l'atmosphère). Un seul niveau de tétraèdres est utilisé dans *htrdr-planeto* pour couvrir toute la hauteur de l'atmosphère, tandis qu'une centaine de mailles sont utilisées dans *TOM* et *planet_EMC* afin d'approximer le profil linéaire par une succession de mailles homogènes.

— *TOM* : $1237.4 \pm 1.3 \text{ W.m}^{-2}$

— *htrdr-planeto* : $1235.4 \pm 0.4 \text{ W.m}^{-2}$

Les différences sont là aussi dues à la discrétisation des profils linéaires de propriétés radiatives par une succession de mailles atmosphériques homogènes dans *TOM*.

6.7 Premier test d'intégration spectrale

Juste là, nous effectuons les tests sur un seul intervalle spectral, et un unique point de quadrature. Ce cas reprend exactement la configuration précédente, en utilisant $N_q=4$ points de quadrature. Une dépendance des coefficients radiatifs au point de quadrature est ajoutée.

— *TOM* : $1812.6 \pm 2.0 \text{ W.m}^{-2}$

— *htrdr-planeto* : $1804.0 \pm 0.5 \text{ W.m}^{-2}$

Si on impose un sol parfaitement absorbant :

— *TOM* : $1182.3 \pm 1.4 \text{ W.m}^{-2}$

— *htrdr-planeto* : $1180.8 \pm 0.9 \text{ W.m}^{-2}$

On a donc à la fois un effet du à la discrétisation de l'atmosphère en maillages homogènes dans *TOM*, mais également un effet du à la discrétisation du sol en triangles dans *htrdr-planeto*.

6.8 Intégration spectrale multi-intervalles

La plage d'intégration spectrale est maintenant constituée de deux intervalles : [250, 350] nm et [350, 450] nm. Un unique point de quadrature est utilisé dans chaque intervalle. Les propriétés optiques suivent toujours un profil linéaire en fonction de l'altitude (le coefficient de diffusion reste deux fois plus élevé que le coefficient d'absorption), et on introduit également une dépendance à la longueur d'onde.

Intervalle [250, 350] nm :

— *TOM* : $1409.4 \pm 1.6 \text{ W.m}^{-2}$

— *htrdr-planeto* : $1407.0 \pm 1.21 \text{ W.m}^{-2}$

Intervalle [350, 450] nm :

— *TOM* : $2272.30 \pm 2.6 \text{ W.m}^{-2}$

— *htrdr-planeto* : $2272.66 \pm 3.9 \text{ W.m}^{-2}$

Intervalle total [250, 450] nm :

— *TOM* : $3681.5 \pm 13 \text{ W.m}^{-2}$

— *htrdr-planeto* : $3684.6 \pm 6 \text{ W.m}^{-2}$

Lorsqu'on utilise un ordre de quadrature $N_q=4$, on obtient :

Intervalle total [250, 450] nm et sol réfléchissant :

— *TOM* : $5342.4 \pm 6 \text{ W.m}^{-2}$

— *htrdr-planeto* : $5322.3 \pm 8 \text{ W.m}^{-2}$

Intervalle total [250, 450] nm et sol noir :

— *TOM* : $3331 \pm 4 \text{ W.m}^{-2}$

— *htrdr-planeto* : $3317 \pm 2 \text{ W.m}^{-2}$

On a donc là encore des effets combinés de la discrétisation de l'atmosphère et de la discrétisation du sol.

6.9 Présence d'un aérosol absorbant

A la configuration précédente (intégration sur [250, 450] nm et ordre de quadrature=4, sol réfléchissant, coefficients d'absorption et de diffusion du mélange de gaz linéaires décroissants en fonction de l'altitude) on rajoute un aérosol gris purement absorbant ($k_a = 10^{-4} \text{ m}^{-1}$, $k_s = 0 \text{ m}^{-1}$) pour la dixième maille atmosphérique (entre 9 et 10 km d'altitude).

— *TOM* : $4616 \pm 5 \text{ W.m}^{-2}$

— *planet EMC* : $4602 \pm 3 \text{ W.m}^{-2}$

— *htrdr-planeto* : $4613 \pm 4 \text{ W.m}^{-2}$

Les différences entre les trois codes sont noyées dans leurs barres d'erreur respectives.

6.10 Présence d'un aérosol absorbant et diffusant

Par-rapport au test précédent, l'aérosol est maintenant diffusant : $k_a = 10^{-6} \text{ m}^{-1}$, $k_s = 2.10^{-6} \text{ m}^{-1}$, $g = 0.5$

— *TOM* : $4207 \pm 16 \text{ W.m}^{-2}$

— *htrdr-planeto* : $4204 \pm 4 \text{ W.m}^{-2}$

Là encore les résultats sont identiques aux barres d'erreur près.

6.11 Nuage localisé

Dans ce test, le profil des propriétés radiatives du mélange de gaz ne changent pas. Le nuage est maintenant localisé : entre 0 et 45° de longitude, entre -45° et 45° de latitude, et entre 20 et 80 km d'altitude. Les propriétés spectrales du nuage restent inchangées. Le code *TOM* ne peut plus être utilisé pour cette configuration.

— *planet EMC* : $6493 \pm 5 \text{ W.m}^{-2}$

— *htrdr-planeto* : $6447 \pm 9 \text{ W.m}^{-2}$

Passage à un intervalle d'intégration couvrant toute la plage du visible : [250, 850] nm composé de 6 bandes étroites (de largeur 100 nm chacune, ordre de quadrature=4).

— *planet EMC* : $20214 \pm 17 \text{ W.m}^{-2}$

— *htrdr-planeto* : $20063 \pm 32 \text{ W.m}^{-2}$

Les résultats restent compatibles dans la limite de 3 fois les barres d'erreur combinées (standard Monte-Carlo) même s'il commence à être évident que *htrdr-planeto* affiche systématiquement des résultats plus

faibles que ceux de *planet_EMC*. Le test suivant confirmera cette tendance sur une configuration plus complexe, et l'origine du biais sera expliquée.

6.12 Test du modèle complet

Ce dernier test combine toute la complexité du modèle physique traité par *htrdr-planeto* : l'intervalle d'intégration est toujours le visible [250, 850] nm, composé de 6 bandes étroites à ordre de quadrature = 4, et les propriétés radiatives du mélange de gaz restent linéaires avec l'altitude, pour chaque point de quadrature (le coefficient de diffusion est toujours deux fois plus important que le coefficient de diffusion). Trois modes d'aérosol se recouvrant spatialement sont ajoutés à la configuration :

- Aérosol 1 : $[-45, 45]^\circ$ de latitude, $[-45, 45]^\circ$ de longitude, [20, 80] km d'altitude ; $k_a = 10^{-6}m^{-1}$, $k_s = 2.10^{-6}m^{-1}$, $g = 0.2$.
- Aérosol 2 : $[0, 90]^\circ$ de latitude, $[0, 90]^\circ$ de longitude, [30, 40] km d'altitude ; $k_a = 2.10^{-6}m^{-1}$, $k_s = 10^{-6}m^{-1}$, $g = -0.3$.
- Aérosol 3 : $[-90, 0]^\circ$ de latitude, $[-90, 0]^\circ$ de longitude, [50, 70] km d'altitude ; $k_a = 10^{-7}m^{-1}$, $k_s = 3.10^{-6}m^{-1}$, $g = 0.7$.

Résultats :

- *planet_EMC* : $19632 \pm 16 \text{ W.m}^{-2}$
- *htrdr-planeto* : $19421 \pm 15 \text{ W.m}^{-2}$

On remarque cette fois-ci une différence entre les deux résultats (211 W.m^{-2}) qui ne peut pas être comblée par 3x les barres d'erreur combinées (93 W.m^{-2}). Le même test a été effectué en ne laissant que le mélange de gaz :

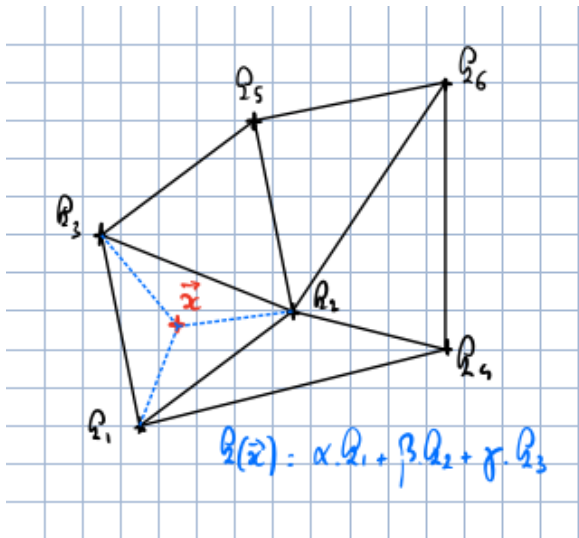
- *planet_EMC* : $20744 \pm 17 \text{ W.m}^{-2}$
- *htrdr-planeto* : $20671 \pm 16 \text{ W.m}^{-2}$

Cette fois-ci la différence entre les résultats (73 W.m^{-2}) s'efface devant l'incertitude numérique (99 W.m^{-2}). Mais le fait que *htrdr-planeto* affiche toujours un résultat inférieur à celui de *planet_EMC* laisse supposer qu'il y a un biais systématique entre les deux codes. Ce biais est expliqué ci-dessous :

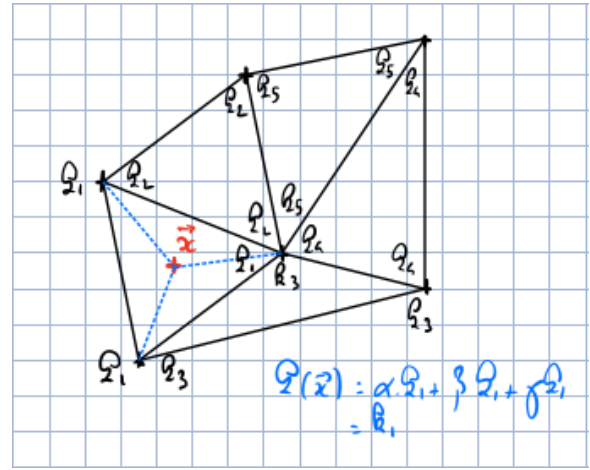
En plus des différences dues à la discrétisation du sol en facettes triangulaires, on peut s'attendre, dans le cas d'une atmosphère hétérogène, à observer des différences dues à l'utilisation d'un maillage volumique tétraédrique. Ces différences sont de deux ordres :

- le premier concerne le fait que *TOM* et *planet_EMC* sont basés sur l'utilisation de mailles atmosphériques homogènes. Or, dans *htrdr-planeto*, les propriétés du milieu semi-transparent pour une position arbitraire sont interpolées parmi les propriétés imposées aux noeuds des tétraèdres. Si on utilise un maillage tétraédrique où chaque noeud est commun à plusieurs tétraèdres, il est impossible d'obtenir des propriétés radiatives uniformes dans un quelconque tétraèdre. Deux solutions ont été trouvées pour contourner cette limitation : d'une part, imposer un profil de propriétés radiatives linéaire avec l'altitude dans *htrdr-planeto*, et utiliser d'autre part un grand nombre de mailles atmosphériques (homogènes) dans *TOM* et *planet_EMC* de façon à tenter d'approximer ce profil linéaire. Cette solution atteint vite des limites, notamment dans *planet_EMC* qui est très gourmand en mémoire vive, et qui ne peut pas utiliser un maillage volumique très raffiné.² La seconde solution a demandé plus de travail : il s'agit de créer un maillage tétraédrique pour *htrdr-planeto* où chaque tétraèdre est défini par 4 noeuds indépendants des autres tétraèdres (voir figure 4). Dans cette version du maillage, les noeuds ne sont pas partagés entre tétraèdres ; il est donc possible d'imposer

2. A moins de diminuer au maximum la taille mémoire des autres tableaux principaux, ce qui demande un peu de jonglerie.



(a) Dans un maillage tétraédrique classique, les noeuds sont partagés entre plusieurs tétraèdres. La valeur d'une propriété en une position $\vec{x}$ donnée étant interpolée à partir des valeurs fournies aux noeuds, il est impossible d'obtenir des tétraèdres homogènes.



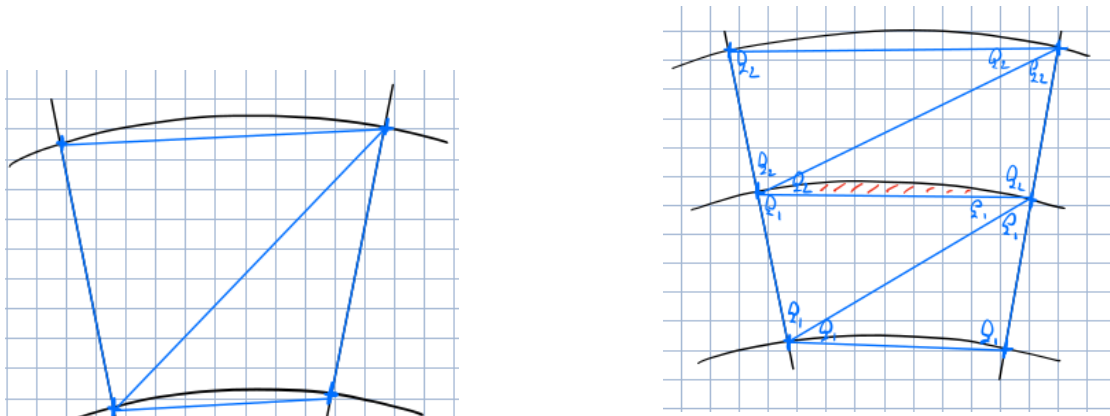
(b) Une solution est de définir un maillage où chaque tétraèdre utilise des noeuds indépendants (non partagés avec d'autres tétraèdres). Il est ainsi possible de définir les mêmes valeurs de la propriété pour tous les noeuds de chaque tétraèdre. L'interpolation se traduira par des tétraèdres homogènes.

FIGURE 4 – Contournement permettant d'obtenir des zones homogènes de l'espace.

les mêmes valeurs de la propriété radiative aux 4 noeuds de chaque tétraèdre, et ainsi d'obtenir des tétraèdres parfaitement homogènes. Ce qui permet de s'approcher au plus près du modèle physique basé sur des mailles atmosphériques homogènes.

- le second est également lié à l'utilisation d'un maillage tétraédrique : dans *TOM*, les mailles sont des portions de volume comprises entre deux sphères concentriques. Dans *planet_EMC*, les mailles sont des morceaux de colonne longitude/latitude, dont les frontières horizontales sont des morceaux de sphères (mailles de type "GCM"). Dans *htrdr-planeto*, ce sont les tétraèdres qui font office de mailles volumiques. Les outils produisant la donnée d'entrée de *htrdr-planeto* (*spherical_mesh*, *GCM2htrdr* et désormais *TOM* et *planet_generator*) discrétisent une maille de type "GCM" en 6 tétraèdres. Il y a donc nécessairement une différence entre le volume défini par ces 6 tétraèdres et le volume de la maille initiale (cf. figure 5a). De plus, même en utilisant un maillage où chaque tétraèdre est défini par 4 noeuds indépendants (non partagés avec d'autres tétraèdres) afin de définir des tétraèdres homogènes, le volume compris entre le morceau de sphère définissant l'interface supérieure de la maille originale et les triangles définissant la limite supérieure des tétraèdres, se trouve affecté des propriétés radiatives de la maille du dessus (cf. figure 5b). On n'a pas une stricte équivalence entre les modèles physiques résolus par *planet_EMC* et *htrdr-planeto*.

Quoi qu'il en soit, même dans la configuration la plus exigeante (intégration sur plusieurs bandes étroites / ordre de quadrature non trivial / mélange de gaz hétérogène et 3 modes d'aérosol absorbants et diffusants, se recouvrant partiellement), les résultats de *htrdr-planeto* et *planet_EMC* sont de l'ordre du pourcent, avec des barres d'erreur poussées à un pour mille du résultat (si les barres d'erreur n'étaient que de 1 pourcent, la différence de résultats entre les deux codes serait passée inaperçue). Il n'est pas possible de pousser beaucoup plus loin la validation étant donné que les deux codes utilisent des modèles physiques différents ; nous considérons que *htrdr-planeto* donne des résultats pertinents, dans le cadre de son modèle



(a) Discrétisation d’une maille de type “GCM” (utilisée par exemple dans le formalisme de *planet EMC*) en plusieurs tétraèdres ; il est impossible de suivre parfaitement la courbure des interfaces horizontales de la maille (morceaux de sphère).

(b) Cette discrétisation a un effet pervers, même en utilisant un maillage tétraédrique permettant de définir des tétraèdres homogènes : la partie du volume (ici hachurée en rouge) comprise entre l’interface sphérique supérieure de la maille “GCM” et le plan définissant l’interface supérieure du groupe de tétraèdres défini pour cette maille, se trouve affectée avec les propriétés de la maille GCM du dessus (k_2 dans cette figure).

FIGURE 5 – Différences entre un maillage GCM et un maillage tétraédrique.

physique propre utilisant un maillage surfacique triangulaire et des maillages volumiques tétraédriques.

6.13 Utilisation d’un spectre haute résolution de radiance solaire

Tous les résultats précédents ont été obtenus dans le cadre d’une source de rayonnement externe au système. Cette source utilisait une distribution de Planck à 5773 K. Ce test a été réalisé sur la plage du visible entière (6 bandes sur [250, 850] nm, ordre de quadrature=4), en présence du mélange de gaz utilisé pour les dernières configurations, et d’un unique aérosol recouvrant toute l’atmosphère. Le test a été réalisé avec deux fichiers de description de la luminance solaire : le premier utilisant les données de Kurudz, et le second utilisant un spectre de radiance solaire “lite” envoyé par B. Bézard. Dans les deux cas, les codes *TOM* et *planet EMC* donnent le même résultat aux barres d’erreur près, tandis que *htrdr-planeto* affiche une différence de l’ordre du pourcent. Evidemment, l’origine du biais observé, qui est décrite lors du test précédent, n’est que purement géométrique. La distribution spectrale de luminance solaire n’affectera pas “l’effet de maillage” observé sur les images, et à l’origine du biais.

6.14 Source de rayonnement interne

L’intégralité des résultats précédents a été obtenue pour une source de rayonnement externe. Ce dernier test permet de comparer les puissances reçues par le capteur dans l’angle solide d’observation pour le rayonnement interne du système surface + atmosphère, sur la plage [10, 22] μm (les températures sont typiquement de l’ordre de 300 K) sur 6 bandes étroites, avec un ordre de quadrature = 4 :

— *planet EMC* : $0.2963 \pm 3.10^{-4} \text{ W.m}^{-2}$

— *htrdr-planeto* : $0.2928 \pm 7.10^{-4} \text{ W.m}^{-2}$

La différence entre les résultats ($2,5.10^{-3} \text{ W.m}^{-2}$) pourrait être absorbée par l’incertitude numérique ($3.10^{-3} \text{ W.m}^{-2}$) mais on devine que le même biais que pour la source externe, due à la différence de modèle physique, est à l’origine de cette différence. Etant donné que la différentiation entre les sources dans *htrdr-planeto* se fait désormais au moment d’évaluer les poids de MC, avec un unique algorithme de transfert radiatif (voir partie 5), cet unique test valide *htrdr-planeto* pour une source de rayonnement interne au système.

7 planet_generator

Comme annoncé sur Slack, il restait à tester la capacité de *htrdr-planeto* à pouvoir traiter un jeu de données de taille importante. A cette fin, le programme *planet_generator* a été développé afin de produire un jeu de données de façon procédurale, du moins en ce qui concerne la géométrie du sol. Les propriétés radiatives du mélange de gaz sont celles de l’atmosphère terrestre.

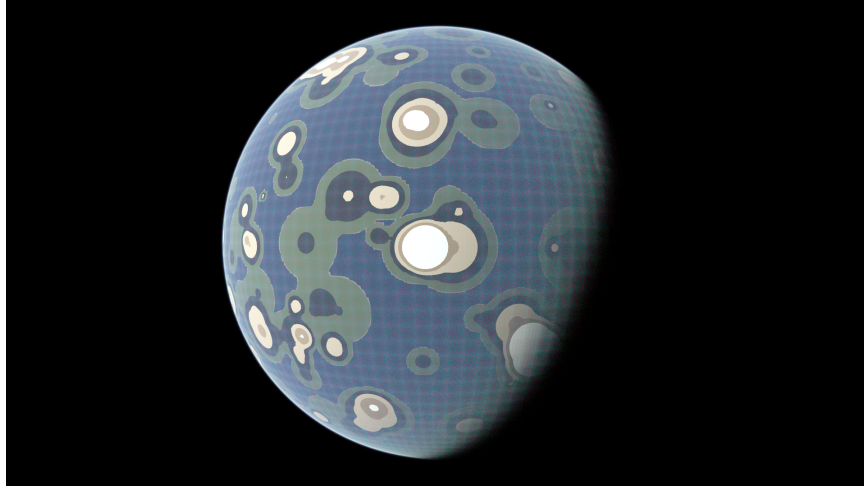


FIGURE 6 – Rendu d’une scène produite par *planet_generator* dans le visible [380, 780] nm ; la résolution du capteur est 1920x1080 pixels, et 512 réalisations ont été utilisées pour chaque pixel. Temps de rendu : 1h 30mins sur 12 threads. Les cinq matériaux utilisés sont attribués en fonction de l’altitude de la facette (sable, herbe, forêt, terre battue, sable désertique, neige). L’effet de maillage apparaissant sur l’image est expliqué dans cette partie.

En ce qui concerne le sol, l’idée est de partir d’une sphère, et d’appliquer itérativement un nombre donné de perturbations sur l’orographie (perturbations dont la position, l’amplitude et la dimension sont échantillonnées de façon aléatoire). A l’issue de ce processus, l’altitude des divers points est recalée pour que l’altitude maximale ne dépasse pas une valeur maximale imposée (correspondant à la hauteur d’échelle pour la planète en question). Des matériaux sont ensuite appliqués en fonction de l’altitude de chaque facette triangulaire. Enfin, un ensemble de triangles à altitude nulle, et munis du matériau “eau”, est rajouté à l’ensemble pour simuler la surface des océans.³ Il est possible de rajouter des “décorations” à l’ensemble : rochers, arbres, maisons individuelles, villes, lapins et thérières [2]. Ce mécanisme n’a été utilisé que pour

3. La géométrie est donc prête à être utilisée s’il fallait réaliser le transfert radiatif dans les océans.

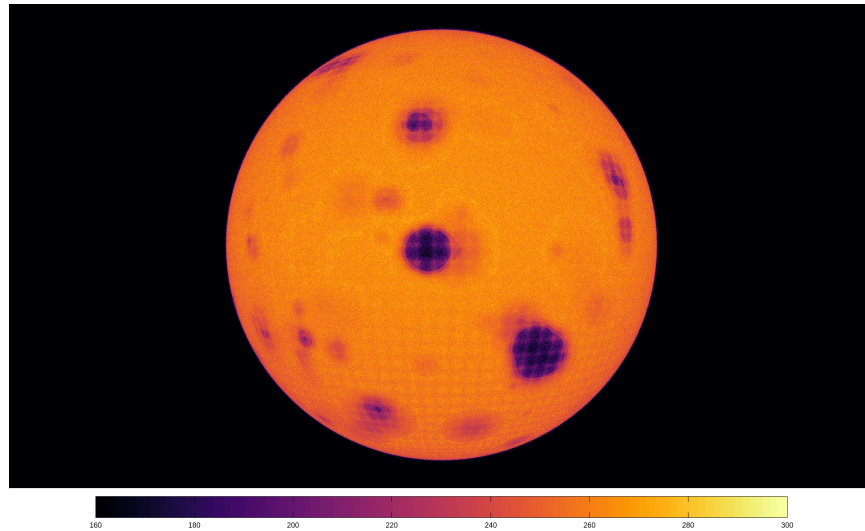


FIGURE 7 – Rendu de la même scène dans la fenêtre de transparence LW $[10, 12] \mu\text{m}$; la résolution du capteur est 1920×1080 pixels, et 16 réalisations ont été utilisées pour chaque pixel. Temps de rendu : 4h 40mins sur 12 threads. L’altitude maximale du relief a été fixée à 8 km, avec un taux de refroidissement adiabatique de 15 K/km. La température de surface la plus basse de cette scène est 143 K. L’échelle de couleur représente la température de brillance mesurée par le capteur. L’effet de maillage apparaissant sur l’image est expliqué dans cette partie.

rajouter une lune. Actuellement, la température de chaque facette triangulaire de la partie principale (hors lune) ne dépend que de son altitude, il serait facile d’imaginer plus compliqué.

En ce qui concerne l’atmosphère, elle ne comporte actuellement qu’un mélange de gaz. Essentiellement car nous n’avons aucune idée de comment générer procéduralement un champ de concentration de gouttelettes réaliste, hors le nuage “uniforme”. Pour la partie SW $[0.2, 4] \mu\text{m}$, un jeu de données CK issu du code ECRAD⁴ a été utilisé pour tous les noeuds du maillage tétraédrique (sur 14 bandes spectrales à ordre de quadrature variable, pour un total de 114 points de quadrature). Dans le LW $[4, 100] \mu\text{m}$, les jeux de données en k-distribution de 5 profils atmosphériques standard (Mid-Latitude Summer, Mid-Latitude Winter, Sub-Arctic Summer, Sub-Arctic Winter et Tropical) pour 130 intervalles spectraux et un ordre de quadrature constant égal à 16, ont été utilisés pour interpoler linéairement la k-distribution locale de chaque noeud du maillage tétraédrique en fonction de la latitude.

On peut voir sur les images (figures 6 et 7) un “maillage” longitude/latitude apparaître. Il correspond à la résolution en longitude/latitude utilisée pour produire les mailles de type GCM qui sont ensuite subdivisées en tétraèdres. L’origine de cet artefact visuel se trouve une fois de plus dans l’utilisation d’un maillage tétraédrique : la figure 5b montre qu’une zone spatiale située entre la calotte sphérique délimitant le haut d’une maille GCM et les plans délimitant le haut des tétraèdres pour cette maille GCM, se trouve affectée des propriétés radiatives de la maille GCM supérieure (donc, à priori, plus faibles). En termes d’épaisseur optique, les lignes de visée (partant du capteur) passant par le milieu d’une maille GCM auront une épaisseur optique légèrement plus faible que les lignes de visée passant par les bords. Dans la partie solaire, c’est la différence d’épaisseur optique de diffusion qui crée l’effet visuel ; pour l’image thermique, c’est cette fois-ci la différence sur l’épaisseur optique d’absorption qui crée localement des lignes

4. <https://confluence.ecmwf.int/display/ECRAD>

de visée pour lesquelles le rayonnement perçu provient de plus haut dans l’atmosphère, ce qui se traduit par une température de brillance plus faible. Le flux total collecté par le capteur a par ailleurs été validé au poucent : cet artefact a donc peu d’effet une fois intégré sur tout l’intervalle spectral, mais laisse une signature visible sur l’image. Il faudrait augmenter la résolution du maillage tétraédrique pour le rendre moins visible.

FIGURE 8 – Animation produite à partir de 484 rendus dans le visible [380, 780] nm ; la résolution du capteur est 640x480 pixels, et 128 réalisations ont été utilisées pour chaque pixel.

Le jeu de données utilisé pour réaliser les images 6 et 7 ainsi que la petite vidéo de la figure 8 comporte :

- 882094 facettes triangulaires, pour 490420 noeuds
- 4838400 tétraèdres, pour 814666 noeuds

La taille des fichiers d’entrée nécessaires à *htrdr-planeto* afin de réaliser un calcul est de 5.7 Go. Il serait facile d’augmenter la résolution spatiale de la surface et/ou du maillage volumique, mais la production des fichiers de données demande en l’état déjà plus de temps qu’un calcul de transfert radiatif, même ambitieux en nombre de réalisations. Les calculs de transfert radiatif avec ce type de configuration ne pose aucun problème : de quelques minutes pour un capteur basse résolution, jusqu’à potentiellement quelques heures lorsque la résolution du capteur et/ou le nombre de réalisations par pixel augmentent. Un travail spécifique sur les performances du code reste nécessaire, mais il est doré et déjà possible de penser que, comme pour *htrdr-atmosphere* ou *htrdr-combustion*, le temps de calcul est indépendant de la quantité de données fournies en entrée. Il est cependant nécessaire de lire les fichiers d’entrée, et il faut donc que la machine de calcul dispose d’une quantité de mémoire vive égale à la taille totale des fichiers de données, plus la quantité de mémoire nécessaire pour stocker les octree (structures accélératrices) nécessaires au calcul. Ces structures sont produites par le code lorsqu’il rencontre pour la première fois une nouvelle configuration, et stockées sur disque pour pouvoir être réutilisées afin de réaliser des calculs supplémentaires sur la même configuration.

Références

- [1] Meso-Star. Monte Carlo algorithms for radiative transfer simulations. *Internal documentation*, 2022.
- [2] Najda Villefranque, Frédéric Hourdin, Louis d’Alençon, Stéphane Blanco, Olivier Boucher, Cyril Caillot, Christophe Coustet, Jérémie Dauchet, Mouna El Hafi, Vincent Eymet, Olivier Farges, Vincent Forest, Richard Fournier, Jacques Gautrais, Valéry Masson, Benjamin Piaud, and Robert Schoetter. The teapot in a city : A paradigm shift in urban climate modeling. *Science Advances*, 8(27), 2022. URL : <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/sciadv.abp8934>, arXiv:<https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/sciadv.abp8934>, doi:10.1126/sciadv.abp8934.