

Paramétrisations radiatives en puissances nettes échangées pour le rayonnement infrarouge dans les atmosphères planétaires

N. Meilhac^{1*}, V. Eymet¹, S. Blanco¹, R. Fournier¹

¹ Laboratoire PLAsma et Conversion de l'Energie (LAPLACE) UMR 5213 - Université Paul Sabatier
118 route de Narbonne - 31062 Toulouse Cedex

*(auteur correspondant : nicolas.meilhac@laplace.univ-tlse.fr)

Résumé - Ce travail porte sur le calcul radiatif pour des atmosphères avec un profil de température donné. Nous utilisons une formulation des transferts radiatifs atmosphériques en termes d'échanges nets, qui présente des avantages pour le développement de paramétrisations du transfert radiatif dans les modèles de circulation générale atmosphérique, car chaque échange net peut être calculé par un modèle différent, sans contrainte de cohérence, tout en satisfaisant la conservation de l'énergie et le second principe. Des exemples d'applications sont présentés pour les atmosphères de la Terre, de Mars et de Vénus.

Nomenclature

B	Luminance de Planck	μ	cosinus de l'angle azimuthal
F	Flux	Γ	espace des trajets optiques permettant de relier deux positions
k_a	coefficient d'absorption	ν	nombre d'onde
m	Nombre de mailles de gaz de l'atmosphère	$\delta\tau$	épaisseur optique
<i>Symboles grecs</i>		<i>Indices et exposants</i>	
Ψ	Puissance Nette Echangée (PNE) entre deux éléments	+	flux ascendant
Φ	Puissance émise par un élément et absorbée par un autre	-	flux descendant
ζ	Bilan radiatif	net	flux net
ξ	facteur optico-géométrique	i	élément de paroi ou volume de gaz
		j	élément de paroi ou volume de gaz

1. Introduction

Différentes paramétrisations radiatives ont été proposées récemment pour les atmosphères terrestre, martienne et vénusienne sur la base d'une formulation en puissances nettes échangées (PNE). Dans une telle formulation, la puissance radiative émise par un élément et absorbée par un autre est considérée de manière simultanée avec l'échange réciproque : le modèle physique proposé concerne directement l'échange net entre les deux éléments. Cette formulation présente l'inconvénient de ne pas permettre la quantification des flux radiatif, ce qui complexifie les validations avec les données expérimentales. Elle a par contre un intérêt très fort en terme de paramétrisation : des modèles physiques très différents peuvent être utilisés pour le calcul de chaque PNE sans aucune violation ni de la conservation de l'énergie, ni du second principe de la Thermodynamique. Ces deux points sont assurés par la formulation elle-même et sont préservés lors du passage au numérique. Sur la base d'une formulation en PNE, il est donc possible d'utiliser des modèles physiques correspondant à des niveaux d'approximation très différents en fonction du rôle de la PNE considérée. Dans cette article, différentes paramétrisations basées sur le formalisme en PNE sont présentées.

2. Formulation en Puissance Nette Échangée (PNE)

La formulation en puissances nettes échangées fut proposée par Green en 1967 [1]. Pour deux éléments i et j d'un système, la PNE entre ces deux éléments est la puissance radiative émise par i et absorbée par j , moins la puissance radiative émise par j et absorbée par i : $\Psi_{i,j} = \Phi_{i \rightarrow j} - \Phi_{j \rightarrow i}$. Ces puissances radiatives Φ ne sont jamais dissociées. Après avoir déterminé toutes les PNE entre les différents éléments, on obtient une matrice qui traduit les redistributions d'énergie entre les éléments (fig 2). Le bilan radiatif de l'élément i peut alors être vu comme la PNE entre i et le reste du système : $\zeta_i = \sum_j \Psi_{i,j}$. Le taux de chauffage i est calculé à partir de ce bilan radiatif (fig 2).

Joseph et Bursztyjn [2] furent les premiers à appliquer la formulation en PNE pour l'atmosphère terrestre. Leur analyse montra que seuls $\Psi_{i,sol}$ (l'échange net entre i et le sol) et $\Psi_{i,esp}$ (entre i et l'espace) sont dominants dans le calcul du bilan radiatif. Plus récemment, il a été montré que les échanges nets de proximité (entre couches adjacentes) sont également dominants, dans le cas de l'atmosphère terrestre. Dans le domaine des sciences pour l'ingénieur, Modest [3] fit une application de cette formulation lors de l'établissement de la méthode des zones. Des utilisations récentes de ce formalisme ont enfin été proposées pour l'optimisation des algorithmes de Monte-Carlo [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]

Cette formulation ne donne pas accès aux flux ascendant F^+ et descendant F^- . Cependant, la formulation en PNE donne accès aux flux nets : $F^{net}(z) = F^+(z) - F^-(z)$, qui peut être interprété comme la PNE entre la zone située au-dessus de z et la zone située en-dessous de z :

$$F_i^{net} = \sum_{j=i+1}^{m+1} \sum_{p=0}^i \Psi_{j,p}$$

2.1. Intérêt en terme de paramétrisation

Le choix d'un modèle physique pour l'estimation d'une PNE est totalement indépendant des choix effectués pour les autres PNE ; il n'existe aucune contrainte de cohérence entre les différents modèles physiques retenus. Par exemple, dans le calcul d'une $\Psi_{i,j}$ entre deux éléments éloignés, la probabilité pour qu'un photon émis dans i soit absorbé par j est indépendante de la position d'émission (dans i), mais aussi de la position d'absorption (dans j). Pour le calcul de cette PNE, on peut considérer constant le profil de température sous-maille (ne retenir que la moyenne de la température). Cependant, pour le calcul de la PNE entre deux mailles adjacentes $\Psi_{i,i+1}$, il est essentiel de représenter correctement le profil de température sous-maille, notamment aux fréquences où le milieu est optiquement épais. En particulier dans ce cas, seuls les photons émis à proximité de l'interface pourront permettre un échange d'énergie entre les deux mailles de gaz. En pratique, lorsqu'il s'agit de calculer $\Psi_{i,i+1}$, le profil de température doit être considéré comme continu, et continuellement dérivable, aux interfaces. Au même instant, une couche i peut donc être supposée isotherme pour une partie du calcul, et non isotherme dans une autre partie du calcul. En suivant la règle simple $\Psi_{i,j} = -\Psi_{j,i}$ (par définition), quelle que soit la précision numérique requise sur chaque PNE, de telles incohérences ne violent en aucun cas la conservation de l'énergie, ni le second principe. Même pour un grand nombre d'appels au rayonnement, l'énergie du système est donc strictement conservée et aucun flux pathologique (allant des zones froides vers les zones chaudes) n'est observé.

Pour construire une paramétrisation atmosphérique, la première étape correspond à un calcul précis des matrices de PNE correspondant à différents profils de référence. Dans un second temps, l'analyse quantitative de ces matrices permet de faire le choix de la paramétrisation, c'est à dire le choix des modèles physiques et des approximations numériques pour le calcul de chaque PNE, indépendamment pour chaque famille de PNE.

Pour le calcul des matrices de référence, un modèle standard est utilisé : l'atmosphère est découpée en mailles soumises à l'hypothèse de couche plan-parallèle ; le spectre infrarouge est découpé en bandes de largeur $\Delta\nu_m$ telles que la luminance noire soit considérée comme constante sur $\Delta\nu_m$ (hypothèse de bande étroite). Le sol et l'espace sont assimilés à des surfaces grises par bande et une base de donnée k-corrélés est utilisée pour l'intégration fréquentielle. A titre indicatif, dans le cas d'un milieu non diffusant, la PNE monochromatique $\Psi_{i,j,\nu}$ entre deux mailles de gaz est donnée par :

$$\Psi_{i,j,\nu} = (2\pi) \int_0^1 \mu d\mu \int_{z_{i-1}}^{z_i} k_a(z)_\nu \frac{dz}{\mu} \int_{z_{j-1}}^{z_j} k_a(z')_\nu \frac{dz'}{\mu} (B(z)_\nu - B(z')_\nu) e^{-\int_z^{z'} k_a(z'')_\nu \frac{dz''}{\mu}} \quad (1)$$

3. Applications et paramétrisations

3.1. Exemple de Mars

Altitude (m)	3.6	16.4	39.8	82.1	159.0	297.9	547.0	988.4	1753
Altitude (km)	3.03	5.03	7.93	11.70	16.19	21.19	26.52	32.07	37.80
Altitude (km)	43.69	49.80	56.24	63.15	71.04	80.21	96.35		

Figure 1 : Ce tableau donne le découpage vertical de l'atmosphère de Mars en 25 mailles de gaz (issue de l'article [11]).

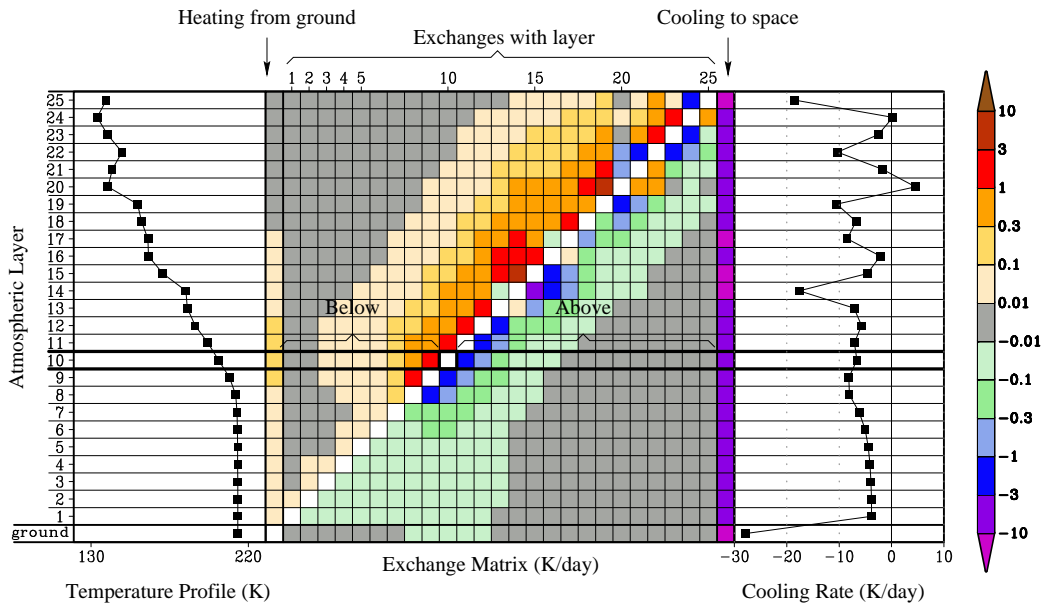


Figure 2 : Figure centrale : matrice des PNE (exprimées en K/jour) pour Mars sur la bande de spectre de $15\mu\text{m}$ du CO_2 découpée en 3 sous-bandes (issue de l'article [11]). La valeur de $\Psi_{i,j}$ est représentée par la couleur du carré situé à l'intersection de la ligne i et de la colonne j . A gauche, le profil de température vertical, et à droite, le bilan radiatif de chaque maille atmosphérique i , obtenu par une somme sur les PNE.

La figure 2 montre une matrice de PNE pour l'atmosphère de Mars. En prenant l'exemple de la maille de gaz 10 (ligne 10), l'intersection avec la première colonne donne la PNE entre la

maille de gaz 10 et le sol, puis en se déplaçant vers la droite, on obtient les échanges avec les différentes mailles de gaz du système, jusqu'à l'espace. Cette matrice montre que pour n'importe quelle maille de gaz de l'atmosphère, sont dominants dans le calcul du bilan radiatif les échanges nets entre la maille de gaz considéré et le sol, l'espace, et les mailles proches (éléments diagonaux). D'un point de vue interprétatif, les échanges nets entre les mailles de gaz et les parois (sol et espace) peuvent amener à confusion. Par exemple, la maille de gaz 10 échange de façon importante avec les mailles de gaz adjacentes. Les échanges entre la maille de gaz 10 et les autres éléments diminuent lorsque la distance qui les sépare augmente, jusqu'à devenir négligeable devant les échanges de proximité (le milieu qui sépare les deux éléments devient de plus en plus épais). Et pourtant, la matrice montre qu'il y a quand même d'importants échanges nets avec les parois (sol et espace). Cela est dû au spectre de raies du coefficient d'absorption $k_a(z, \nu)$. La puissance radiative émise par une maille de gaz élémentaire à la hauteur z et d'épaisseur dz est proportionnelle à $k_a(z, \nu) dz$ et l'atténuation par le milieu traversé est en $\exp(-\int_{\Gamma} k_a(z, \nu) dz)$. Pour deux mailles de gaz adjacentes, les spectres d'absorption de chaque maille sont sensiblement les mêmes. Les centres des raies sont donc rapidement absorbés par le gaz traversé, ce qui explique les échanges nets de proximité importants malgré une faible différence de température. Lorsque l'émission d'une couche arrive aux parois (sol ou espace), il ne reste qu'une faible partie de l'énergie, portée par les ailes de raies. Mais les parois se comportent comme des surfaces grises sur une bande étroite (elles absorbent efficacement à toutes les fréquences). La matrice des PNE peut donc simultanément présenter une partie centrale quasiment vide, signature d'un milieu optiquement épais, et des échanges dominants entre le gaz et les parois.

3.2. Paramétrisation pour Mars

La matrice de PNE de Mars montre que seuls les échanges nets avec les parois et les échanges nets de proximité sont dominants dans le calcul du bilan radiatif. La paramétrisation utilisée au sein du modèle de circulation générale du Laboratoire de Météorologie Dynamique et de l'Agence Spatiale Européenne s'appuie sur la définition de la grandeur optico-géométrique suivante : $\xi_{i,j} = \frac{\Psi_{i,j}}{\Delta B}$. Cette écriture est justifiée physiquement dans les deux cas limites du milieu optiquement mince et du milieu optiquement épais. Dans le cas optiquement mince (cf. 2.1.), la probabilité qu'un photon émis par i soit absorbé par j est indépendante des positions d'émission et d'absorption. Le terme $B(z) - B(z')$ de l'équation 1 peut-être approximée en sortant $\langle B \rangle_i - \langle B \rangle_j$ des intégrales géométriques, c'est à dire la différence des luminances noires moyennée sur les éléments i et j . A l'autre extrême, lorsque le milieu est optiquement épais, il ne peut y avoir d'échange net entre deux éléments lointains. Les échanges nets de proximité se font par les photons émis et absorbés à proximité de l'interface. Par conséquent, le profil de luminance noire (et donc son gradient) à l'interface est déterminant dans ce cas de figure. Le gradient peut être approximé par : $\frac{\langle B \rangle_i - \langle B \rangle_j}{\Delta z}$. Dans ces deux cas limites, l'expression des $\xi_{i,j}$ apparaît directement à partir de l'équation 1.

En pratique, dans le modèle de circulation générale, les $\xi_{i,i+/-1}$ correspondants aux échanges nets de proximité et les $\xi_{i,sol}$ et $\xi_{i,espace}$ sont recalculés à chaque pas de temps ($4m$ éléments), les autres $\xi_{i,j}$ correspondants aux échanges nets lointains sont recalculés moins régulièrement.

3.3. Pour Vénus

En ce qui concerne l'atmosphère vénusienne, des développements analogues sont en cours au Laboratoire de Météorologie Dynamique et au LAPLACE. La différence essentielle provient

des très fortes épaisseurs optiques d'absorption et de diffusion associées aux fortes pressions de l'atmosphère près du sol, et de l'épais nuage qui couvre l'ensemble de la planète. Les matrices de PNE Vénusiennes seront reportées et commentées sur le poster, ainsi que dans le travail de V. Eymet présenté à cette même conférence (présentation du code KARINE).

3.4. Pour la Terre

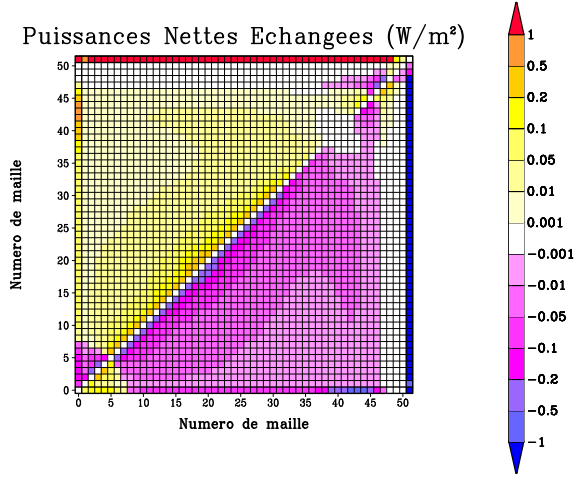


Figure 3 : Matrice de PNE pour la Terre en configuration ciel clair (obtenue à l'aide de KARINE, cf. présentation de V. Eymet).

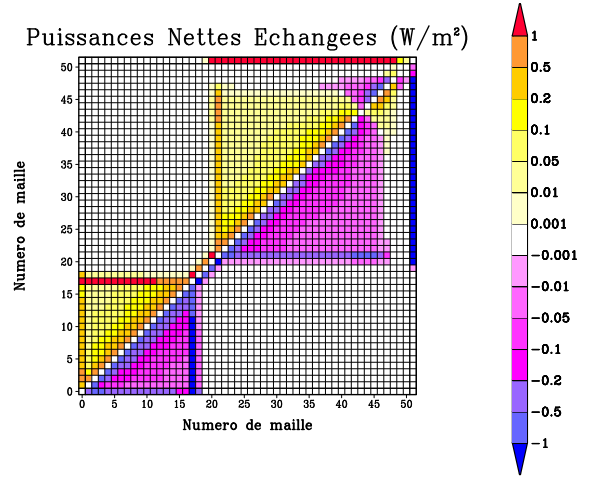


Figure 4 : Matrice de PNE pour la Terre en présence d'un nuage à altitude moyenne.

L'atmosphère terrestre est découpée verticalement en 50 mailles de gaz du sol à l'espace (10 000 km pour le calcul des matrices de PNE figure 3). Le spectre infrarouge est lui aussi discrétisé en 121 bandes étroites. Sur chaque bande étroite, la luminance de Planck est supposée constante. En ciel clair, la matrice de PNE terrestre (figure 3) est similaire à celle de Mars. La présence d'un nuage (fig. 4) empêche les échanges nets entre éléments situés de part et d'autre du nuage. Ce nuage se comporte donc approximativement comme une paroi réfléchissante et absorbante (même phénomène que sur Vénus). Les matrices sont donc très différentes dans les situations ciel clair et ciel nuageux, ainsi que pour les différents types de structures nuageuses. La paramétrisation doit donc tenir compte précisément des variations rapides de la teneur en eau de la colonne atmosphérique (fraction volumique de vapeur d'eau, altitudes et compositions des nuages).

Ci-après est décrite rapidement une paramétrisation proposée par J.F Geleyn (Météo France). Pour chaque maille de gaz i , et par bande étroite $\Delta\nu$, les échanges nets $\Psi_{i,sol}$ (entre le gaz et le sol), $\Psi_{i,esp}$ (entre gaz et espace) et $\Psi_{i,i+/-1}$ (échanges nets de proximité) sont recalculés à chaque pas de temps physique. Les autres PNE sont estimées à partir des calculs spectraux qui ont été nécessaires au calcul des $\Psi_{i,sol}$, $\Psi_{i,esp}$ et $\Psi_{i,i+/-1}$ (aucun calcul spectral coûteux supplémentaire n'est requis).

A partir des PNE calculées, on définit des épaisseurs optiques équivalentes en raisonnement gris pour chaque maille de gaz i : $\Psi_{i,sol} \rightarrow \delta\tau_{i,sol}$, $\Psi_{i,espace} \rightarrow \delta\tau_{i,espace}$ et $\Psi_{i,i+/-1} \rightarrow \delta\tau_{prox,i+/-1}$. Le but est alors de trouver une paramétrisation qui rende compte des échanges nets restants, $\Psi_{i,reste} = \sum_{j=1, \neq i+/-1}^m \Psi_{i,j}$, à partir de ces épaisseurs optiques. Pour cela, $\Psi_{i,reste}$ est encadré : $\Psi_{i,min} \leq \Psi_{i,reste} \leq \Psi_{i,max}$, où $\Psi_{i,min}$ est obtenu avec un raisonnement gris par bande étroite, à partir du $\min(\delta\tau_{i,sol}, \delta\tau_{i,espace})$ de chaque couche ; $\Psi_{i,max}$ est calculé à par-

tir des $\delta\tau_{i,prox}$. Cela se justifie par le fait que : $\delta\tau_{i,prox} \geq \min(\delta\tau_{i,sol}, \delta\tau_{i,espace})$ à cause de l'atténuation rapide des échanges nets de proximité (cf 3.1). Le bilan radiatif de i s'écrit alors : $\zeta_i = \Psi_{i,espace} + \Psi_{i,sol} + \alpha\Psi_{i,min} + (1-\alpha)\Psi_{i,max}$, toute la subtilité résidant dans la détermination des paramètres α , en fonction de la structure atmosphérique (profils de température, pression, etc). J.F. Geleyn a proposé une procédure de calcul de α , et a mené une série de tests intensifs à partir du modèle de prévision climatique de Météo France. Le travail mené au LAPLACE actuellement consiste à explorer physiquement les conditions de validité d'une telle approche, de façon à juger du champ d'applicabilité d'une telle technique.

4. Conclusion

Dans cette article, nous présentons différentes paramétrisations des transferts radiatifs infrarouges, pour des modèles de circulation générale, mises au point à partir d'analyses en puissances nettes échangées. Il a été montré que cette formulation à un très fort intérêt pour ce genre d'application : pour un système donné, lors du calcul d'une PNE, le modèle physique et le degré de précision sont traités indépendamment des hypothèses effectuées pour le calcul des autres PNE, ce qui reste vrai lors du passage au numérique. De plus, en suivant la règle simple $\Psi_{i,j} = -\Psi_{j,i}$, il y a conservation de l'énergie et du second principe. Le travail en cours consiste à déterminer une paramétrisation qui prenne en compte la variabilité (rapide dans le cas de la Terre) de la teneur en eau.

Références

- [1] J. S. A. Green. Division of radiative streams into internal transfer and cooling to space. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 93 :371–372, 1967.
- [2] J.M. Joseph and R. Bursztyn. A radiative cooling model in the thermal infrared for application to models of the general circulation. *Journal of Applied Meteorology*, 15 :319–325, 1976.
- [3] M.F. Modest. *Radiative Heat Transfer*. Mc Graw-Hill International Editions, 1993.
- [4] J.L. Dufresne, R. Fournier, and J.Y. Grandpeix. Méthode de Monte-Carlo par échanges pour le calcul des bilans radiatifs au sein d'une cavité 2D remplie de gaz. *Compte-rendu à l'Académie des Sciences*, Série IIb, 326 :33–38, 1998.
- [5] M. Cherkaoui, J. L. Dufresne, R. Fournier, J. Y. Grandpeix, and A. Lahellec. Monte-Carlo simulation of radiation in gases with a narrow-band model and a net-exchange formulation. *ASME Journal of Heat Transfer*, 118 :401–407, 1996.
- [6] A. De Lataillade, S. Blanco, Y. Clergent, J. L. Dufresne, M. El Hafi, and R. Fournier. Monte-Carlo method and sensitivity estimations. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 75 :529–538, 2002.
- [7] A De Lataillade, J. L. Dufresne, M. El Hafi, V. Eymet, and R. Fournier. A net exchange Monte-Carlo approach to radiation in optically thick systems. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 74 :563–584, 2002.
- [8] J. L. Dufresne, R. Fournier, and J. Y. Grandpeix. Méthode de Monte-Carlo par échanges pour le calcul des bilans radiatifs au sein d'une cavité 2D remplie de gaz. *Compte-rendu de l'Académie des Sciences, Paris*, 326 Série II b :33–38, 1998.
- [9] V. Eymet, J.L. Dufresne, R. Fournier, and S. Blanco. A boundary based net exchange Monte-Carlo Method for absorbing and scattering thick medium. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 95 :27–46, 2005.
- [10] L. Tessé, F. Dupoirieux, B. Zamuner, and J. Taine. Radiative transfer in real gases using reciprocal and forward Monte-Carlo Methods and a correlated-k approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 3, issue 13 :2797–2814, 2002.
- [11] J.L. Dufresne, C. Hourdin, R. Fournier, and F. Hourdin. Net exchange reformulation of radiative transfer in the CO_2 15 μm band on mars. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62 n9 :3303–3319., 2005.