

ÉTUDE DE LA DIFFUSION D'UN RAYONNEMENT OPTIQUE DANS UN NUAGE DE PARTICULES

A. Delmas^{1*}, V. Eymet², Y. Le Maoult¹, M. El Hafi³, A. de Lataillade⁴

¹ CROMeP (Centre de Recherche Outils Matériaux et Procédés) ENSTIMAC, Campus
Jarlard, Route de Teillet, 81013, Albi cedex 09

email : adelmas@enstimac.fr

yannick.lemaoult@enstimac.fr

² Laboratoire PLAsma et Conversion de l'Energie (LAPLACE), UMR 5213, Bat. 3R1,
Université Paul Sabatier, 118 Route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex 9

email : v.eymet@gmail.com

³ RAPSODEE (Centre de Recherche d'Albi en génie des Procédés des Solides Divisés, de
l'Energie et de l'Environnement) ENSTIMAC, Campus Jarlard, Route de Teillet, 81013, Albi

email : mouna.elhahi@enstimac.fr

⁴ LACROIX Defense & Sécurité, Route de Gaudiès, 09270 Mazères

email : amaury.delataillade@etienne-lacroix.com

RESUME

L'objectif de ce travail consiste à apporter une contribution à l'étude de la diffusion dans les milieux particuliers. Après la présentation de notre problématique, nous décrivons les mécanismes mis en jeux lors de la diffusion d'une onde électromagnétique par une seule particule. Puis, un code de calcul basé sur la méthode de Monte-Carlo, nous donne la possibilité de modéliser la diffusion d'un rayonnement par un nuage entier. Des résultats sous forme de carte (de transmittivité ou de rétrodiffusion) permettent de déduire facilement la quantité d'énergie traversant ou non le nuage pour des applications de transmission ou de visibilité atmosphérique pour différents capteurs visibles ou infrarouges.

1. INTRODUCTION SUR LA DIFFUSION D'UN RAYONNEMENT OPTIQUE

Nous nous intéressons dans cette étude à la diffusion d'une onde électromagnétique monochromatique par un nuage de particules. Les problèmes de diffusion dans les milieux contenant des particules sont très répandus, notamment dans les domaines : de l'atmosphérique (aérosols, poussières), de la combustion (suies, cendres), du médical (tissus humains) et bien d'autres (peinture, contrôle non destructif). Dans notre cas, on se focalisera sur l'étude de la diffusion dans un nuage de particules. Cette problématique est abordée lors des études de télédétection (sondage optique pas émission laser avec mesure du signal retour), de télémétrie (mesure de la distance), ou de diagnostic laser.

Résoudre un problème de diffusion dans un nuage de particules revient à résoudre en fait l'Equation de Transfert Radiatif (ETR). L'ETR représente la variation de luminance d'un rayonnement optique lors du passage de celui ci dans un milieu donné. Dans notre cas, le rayonnement incident est diminué par absorption et/ou diffusion. Ces deux phénomènes sont caractérisés respectivement par leur coefficient d'absorption (A_λ) et de diffusion (σ_λ). L'accroissement de la luminance dans la même direction que le rayonnement incident est réalisé par diffusion. La densité de probabilité de diffusion dans une direction donnée est représentée par la fonction de phase. Cette fonction (spécifique pour chaque type et taille de particule) permet alors de savoir dans quelle direction le flux sera majoritairement diffusé. L'accroissement de la luminance par émission (de la particule) n'est pas pris en compte dans notre étude. En effet, nous faisons l'hypothèse du milieu froid, les particules n'émettent pas de rayonnement thermique. Les paramètres clés à connaître sont donc les coefficients d'absorption et de diffusion du nuage, et la fonction de phase de la particule. Pour

obtenir les paramètres clefs définissant la diffusion au sein du nuage il faut, dans un premier temps, s'intéresser à une particule isolée avant d'étudier la diffusion dans un nuage entier.

2. ETUDE DE LA DIFFUSION D'UNE PARTICULE ISOLÉE

L'étude de la diffusion pour une particule a été réalisée à l'aide du logiciel MiePlot [1]. MiePlot est un logiciel libre, disponible sur Internet, qui utilise la théorie de Mie. Ce logiciel a été initialement conçu pour des calculs de diffusion pour des gouttes d'eau, mais il a été modifié de telle sorte que les utilisateurs puissent spécifier l'indice de réfraction du milieu et de la particule.

L'objectif de cette étape, comme on l'a dit précédemment est d'obtenir les paramètres clefs de la diffusion permettant de réaliser un calcul au sein d'un nuage entier. Cependant, avant d'obtenir les coefficients d'absorption et de diffusion du nuage, il faut que l'on dispose des sections efficaces d'absorption et de diffusion de la particule. Les sections efficaces représentent le pouvoir masquant de la particule et s'expriment en m^2 , la somme des sections efficaces d'absorption et de diffusion donne la section efficace d'extinction. Il existe également un paramètre adimensionnel caractérisant la capacité de la particule à masquer, il s'agit du facteur d'efficacité. Le facteur d'efficacité (d'absorption, de diffusion ou d'extinction) est calculé en divisant la section efficace appropriée par la section apparente de la particule.

Les données d'entrée du programme nécessaires pour le calcul des sections efficaces (ou des facteurs d'efficacité) de diffusion et d'absorption de la particule sont au nombre de trois : *l'indice de réfraction complexe* de la particule et du milieu ($m_\lambda = n_\lambda - ik_\lambda$ avec n_λ indice de réfraction et k_λ l'indice d'absorption), *la longueur d'onde du rayonnement incident* (le calcul est fait pour un rayonnement monochromatique), *la taille de la particule* (possibilité d'importer une loi de distribution de taille permettant ainsi d'obtenir les sections efficaces équivalentes d'un nuage polydispersé). De plus, notons que la taille de la particule est souvent prise en compte dans un autre paramètre appelé la paramètre de taille. *Le paramètre de taille* $x = \pi \cdot D / \lambda$ (avec D diamètre de la particule et λ longueur d'onde du rayonnement incident) permet de savoir si la particule est grande ou non devant la longueur d'onde incidente. Ce paramètre adimensionnel est important car il va définir la façon dont la particule va diffuser, il est également très utilisé pour les graphiques car il permet de prendre en compte à la fois la taille de la particule et la longueur d'onde du rayonnement incident.

Voici un exemple de résultats obtenus avec MiePlot:

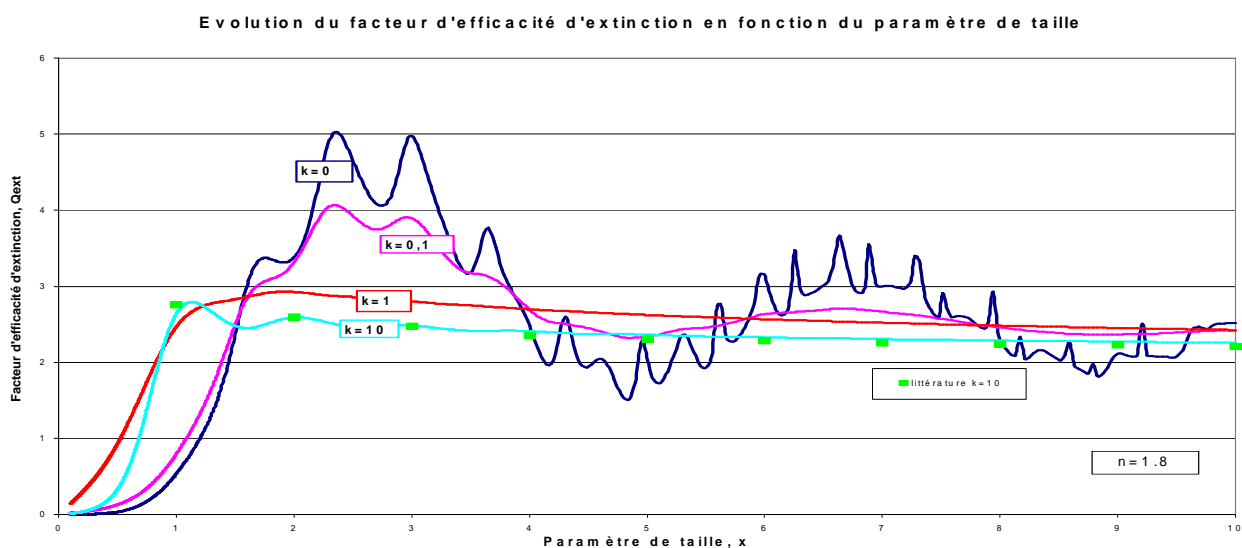


Figure 1 : Evolution du facteur d'efficacité de la particule en fonction du paramètre de taille

Avant d'expliquer les différentes courbes de la figure 1, notons que chaque courbe est tracée pour plusieurs indices d'absorption (k) et un indice de réfraction fixe ($n=1,8$). Les courbes pour les indices d'absorption inférieurs à 1 correspondent à des matériaux diélectriques alors que pour les indices d'absorption de 1 ou de 10 il s'agit plutôt de métaux.

Il y a plusieurs phénomènes à noter sur ces courbes. Tout d'abord, on remarque que le facteur d'efficacité d'extinction (Q_{ext}) est faible pour de petites particules, c'est à dire pour une diffusion de Rayleigh, et qu'il tend vers 2 pour les grosses particules, on retrouve le cas limite de l'optique géométrique. La première contribution Q_{ext} (d'une valeur de 1) correspond à l'ombre géométrique de la particule (due à la réflexion, la réfraction et/ou à l'absorption du rayonnement incident). La deuxième contribution provient du rayonnement diffracté qui passe près des bords de la particule.

Pour $x > 1$, on voit que Q_{ext} oscille : ces oscillations (celles de longue période) sont dues à des interférences. Ces interférences sont créées par l'interaction entre les ondes internes transmises et les ondes externes diffractées. C'est pourquoi l'augmentation de l'indice d'absorption entraîne une atténuation de ces oscillations (les ondes transmises sont moins nombreuses). L'augmentation de la taille de la particule permet aussi d'atténuer les oscillations. En parallèle avec les « oscillations d'interférence », on voit que pour $k < 0,1$, une composante à haute fréquence se rajoute, ce phénomène est dû à un effet de résonance. Il faut, pour obtenir cet effet, que $k \ll n$. L'augmentation de k atténue ici aussi l'effet de résonance [2].

Notons également que le logiciel donne bien des résultats conformes à la littérature, nous obtenons un écart relatif de 2% (voir données de la littérature dans la figure 1) par rapport aux données relevées [2].

3. ETUDE DE LA DIFFUSION DANS UN NUAGE DE PARTICULES

Maintenant que l'on dispose des sections efficaces de la particule, il suffit de multiplier le nombre de particules présente par m^3 dans le nuage par la section efficace. Une étude préalable sur la fraction massique et/ou la granulométrie des particules dans le nuage est souvent nécessaire afin d'obtenir ce nombre de particules. On a donc :

$$A_{\lambda} = n_p \times C_{abs} \quad (1)$$

$$\sigma_{\lambda} = n_p \times C_{diff} \quad (2)$$

avec A_{λ} : Coefficient d'absorption C_{abs} : Section efficace d'absorption
 σ_{λ} : Coefficient de diffusion C_{diff} : Section efficace de diffusion
 n_p : Nombre de particule

La dernière grandeur nécessaire à la résolution de l'ETR est la fonction de phase. Dans notre cas, afin de réduire le temps de calcul, on va utiliser le facteur d'asymétrie : « g ». Il permet de dire si l'onde électromagnétique rentrant en contact avec la particule va être majoritairement diffusée vers l'avant de la particule, vers l'arrière ou de façon isotrope. Ce facteur est compris entre -1 et 1 et est défini comme suit : si $g < 0$ on a une diffusion arrière, si $g > 0$ on a une diffusion avant et enfin on a une diffusion isotrope lorsque $g=0$. Ce paramètre est également obtenu à l'aide du logiciel MiePlot.

Pour réaliser l'étude de la diffusion au sein d'un nuage de particules, nous utilisons un outil appelé KARINE (K-distribution Atmospheric Radiation: Infrared Net Exchanges) [3]. A l'origine, ce code a été conçu pour l'étude des transferts radiatifs en physique de l'atmosphère, et est capable de prendre en compte la présence de particules. Ce code de calcul est basé sur une méthode de Monte-Carlo et la formulation des échanges radiatifs est de type intégrale. Elle utilise la méthode des puissances nettes échangées [4] [5]. La modélisation du nuage est 1D. En effet, le nuage est infini sous deux directions et fini dans la troisième, cette troisième direction permettra de définir l'épaisseur du nuage. De plus, l'épaisseur du nuage est discrétisé en un nombre donné de couches

permettant ainsi d'avoir des informations sur l'évolution de la diffusion au sein du nuage. Chaque couche du nuage sera *identique et homogène* dans tout son volume.

On va traiter ici deux types de nuages qui sont des cas fréquents en « visibilité » ou transmission atmosphérique : le premier sera l'équivalent d'un brouillard d'eau et le second correspondra à un nuage de sable (exemple : tempête de sable). Dans ces cas, l'approximation d'une modélisation 1D est valide. En effet, que ce soit un brouillard d'eau ou une tempête de sable, nous pouvons aisément admettre que le nuage est infini sous deux dimensions et fini sur la troisième. Cette approximation est importante à prendre en compte afin de bien comprendre que le rayonnement qui partira dans les directions infinies du nuage sera perdu (absorbé). Si on traite un nuage de particules fini dans toutes les directions (dans la réalité), le code peut être utilisé et valide à condition d'avoir estimé l'épaisseur optique du nuage et qu'elle soit inférieure à la distance séparant le point d'impact de l'onde électromagnétique d'une des limites du nuage. Dans l'étude faite ici, l'approximation d'une modélisation 1D correspond au rayonnement entrant en face avant du nuage et qui ne pourra ressortir qu'en face arrière (à condition de travailler sur l'épaisseur la plus faible du nuage).

4. REPRÉSENTATION GRAPHIQUE ET RÉSULTATS

La représentation des résultats sur la transmittivité d'un nuage de particules est nouvelle et nécessite quelques explications. Une représentation graphique sous forme de carte de transmittivité pour le rayonnement traversant et de carte de rétrodiffusion pour le rayonnement réfléchi a été choisie. En ce qui concerne la transmittivité, la carte prend en compte à la fois l'épaisseur du nuage, la fraction massique et la longueur d'onde. La fraction massique et l'épaisseur du nuage sont pris en compte dans le coefficient CL [kg/m²] que l'on retrouve sur l'axe des ordonnées. Le coefficient CL apparaît par exemple dans la définition de la transmittivité [6], voir Eq. (4) :

$$\tau_{\lambda} = e^{-(A_{\lambda} + \sigma_{\lambda}) \times L} \quad (3)$$

mais aussi

$$\tau_{\lambda} = e^{-\alpha_{\lambda} \cdot C \cdot L} \quad (4)$$

avec L : Epaisseur du nuage (m) C : Concentration massique des particules (kg/m³)
 α_{λ} : Coefficient d'extinction massique, propriété intrinsèque de la particule (m²/kg)

$$\alpha_{\lambda} = \frac{3 \cdot Q_i}{4 \cdot r \cdot \rho} \quad (5)$$

avec Qi : Facteur d'efficacité r : Rayon de la particule
 ρ : Masse volumique de la particule

Sur cette nouvelle représentation graphique, on retrouve en abscisse la longueur d'onde ce qui permet de voir rapidement sur quelle plage spectrale le nuage laisse passer ou non le rayonnement. La carte est cependant faite pour un matériau donné avec une granulométrie bien précise. Pour la rétrodiffusion (exemple figure 3), le coefficient CL n'a plus lieu d'être. En effet, l'épaisseur du nuage ne joue que très peu sur la réflectivité du nuage. Seules les premières couches du nuage jouent un rôle prépondérant dans la rétrodiffusion de l'onde incidente. Par exemple, dans le brouillard d'eau étudiée, environ 70% de l'énergie réfléchie est rétrodiffusée par le premier mètre du nuage. Il faut donc fixer un autre paramètre. On a donc choisi de normaliser l'épaisseur du nuage à 10m. Après une recherche bibliographique, on a pu trouver les indices de l'eau [2] et du sable (saharien) [6] ainsi que la granulométrie des particules dans un brouillard [7] (de 10 μ m à 90 μ m de diamètres avec un maximum vers les 50 μ m) et lors d'une tempête de sable [8] (de 1 μ m à 20 μ m de diamètres avec un maximum pour les petites particules, 70% entre 1 μ m et 2,5 μ m). On dispose donc de toute les données nécessaires aux calculs.

Voici donc les résultats obtenus pour un brouillard d'eau :

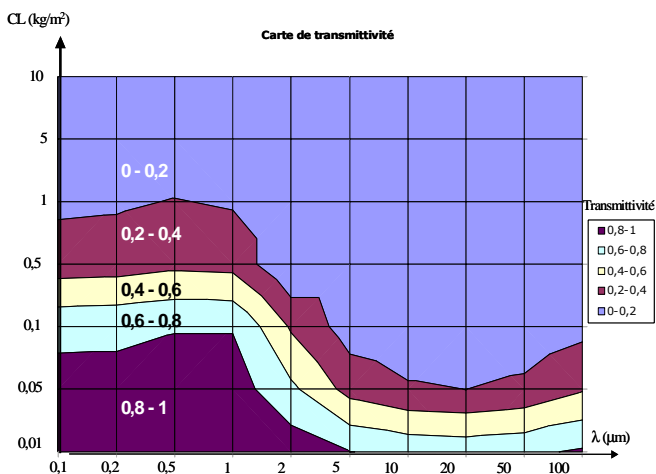


Figure 2 : Carte de transmittivité d'un brouillard d'eau

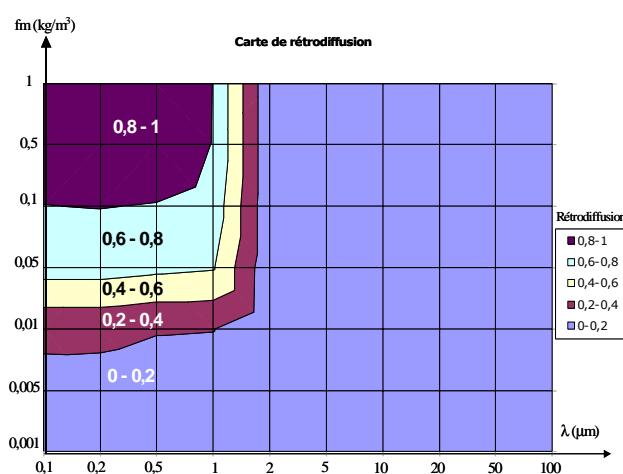


Figure 3 : Carte de rétrodiffusion d'un brouillard d'eau

La figure 2 montre l'évolution de la transmittivité du nuage pour une plage spectrale s'étalant de $0,1\mu\text{m}$ à $100\mu\text{m}$. On peut ainsi voir par exemple pour un brouillard d'eau, que c'est autour des longueurs d'onde du visible que le nuage est le moins opaque. Par contre, en se dirigeant vers les grandes longueurs d'onde (bande III : de $8\mu\text{m}$ à $12\mu\text{m}$), le brouillard d'eau masque beaucoup plus. La figure 3, représentant la carte de rétrodiffusion du brouillard d'eau, montre qu'un rayonnement inférieur à $2\mu\text{m}$ sera fortement rétrodiffusé (c'est le cas d'un rayonnement visible). Ceci est d'autant plus vrai que le nuage est concentré en particules. En effet, contrairement à la transmittivité, la réflectivité du nuage augmente lorsque la fraction massique des particules croît. Une telle rétrodiffusion peut expliquer par exemple l'impression d'un mur blanc lorsqu'on éclaire un brouillard avec les phares d'une voiture. On remarque aussi que plus le nuage est épais ou concentré et plus la transmittivité diminue pour une longueur d'onde donnée. Pour la rétrodiffusion on a la tendance inverse, plus le nuage est concentré et plus la réflectivité du nuage sera élevée.

Voyons maintenant les cartes de transmittivité et de rétrodiffusion d'un nuage de sable (exemple : lors d'une tempête) :

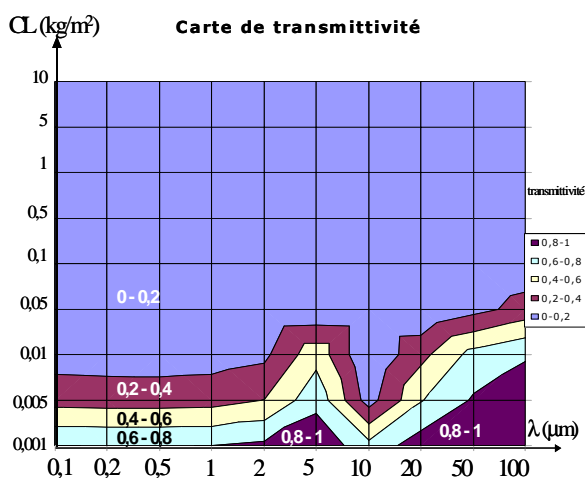


Figure 4 : Carte de transmittivité d'un nuage de sable

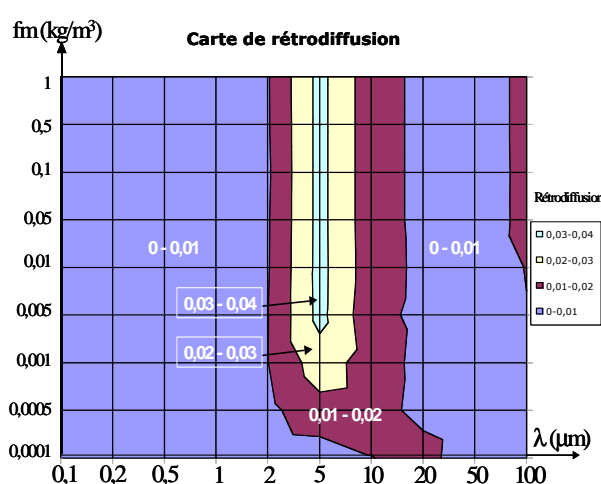


Figure 5 : Carte de rétrodiffusion d'un nuage de sable

Un nuage de sable, comme on pouvait s'en douter est plus opaque qu'un brouillard d'eau. En effet, on peut voir par exemple que pour une longueur d'onde incidente de $5\mu\text{m}$, il faut un coefficient CL

plus élevé pour le brouillard d'eau afin d'obtenir la même transmittivité. On a une transmittivité comprise entre 0,2 et 0,4 pour un coefficient CL d'environ 0,03 pour le nuage de sable alors que pour l'eau on a 0,08 pour le coefficient CL. Il faut donc un brouillard presque trois fois plus concentré ou plus épais pour obtenir la même transmittivité qu'un nuage de sable. On peut noter que la transmittivité d'un nuage de sable dépend moins de la longueur d'onde que celle du brouillard d'eau. Enfin, un phénomène important à prendre en compte est que le nuage de sable rétrodiffuse très peu le rayonnement incident. Contrairement au brouillard qui pouvait refléter jusqu'à plus de 80% du rayonnement incident, le nuage de sable ne rétrodiffuse jamais plus de 4%. Comme le nuage de sable garde une faible transmittivité sur toute la plage spectrale étudiée et qu'il ne rétrodiffuse qu'une faible partie de l'énergie incidente, on peut alors déduire que le nuage de sable a un fort pouvoir absorbant.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

On dispose, par le biais de MiePlot et KARINE, d'un outil générique permettant de traiter tous les nuages de particules souhaités *si celles ci sont froides*. Dès lors que l'on dispose de la granulométrie du milieu et des indices de réfraction, l'outil conçu permet d'estimer en quelle proportion le rayonnement entrant dans le nuage sera diffusé. De plus, la nouvelle représentation graphique proposée permet de connaître rapidement la transmittivité ou la réflectivité d'un rayonnement pour une concentration donnée.

Les travaux futurs pourraient porter par exemple sur des nuages non homogènes, ce qui correspondrait d'avantage à des cas réels. On pourrait envisager de fixer une répartition de concentration définie dans le nuage, c'est à dire une fraction massique non homogène. De plus, d'autres projets intéressants seraient d'étudier des nuages contenant des particules non sphériques ou bien enrobées (présentes dans des écoulements réactifs à haute température). On pourrait aussi traiter le cas de nuage contenant plusieurs types de particules car ceci est souvent le cas dans la réalité. Enfin, disposant d'un outil générique, de nombreuses autres applications peuvent être envisagées du moment *qu'on reste dans le domaine de diffusion indépendante* [9] [10] (la diffusion d'une particule n'est pas affectée par la présence de particules environnantes).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] www.philiplaven.com/mieplot.htm
- [2] Brewster, Thermal Radiative Transfer and Properties. Wiley, New York, 1992.
- [3] <http://web.lmd.jussieu.fr/~eymet/karine.html>
- [4] A. De Lataillade, J.L Dufresne, M. El Hafi, V. Eymet, R. Fournier, A net-exchange Monte-Carlo approach to radiation in optically thick systems. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 74, 2002, pp. 653-584.
- [5] V. Eymet, J.L. Dufresne, R. Ricchiazzi, R. Fournier, S. Blanco, Longwave radiative analysis of cloudy scattering atmospheres using a Net Exchange Formulation. Atmospheric Research 72, 2004, pp 239-261.
- [6] David H. Pollock, The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook Volume 7.
- [7] W.E Knowles Middleton, Vision through the atmosphere. University of Toronto Press
- [8] P. Vanderstraeten et al, Dust Storm originate from Sahara covering Western Europe : a case study. Elsevier Ltd. 2008.
- [9] C.L. Tien and B.L. Drolen. Thermal radiation in particulate media with dependant and independant scattering. Annual Review of Numerical Fluid Mechanics and Heat Transfer, Hemisphere, Washington D.C, 1987.
- [10] M.F. Modest, Radiative Heat Transfer, Academic Press, 2003.