
Trattoria

Transfert Radiatif dans les ATmosphères Terrestres pour les ObseRvations spatIAles

P. Dubuisson LOA – Université de Lille

A. Deschamps – CNES

Article dans la revue La Météorologie : Dubuisson, Philippe ; Deschamps, Adrien.
Troisième atelier Trattoria consacré au transfert radiatif atmosphérique. La
Météorologie, 113, 19-34, 2021. [10.37053/lameteorologie-2021-0041](https://doi.org/10.37053/lameteorologie-2021-0041)

Trattoria: introduction

Atelier principalement consacré aux **codes de transfert radiatif dans l'atmosphère terrestre** pour les applications de télédétection spatiale, de l'ultraviolet aux microondes.

Codes numériques : fondamentaux pour la préparation des instruments de télédétection, ainsi que pour le traitement et l'exploitation des données satellites.

Atelier ouvert à tous les chercheurs, ingénieurs, post-doctorants et doctorants du domaine. Les résultats et recommandations de l'atelier doivent servir de « guide » au CNES et aux divers participants et utilisateurs français et européens de codes de transfert radiatif, y compris le secteur privé.

Trois ateliers Trattoria ont eu lieu, sous l'impulsion de la Direction des Programmes du CNES:

- **Fontainebleau** en 2008.
- **Villeneuve d'Ascq** en 2015 avec le LOA (Laboratoire d'Optique Atmosphérique – Université de Lille): <http://www.meteo.fr/cic/meetings/2020/trattoria/trattoria2015.html> ou sur le site du LOA <http://www-loa.univ-lille1.fr/workshops/Trattoria-2015/>
- **Toulouse**, en 2020, au Centre international de Conférence de Météo-France : <http://www.meteo.fr/cic/meetings/2020/trattoria/>

Trattoria: objectifs de l'atelier

Évaluer les besoins des principaux utilisateurs français et européens (scientifiques, météorologues et climatologues, agences spatiales, sociétés d'algorithmes) en code de transfert radiatif dans les cinq ou dix prochaines années. Le champ d'application de cet atelier était limité à l'atmosphère terrestre.

Dresser un panorama des codes actuellement utilisés en les classant selon leurs principales caractéristiques, présenter leurs principales évolutions depuis l'atelier précédent et identifier leurs utilisations dans différents champs d'application.

Faire se rencontrer les communautés utilisatrices et inciter à une plus grande convergence des codes utilisés en France.

Mieux faire connaître les logiciels développés et les bases de données associées, en particulier ceux réalisés avec le concours du CNES pour ses propres missions scientifiques.

L'ensemble des présentations (captations vidéo) est disponible sur les sites.

Article dans La Météorologie : *Dubuisson, Philippe ; Deschamps, Adrien. Troisième atelier Trattoria consacré au transfert radiatif atmosphérique. La Météorologie, 113, 19-34, 2021. [10.37053/lameteorologie-2021-0041](https://doi.org/10.37053/lameteorologie-2021-0041)*



Trattoria 2020 – Toulouse – 13 au 15 janvier

L'atelier se composait d'exposés de synthèse, de posters et de tables rondes.

Tableau 2. Liste des présentations et tables rondes.

Titre	Intervenants (affiliation)
Présentations orales	
Présentation introductive et programmatique	A. Deschamps (Cnes), P. Tabary (Cnes) et E. Defer (LA)
Panorama des codes de transfert radiatif et état des derniers développements	R. Armante (LMD) et P. Dubuisson (LOA)
De l'intérêt d'une bonne spectroscopie pour connaître l'atmosphère	J.-M. Hartmann (LMD) et E. Turner (MetOffice)
Diffusion et particules	H. Herbin (LOA) et P. Chambon (CNRM)
Approches directe/inverse pour la restitution couplée de la composition atmosphérique et les propriétés de la surface	J. Cuesta (Lisa) et D. Carrer (CNRM)
Application à la météorologie opérationnelle et à la modélisation du climat	Q. Libois et J. Vidot (CNRM)
Modélisation tridimensionnelle du transfert radiatif pour des scènes terrestres naturelles	P. Chervet (Onera) et F. Szczap (LaMP)
Utilisation du transfert radiatif par les agences spatiales	C. Pierangelo (Cnes) et B. Fougnie (Eumetsat)
Tables rondes	
Particules : aérosols et nuages	J. Riedi (LOA) et P. Formenti (Lisa)
Lien entre modèles et transfert radiatif	V. Guidard (CNRM) et L. Landier (Cnes)
Instruments actifs : lidar et radar	V. Noël (LA) et P. Chambon (CNRM)
Codes de transfert radiatif rapides	C. Comet (LOA) et J. Vidot (CNRM)
Spectroscopie	C. Crevoisier (LMD) et A. Deschamps (Cnes)
Corrections atmosphériques	M. Chami (Latmos) et O. Hagolle (Cesbio)

Cesbio, Centre d'études spatiales de la biosphère
 Eumetsat, Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques
 LA, Laboratoire d'aérodynamique
 LaMP, Laboratoire de météorologie physique
 Latmos, Laboratoire atmosphères, milieux, observations spatiales

Lisa, Laboratoire interuniversitaire des systèmes atmosphériques
 LMD, Laboratoire de météorologie dynamique
 LOA, Laboratoire d'optique atmosphérique
 MetOffice, Meteorological Office
 Onera, Office national d'études et de recherches aérospatiales



© Christophe Ciaïas - Météo-France

Trattoria 2020 a réuni plus d'une centaine de personnes

Codes de transfert radiatif

Logiciels permettant de modéliser le transfert et l'émission du rayonnement électromagnétique à travers les atmosphères planétaires.

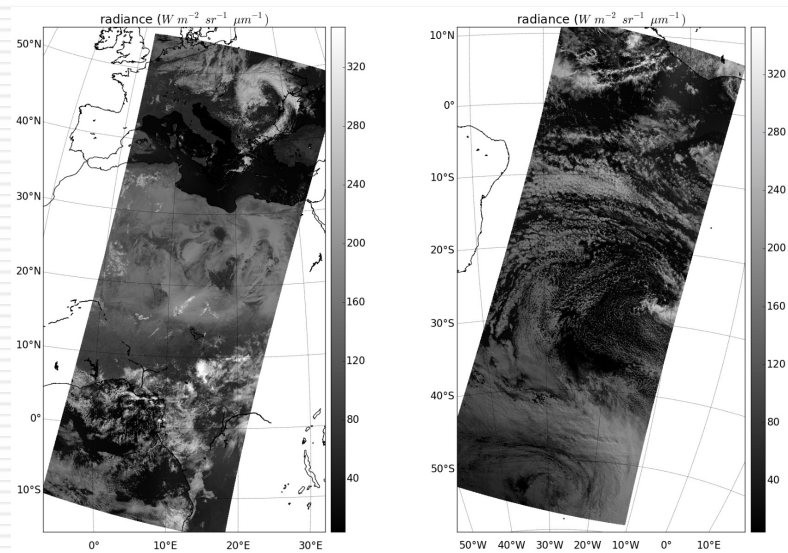
Ce rayonnement, émis par le Soleil ou l'atmosphère et la surface terrestre, peut être réfléchi ou absorbé par les constituants atmosphériques (gaz, nuages et aérosols) ou les surfaces (terrestres ou marines).

Le cœur d'un tel code a pour but de résoudre mathématiquement l'équation de transfert radiatif à l'aide d'une méthode numérique. Il doit prendre en compte l'ensemble des processus radiatifs : absorption, émission, diffusion et polarisation du rayonnement, ainsi que leurs interactions.

Couplés à des données décrivant l'état de l'atmosphère, ils permettent de calculer en premier lieu la luminance [$\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$] en tout point de l'atmosphère.

Cette grandeur directionnelle étant ce que mesurent généralement les instruments tels que ceux embarqués sur satellite, un code de transfert radiatif permet donc de simuler ce que mesure (ou mesurerait) un instrument spatial (simulation d'observables).

Ils permettent de calculer les échanges radiatifs, en calculant la densité de flux radiatif [Wm^{-2}] et donc d'évaluer le pouvoir de réchauffement ou de refroidissement des constituants atmosphériques.



Images synthétiques en luminance spectrale (radiance) pour le futur instrument METImage VII-4 (à 752 nm) sur la plateforme spatiale EPS-SG de EUMETSAT, créées avec le code de transfert radiatif ARTDECO et des données atmosphériques (pression, température, couverture nuageuse, contenu en aérosols, etc.) issues du pôle AERIS/ICARE (LOA, AERIS/ICARE, HYGEOS, projet EUMETSAT EUM/CO/13/4600001231/Tma).

Codes de transfert radiatif

Codes compatibles avec les propriétés des capteurs actuels et futurs :

- Résolution spectrale : de quelques nm à la haute résolution spectrale (dixième de cm^{-1})
- Visée: nadir, limbe, haute résolution spatiale, tomographie, etc.
- Nature des mesures: polarisées, lidar, radar, etc.

On distingue deux grandes familles de codes :

- **Les méthodes statistiques « tridimensionnelles – 3D », de type Monte Carlo**, qui calculent les trajectoires des particules fictives de lumière à l'aide de procédures aléatoires. Cette approche permet d'explorer toutes les géométries et tient compte des hétérogénéités spatiales. La précision dépend du nombre de trajectoires simulées; elle est directement reliée au temps de calcul.
- **Les méthodes « explicites - 1D »** qui résolvent l'ETR sur l'ensemble du champ de rayonnement, discrétisé en un certain nombre de directions, et pour une atmosphère découpée en couches planes, parallèles et homogènes. Cette représentation simplifiée de l'atmosphère, souvent notée 1D, permet de résoudre l'ETR rapidement à l'aide de méthodes mathématiques telles que les ordonnées discrètes (DOM), les ordres successifs de diffusion (SOS), les harmoniques sphériques (HS), etc. Elles sont le plus souvent utilisées pour des applications nécessitant un grand nombre de simulations (modélisation climatique ou le traitement opérationnel des données satellites).

Equation de transfert radiatif

Luminance
(radiance) en
 $\text{W/m}^2/\text{sr}/\text{cm}^{-1}$

Propriétés optiques
des particules
atmosphériques

$$\mu \frac{dL}{d\tau}(\tau, \mu, \phi) = L(\tau, \mu, \phi) - \frac{\varpi_o}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\phi' \int_{-1}^1 d\mu' p(\mu', \phi', \mu, \phi) L(\tau, \mu', \phi')$$

Epaisseur optique:
Fonction des propriétés d'extinction
(absorption + diffusion) des gaz et
particules atmosphériques

$$- [1 - \varpi_o] B^{BB}(T) - \frac{\varpi_o}{4\pi} p(\mu_0, \phi_0, \mu, \phi) C^s e^{-\tau/\mu_0}$$

Fonction de Planck
et émissivité des
surfaces

Conditions
géométriques

Fonction solaire

Codes de transfert radiatif

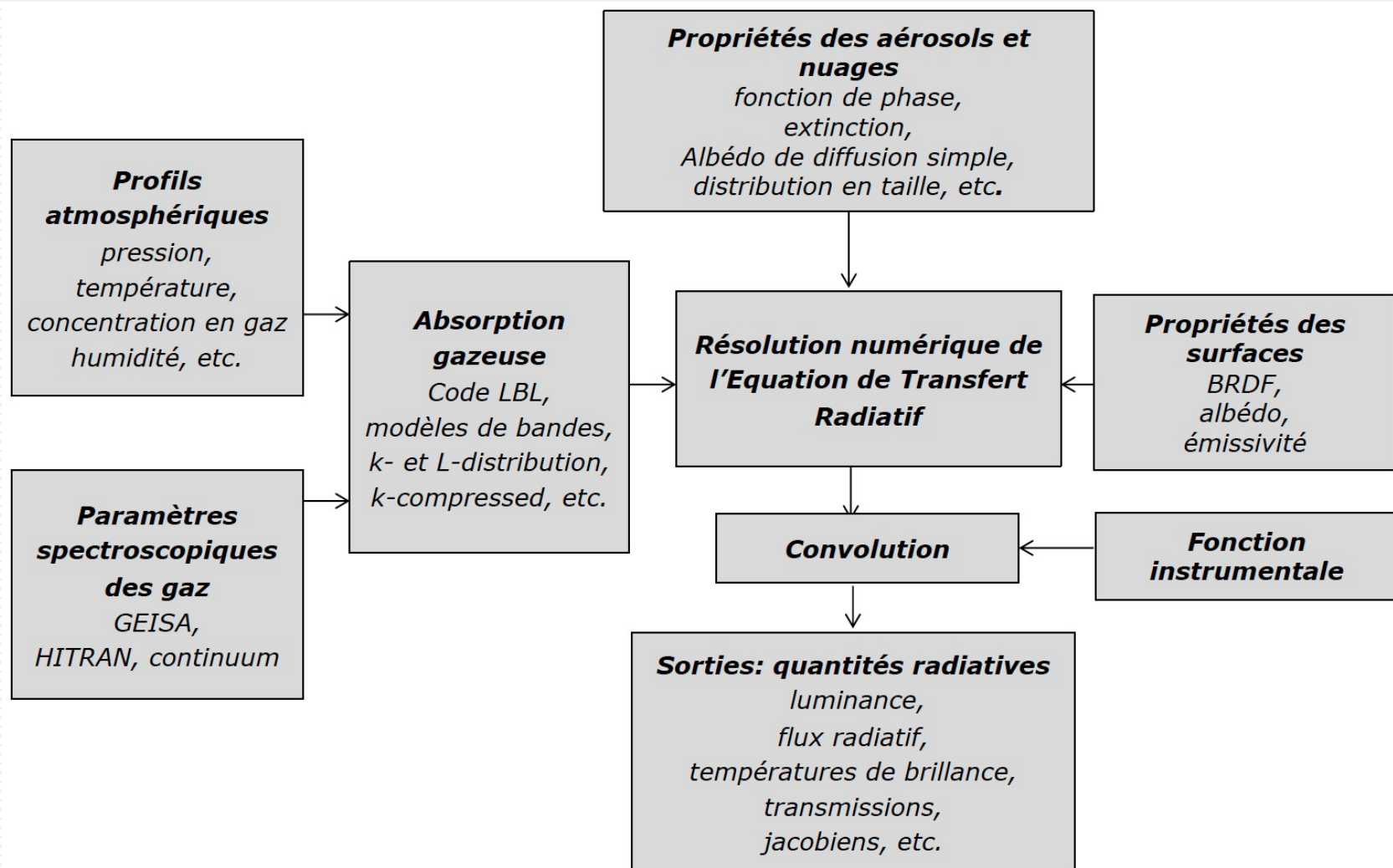


Diagramme général pour la résolution de l'équation de transfert radiatif

Codes de transfert radiatif

Tableau 1. Liste non exhaustive de codes de transfert radiatif pour l'atmosphère terrestre. 1D ou 3D : 1 ou 3 dimensions ; IR : Infrarouge, VIS : Visible, IR : Infrarouge, MO : Micro-ondes ; DOM : Discrete Ordinates Method ; SOS : Successive Orders of Scattering, MC : Monte Carlo ; HS : Harmoniques sphériques.

Nom du code	Géométrie de calcul	Domaine	Absorption spectrale	Résolution gazeuse	Source internet de l'ETR
LBLRTM	1D	IR to UV	LBL	DOM	http://rtweb.aer.com/lblrtm.html
4A/OP	1D	IR to PIR	LBL	DOM	http://4aop.aeris-data.fr/
V-Lidort	1D	IR to UV	oui	DOM	http://www.rtslidort.com/mainprod_lidort.html
Disort	1D	IR to UV	oui	DOM	http://en.wikipedia.org/wiki/DISORT
RRTM	1D	IR to UV	CkDist	DOM	http://rtweb.aer.com/
Streamer	1D	IR to VIS	ESFT	DOM	http://stratus.ssec.wisc.edu/streamer/
Modtran	1D	IR to UV	CkDist	DOM	http://www.MODTRAN5.com/
6SV	1D	VIS to PIR	Band Model	SOS	http://6s.ltdri.org
Matisse	1D/3D	IR to VIS	CkDist		http://matisse.onera.fr/accueil
RTTOV	1D	VIS to MW	Predictors	Predictor	https://nwp-saf.eumetsat.int/site/software/rttov/
Momo	1D	UV to IR	CkDist	Matrix operator	Francois.Ravetta@latmos.ipsl.fr / juergen.fischer@fu-berlin.de
KCARTA	1D	IR	LBL		https://github.com/strow/kcarta-matlab
Kopra	1D	IR	LBL	analytical	https://www.imk-asf.kit.edu/english/312.php
OSOA-A	1D	VIS		SOS	https://logiciels.cnes.fr/content/osoaa
HTRDR	3D	IR to VIS		MC	https://www.meso-star.com/projects/high-tune/man/man1/htrdr.1.html
SHDOM	3D	IR to PIR	CkDist	DOM + HS	http://nit.colorado.edu/shdom.html
3DMCPOL	3D	VIS to IR	CkDist	MC	Celine.Cornet@univ-lille.fr
Librairies dédiées au transfert radiatif avec un ensemble de données, codes et documents					
LIBRADTRAN	LIBrary for RADiative TRANSfer			http://www.libradtran.org/doku.php?id=start	
Artdeco	Atmospheric Radiative Transfer Database for Earth Climate Observation			http://loa-git.univ-lille1.fr/wikiloa_public/doku.php?id=artdeco:start	
CRTM	Community Radiative Transfer Model			https://www.jcsda.org/jcsda-project-community-radiative-transfer-model	

Codes de transfert radiatif

Table 4.2 Digital Resources for Radiative Transfer

Name	Type	Content	Source	Website	References
	Surface emissivity	Global Infrared Land Surface Emissivity database from MODIS data	WISC	http://cimss.ssec.wisc.edu/iremisk/	[1]
	Surface emissivity	collection of emissivity measurements of natural and manmade materials	UCSB	http://www.icess.ucsb.edu/modis/EMIS/html/em.html	
ASTER spectral Library	Surface emissivity	compilation of over 2400 spectra of natural and man made materials for the ASTER instrument	JPL	http://speclib.jpl.nasa.gov/	[2]
ADAM	Surface reflectances	A Surface Reflectance Database for ESA's Earth Observation Missions	ESA	http://adam.noveltis.com/	
FDS : Fonds De Sol	Surface reflectances	Construction of a Global Database of Surface Reflectance and Emissivity at a scale of 500 m	LOA	http://loafds.univ-lille1.fr/fondsdesol/index_uk.html	
POSTEL: Pole d'Observation des Surfaces continentales par TELedetection	Reflectance and BRDF	Database of surface properties including reflectance derived from satellite data and BRDF from POLDER satellite data	?	http://postel.obs-mip.fr/?-land-cover-68-	
OPAC: Optical Properties of Aerosols and Clouds	Aerosols and clouds	Database of aerosol and cloud optical properties	Ether	http://ether.ipsl.jussieu.fr/etherTypo?id=989&L=0	Hess
SCATTPORT	Light Scattering Software	Light Scattering Information Portal for the light scattering community	DFG	http://www.scattport.org/index.php/light-scattering-software	
	Codes for Cloud properties	Numerical algorithm (T-matrix) for scattering properties calculation of non spherical particles	GISS	http://www.giss.nasa.gov/staff/mmishchenko/t_matrix.html	
Ice Cloud Bulk Scattering Model	Cloud properties	Single-scattering properties of cirrus derived from radiative transfer models and <i>in situ</i> measurements	WISC	http://www.ssec.wisc.edu/ice_models/	
	Cloud properties	Single-scattering properties of cirrus derived from airborne <i>in situ</i> measurements	MetOffice	http://www.metoffice.gov.uk/research/people/anthony-j-baran	
US Standard Atmospheres	Atmospheric Profiles	Standard Profiles for various latitude (T, P, H ₂ O et O ₃)	AFCLR	http://en.wikipedia.org/wiki/U.S._Standard_Atmosphere	[1]
TIGR: Thermodynamic Initial Guess Retrieval	Atmospheric Profiles	Dataset with 2311 profiles (T, P, H ₂ O et O ₃) of over 80000 radiosondes	LMD	http://ara.abct.lmd.polytechnique.fr/	[1]
-	Atmospheric Profiles	Profiles from meteorological data available for various sites at global scale since 1973	UW	http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html	?
LIBRADTRAN: LIBrary for RADiative TRANSfer			LMU	http://www.libradtran.org/doku.php?id=start	
ARTDECO: Atmospheric Radiative Transfer Database for Earth Climate Observation		Libraries dedicated to radiative transfer with a collection of data, code and document for calculation of solar and thermal radiation in the Earth's atmosphere	LOA	http://loa-git.univ-lille1.fr/wikiloa_public/doku.php?id=artdeco:start	
GEISA		données spectroscopiques	LMD/IPSL/Ether	http://ether.ipsl.jussieu.fr/etherTypo?id=950	
HITRAN		données spectroscopiques	AFCLR	http://www.cfa.harvard.edu/hitrans/	

Equation de transfert radiatif: Exemple à 4 μm

Intégrale en fonction de z mais aussi de P :

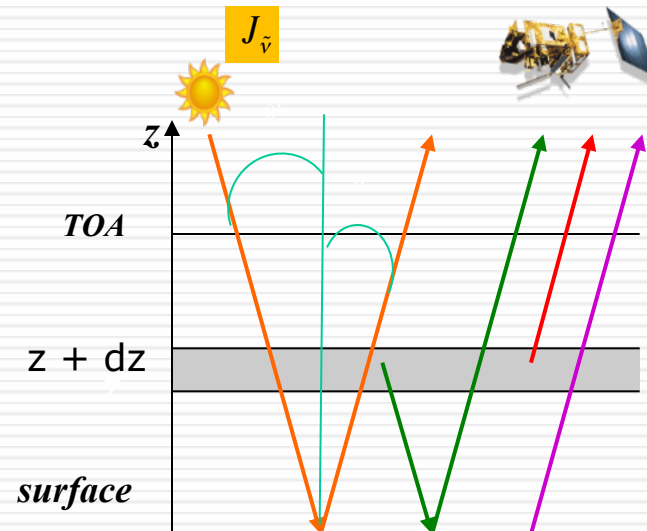
$$I_v^{sat} = \mathcal{E}_v^{surf} \tau_v^{surf} B_v [T^{surf}] \quad (1)$$

$$+ \int_{\ln P_{surf}}^{-\infty} B_v [T(\ln P)] \frac{\partial \tau}{\partial \ln P} d \ln P \quad (2)$$

$$+ (1 - \mathcal{E}_v^{surf}) \tau_v^{surf} \int_{-\infty}^{\ln P_{surf}} B_v [T(\ln P)] \frac{\partial \tau}{\partial \ln P} d \ln P \quad (3)$$

$$+ J_{\tilde{\nu}} \tau_v^{surf}(\theta) (1 - \varepsilon_{\tilde{\nu}}) \tau_v^{surf}(\theta) \quad (4)$$

or dz



Transmittance between P and TOA

$$\tau_v(P) = \exp \left[- \int_{P_{TOA}}^P k_v(P) \rho(P) \sec \theta \right]$$

Gas concentration

Absorption coefficient

- discrétisation du milieu en couches homogènes
- Contribution of all spectral lines

$$\left[\int_{z_{TOA}}^z k_v(P) \rho(P) \sec \theta \right] = \sum_{nz} k_v(P) \rho(P) \sec \theta$$

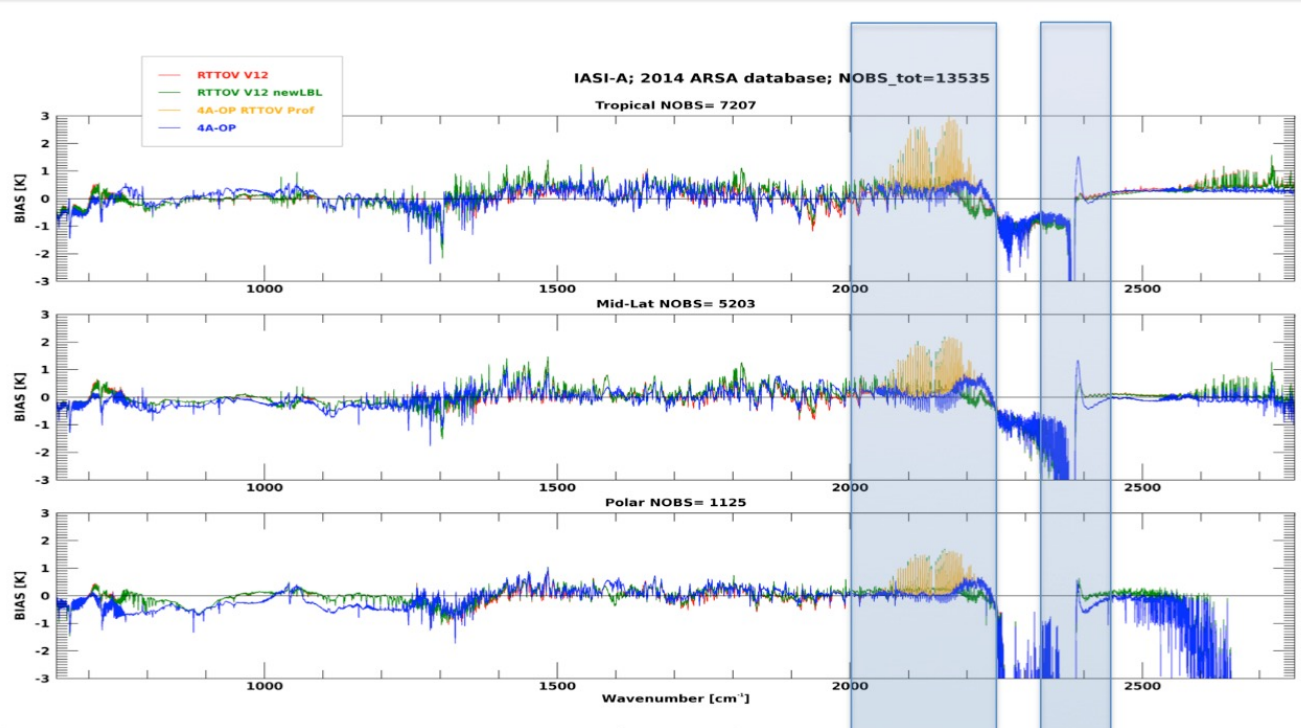
* **Assumptions:** Local Thermodynamic Equilibrium; clear sky – no clouds neither aerosols. $k_v(P) = \sum_{nr} k_{nc, nr}(P)$ *Nr raies*
Nc = molécules

Codes de de référence

Importance de poursuivre et soutenir les codes et les exercices de validations et d'intercomparaisons

CO profile too high in RTTOV :
Correction made in the latest
version.

Line mixing of CO₂ : lack in the
modelling in 4A/OP → adding a
small continuum to correct it



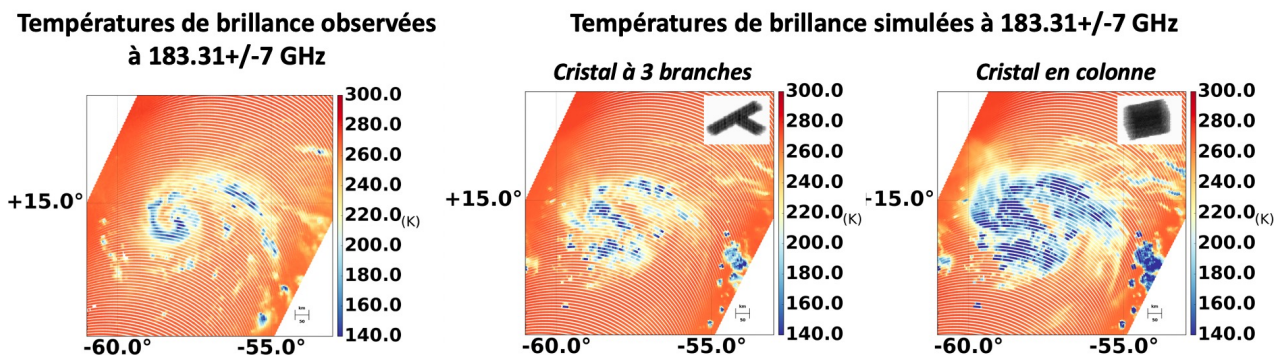
Inter-comparaison entre les codes 4AOP et RTTOV et les observations de l'instrument spatial à haute résolution spectrale IASI. Les biais (écarts entre les observations et les simulations des codes) sont représentés en température de brillance (K) en fonction du nombre d'onde (cm⁻¹).

Diffusion par les particules atmosphériques

Les difficultés:

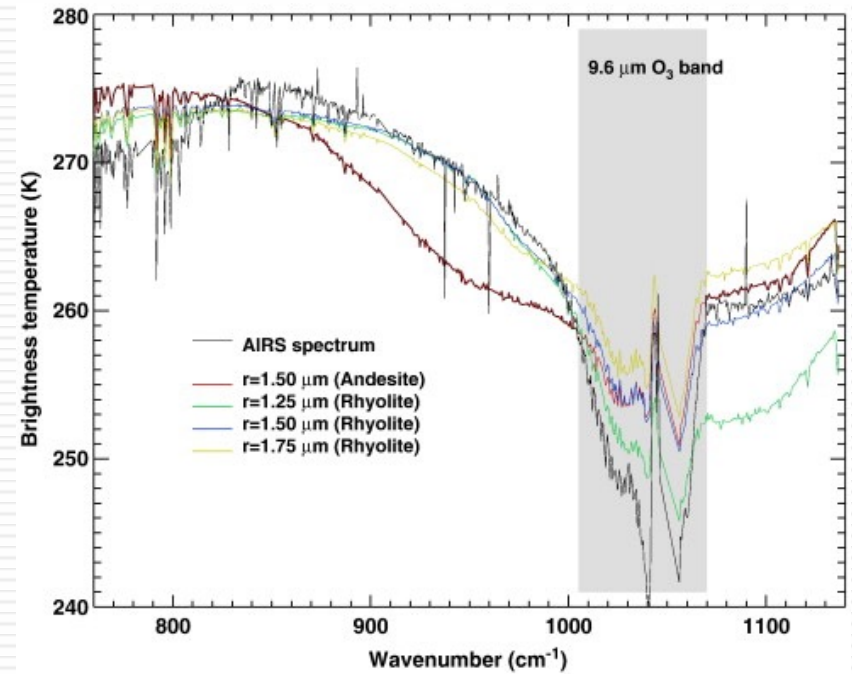
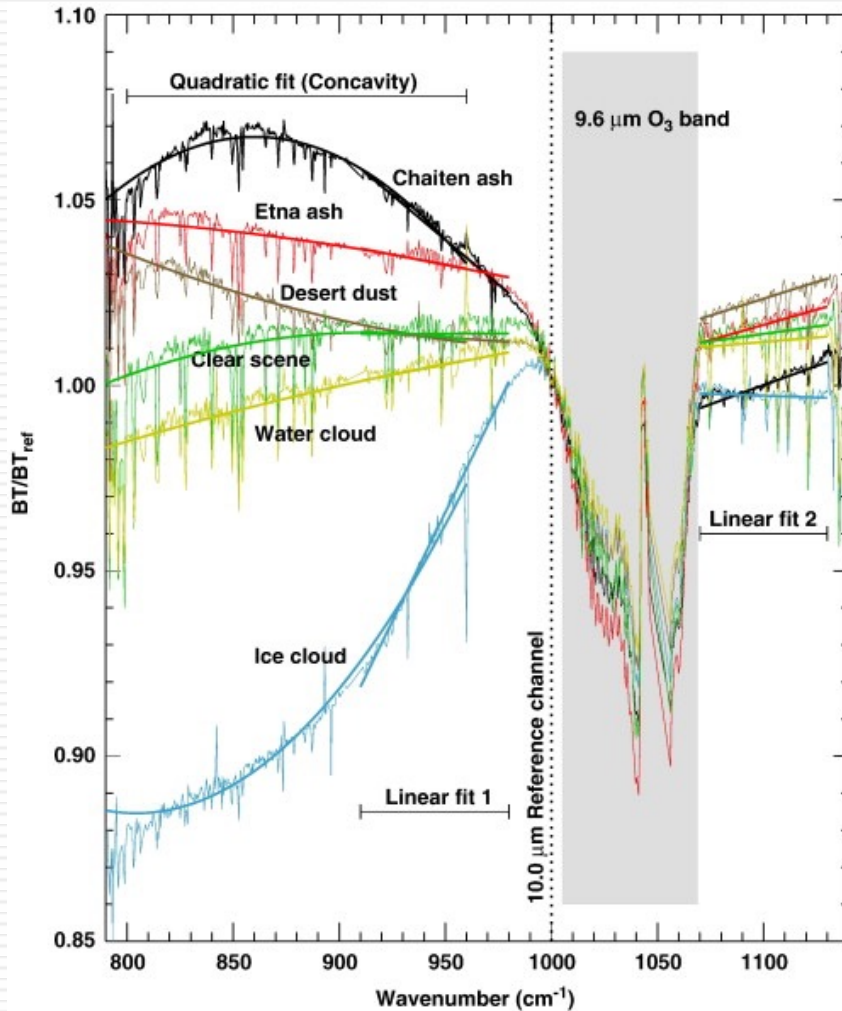
- **De l'échelle de la particule vers celle de la mesure spatiale.** Elle est typiquement kilométrique depuis l'espace tandis que l'échelle des particules varie de quelques nanomètres pour les aérosols organiques secondaires, micrométriques pour les aérosols terrigènes et les cristaux de glace ou millimétriques pour les gouttelettes par exemple.
- **De nombreux paramètres:** (1) la forme ou morphologie de la particule, sa taille, sa densité, ou encore sa composition chimique ou minéralogique, mais aussi (2) la distribution (en nombre et en taille) des particules dans un volume compatible avec l'échelle mesurée par le satellite. Mais seul l'effet de groupe des particules est observable depuis l'espace.
- **l'Indice Complexe de Réfraction (ICR)** est un paramètre essentiel, car il permet de faire le lien entre la nature chimique, les paramètres microphysiques et les propriétés optiques des particules. Or, ces ICR ne sont connus, au mieux, que pour quelques espèces et longueurs d'ondes, et sont généralement déterminés à partir de matériaux massifs ou en lames minces. Ce paramètre est une des principales sources d'incertitudes pour la restitution des paramètres aérosols par télédétection.

La future génération de satellites Européens Metop-SG et la 9^{ème} mission Earth Explorer devraient permettre de stimuler la communauté scientifique sur l'ensemble de ces questions. Les observations conjointes des micro-ondes jusqu'aux fréquences submillimétriques (MWI, MWS et ICI), dans les domaines infrarouges (IASI-NG et FORUM) et dans l'UV-Visible polarisé (3MI) devraient fournir un cadre unique pour ces objectifs. Des expériences en salle restent également indispensables.



À gauche : Observations issues du radiomètre micro-ondes GMI à bord du satellite américano-japonais GPM-Core, pour le canal 183.31 +/-7 GHz. Le cyclone observé est le cyclone Maria dans le bassin de l'Atlantique Nord, le 18 Septembre 2017. À droite : deux simulations de températures de brillance, à partir de prévisions du modèle AROME-Antilles de Météo-France. Les simulations ont été réalisées avec le code de transfert radiatif RTTOV-SCATT Version 12, pour deux formes de cristaux différentes afin de représenter les propriétés radiatives de la neige.

Diffusion par les particules atmosphériques



Tiré de : G. Gangale, A.J. Prata, L. Clarisse, *The infrared spectral signature of volcanic ash determined from high-spectral resolution satellite measurements*, *Remote Sensing of Environment*, Volume 114, Issue 2, 2010.

Diffusion par les particules atmosphériques

HDR, H. Herbin, LOA

De même, la **Figure 4.22** qui représente les indices réels et imaginaires restitués de SiO_2 par notre méthode peuvent être comparés avec ceux issus de la base de donnée HITRAN.

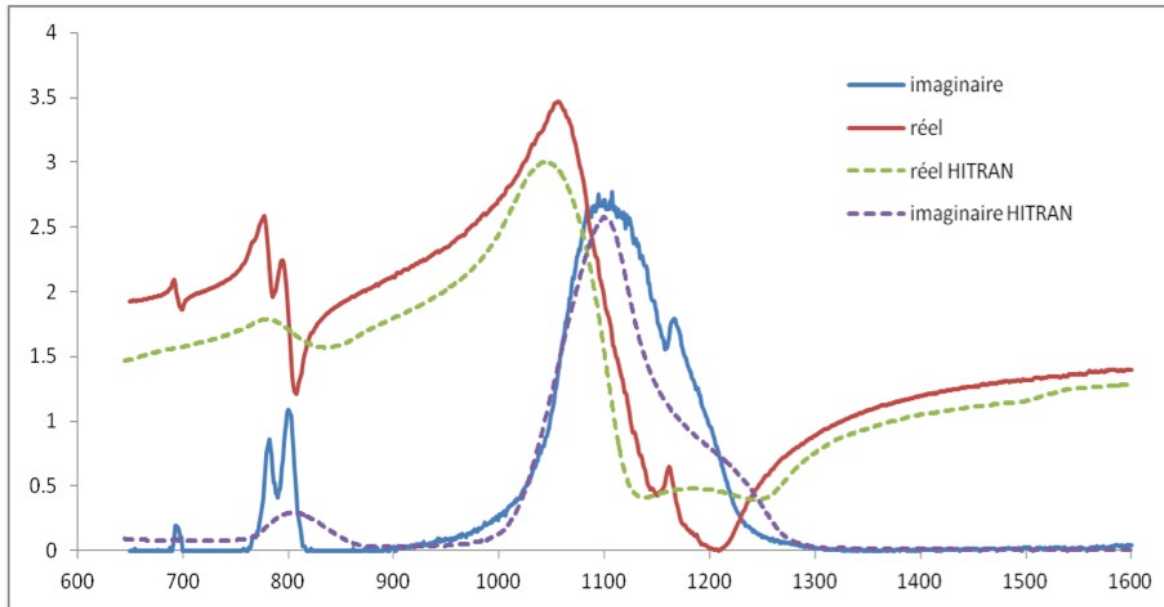


Figure 4.22 Indices réel (rouge) et imaginaire (bleu) issus du spectre de la Figure 4.21. Les indices issus de la littérature, respectivement vert et violet, sont donnés à titre de comparaison.

Transfert radiatif 3D

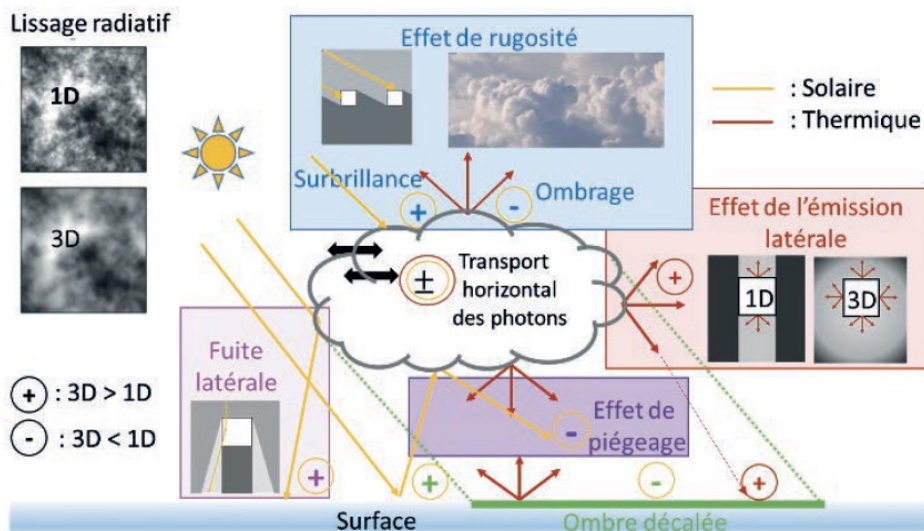


Figure 5.1. Illustration des principaux effets radiatifs 3D des nuages. La théorie du transfert radiatif 1D, par essence, ne prend pas en compte le transport horizontal des photons (flèches noires horizontales), dont les effets sont plus importants dans le domaine visible (traits jaunes) que thermique (traits rouges). Dans le visible, ce processus est à l'origine du lissage radiatif (quand le soleil est au zénith, le champ de luminances 3D d'un nuage est plus lisse qu'en 1D), de l'effet de rugosité (quand l'angle d'incidence solaire est élevé, le champ de radiance 3D apparaît plus rugueux qu'en 1D en lien avec les phénomènes de surbrillance et d'ombrage), de l'effet de fuite en bord de nuage (contribuant par exemple à une augmentation de l'éclairement au sol) et à l'effet de piégeage (des photons peuvent être piégés entre la base du nuage et le sol ou entre différentes couches nuageuses et ne plus contribuer à la luminance zénithale). Dans le thermique, le principal effet radiatif 3D des nuages est l'émission thermique du bord des nuages qui peut contribuer, par exemple, à une augmentation significative du rayonnement à la surface.

De récentes études ont montré que :

- Le TR3D a un impact sur la structure des nuages de type stratocumulus, d'où l'importance de quantifier l'impact du TR3D sur la microphysique et le cycle de vie des nuages. Nécessité d'implémentation de codes TR3D précis mais rapides dans les LES (Large Eddy Simulation).
- Les hétérogénéités verticales et horizontales des nuages dans les colonnes des modèles climatiques globaux (GCM) ont un impact sur les taux de réchauffement: adaptation des codes TR3D dans les GCM.
- les produits nuageux inversés pixel par pixel par capteurs passifs embarqués sur plateforme satellite étaient biaisés par les effets 3D des nuages: développement de nouveaux concepts (tomographie par exemple) pour inverser directement des scènes nuageuses. Ce type d'approche nécessitera certainement la fusion de données issues de capteurs de différentes natures (actif, passif, résolutions spatiales).

Les progrès des calculateurs permettront d'accroître la rapidité des calculs tout en mettant en œuvre la capacité de décrire les scènes naturelles avec de très nombreux paramètres d'une scène 3D.

Les besoins civils ou militaires sont de plus en plus importants pour ces scènes 3D et l'avenir verra une généralisation de modèles 3D rapides dont la précision aura été estimée par les modèles de référence, mais qui seront suffisants pour les besoins visés.

Perspectives

La poursuite de l'atelier Trattoria est prévue, car apprécié par la communauté du transfert radiatif atmosphérique.

Prochain atelier : 2024 ?

La création d'un GDR a été évoquée.

Applications liées aux calculs des flux et modélisation du climat.

Transfert radiatif dans les atmosphères planétaires n'était pas envisagé.

Merci pour votre attention