

***Les codes numériques  
pour la simulation  
du transfert radiatif atmosphérique.***

# Résolution de l'ETR

---

## Les codes de transfert radiatif atmosphérique:

- ✓ méthodes numériques de résolution directe de l'Equation du Transfert Radiatif **(ETR)**
- ✓ utilisées pour des milieux atmosphériques diffusants, absorbants et/ou émissifs,
- ✓ afin de calculer les luminances et flux radiatifs, telles qu'ils seraient mesurés par un instrument, en supposant un état donné de l'atmosphère.

$$\mu \frac{dL}{d\tau}(\tau, \mu, \phi) = L(\tau, \mu, \phi) - \frac{\varpi_o}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\phi' \int_{-1}^1 d\mu' p(\mu', \phi', \mu, \phi) L(\tau, \mu', \phi')$$
$$- [1 - \varpi_o] B^{BB}(T) - \frac{\varpi_o}{4\pi} p(\mu_0, \phi_0, \mu, \phi) C^s e^{(-\tau/\mu_0)}.$$

# Quelques repères historiques

Dès la fin du 18<sup>e</sup> siècle, **Joseph Fourier** pose les bases physiques de l'effet de serre pour expliquer la température de l'atmosphère terrestre.

Voir: *Jean-Baptiste Joseph Fourier et la découverte de l'effet de serre*,  
**Jean-Louis Dufresne**, *La Météorologie* - n° 53 - mai 2006.



« **Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires** »,  
publié en 1824

En 1896, **Svante Arrhenius** « *un doublement de la concentration en CO<sub>2</sub> augmenterait la température moyenne à la surface de la Terre d'environ 4 K* »: théorie qui relie l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique à celle des températures terrestres en raison d'un effet de serre.



**S. Arrhenius (1886), Prix Nobel de chimie de 1903.**

# Quelques repères historiques

---

Travaux des physiciens de la **fin du XIXe et début du XXe** (Planck, Einstein, etc.): mieux comprendre le rayonnement électromagnétique émis par un corps noir, en se fondant sur la physique classique, statistique et quantique (lois de Planck et de Stefan - Boltzmann), et quantifier le rôle fondamental du rayonnement infrarouge sur le climat de la Terre.

Cependant, c'est au sein de la communauté des astrophysiciens que sera abordé dans un premier temps ce problème:

- *Schüster (1905)*:
  - équations simples pour décrire la propagation de la lumière dans les nébuleuses interstellaires, incluant la diffusion des particules,
  - Premier à discuter l'importance de la diffusion multiple en prenant en compte l'émission et l'absorption des raies, sans pour autant disposer de données quantitatives sur la physique atomique,
  - contribution du rayonnement montant et descendant: méthode approchée dite à deux flux.
- *Schwarzschild (1906)*:
  - concept d'équilibre radiatif et solution formelle de l'ETR pour des milieux découpés en couches planes et parallèles,
  - les milieux étaient jusqu'alors considérés comme isothermes ou adiabatiques.

# Quelques repères historiques

---

- **Milieu du XX<sup>e</sup>**, nouvel élan avec les travaux de S. Chandrasekhar sur l'équilibre radiatif des étoiles: nouvelles méthodes numériques pour les milieux stratifiés en couches planes et parallèles, avec la polarisation. Son ouvrage, « **Radiative Transfer** » (**1960**), reste une référence: développement de nombreuses méthodes numériques, ensuite adaptées à l'atmosphère terrestre.
- **Années 70**, à titre d'exemple, l'un des premiers codes sophistiqués, développé par Fels & Kaplan (1975), divise le spectre infrarouge en 19 bandes spectrales.
- **Années 80**, ce type de schéma radiatif fut inclus dans un modèle de prévision du climat. Développement de modèles plus sophistiqués de type « raie-par-raie » et modèles de bandes: 4A, LOWTRAN, MODTRAN, FASCODE, etc.
- Nombreuses méthodes numériques développées: voir l'ouvrage de J. Lenoble « *Radiative Transfer in Scattering and Absorbing Atmospheres: Standard Computational Procedures* (**1986**) ».

**Michael I. Mishchenko:**

*Directional radiometry and radiative transfer: The convoluted path from centuries-old phenomenology to physical optics, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer 146 (2014) 4–33*

# Les codes actuels

---

## Deux contraintes principales sur les codes actuels:

### 1. Performances des instruments mesurant le rayonnement atmosphérique:

- précision radiométrique,
- Diversité des observations: polarisées, multidirectionnelles, résolution spatiale, temporelle et spectrale,

**→ il est primordial de disposer d'outils numériques de transfert radiatif très performants pour garantir la qualité de l'inversion des mesures**

Définition des paramètres d'entrée: données spectroscopiques, flux solaires, propriétés des gaz, aérosols et nuages, des surfaces, etc.

### 2. Rapidité des calculs: le traitement de quantités considérables de données impose de disposer de codes très rapides utilisant, par exemple, des calculs parallélisés, des cartes graphiques GPU, etc.

*A titre d'exemple, le traitement opérationnel des données du capteur IASI nécessite d'inverser chaque jour  $10^6$  spectres comprenant chacun 8000 canaux.*

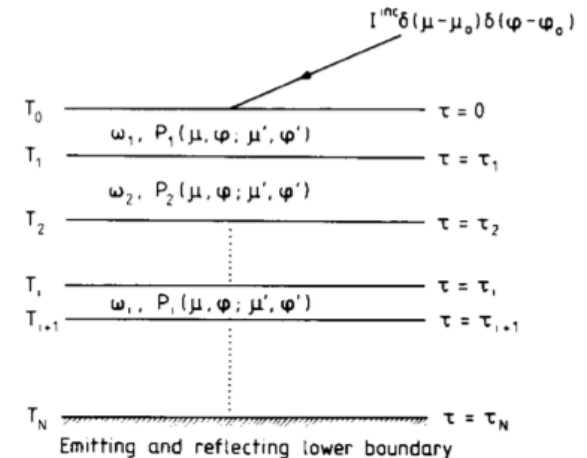
# Les codes 3D vs. 1D

## 1. Méthodes statistiques « tri-dimensionnelles - 3D » :

- approche la plus précise: hétérogénéités horizontales et verticales prises en compte.
- atmosphère divisée en voxels homogènes (pixels 3D), dimensions horizontales ( $dx$  et  $dy$ ) et verticales ( $dz$ ) variables.
- quantités radiatives calculées à partir d'une méthode dite « Monte Carlo », simulant les trajectoires des particules fictives de lumière (FLIP: Fictive Light Particle)<sup>\*</sup>(voir poster **O. Pujol**) à l'aide de procédures aléatoires.

## 2. Méthodes explicites dites « Plans - parallèles » :

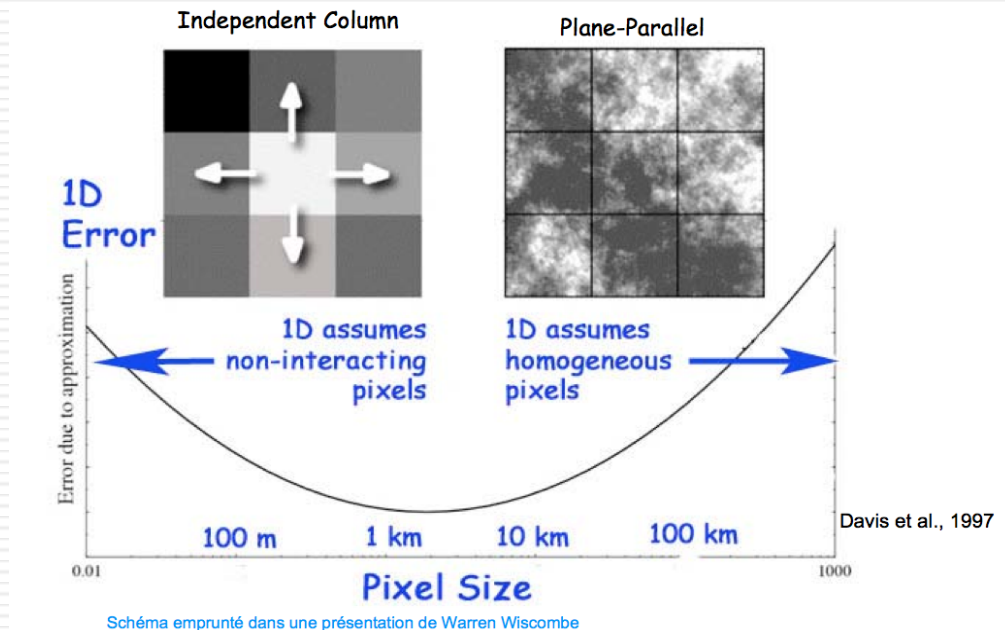
- milieu atmosphérique stratifié en couches homogènes, horizontalement infinies, planes et parallèles
- Atmosphères sphériques : corrections (pseudo-sphériques).
- Très largement utilisées.



# Les codes 1D

Les effets 3D du transfert radiatif en milieu hétérogène sont approchés:

- échanges horizontaux de rayonnement d'une colonne à l'autre (ou d'un pixel à l'autre), pas pris en compte: **Approximation des Colonnes/Pixels Indépendants – ICA/IPA.**
- écart dus aux couches (ou pixels) supposées homogènes dans l'approximation plan-parallèle et celles réellement observées, qui sont tridimensionnelles et hétérogènes: **Plan Parallel Homogeneous – PPH.**



**Estimation de l'erreur commise par une modélisation 1D du transfert radiatif par rapport à des calculs de référence 3D réalisés à l'aide d'un code de Monte Carlo, en fonction de la taille du pixel considéré.**

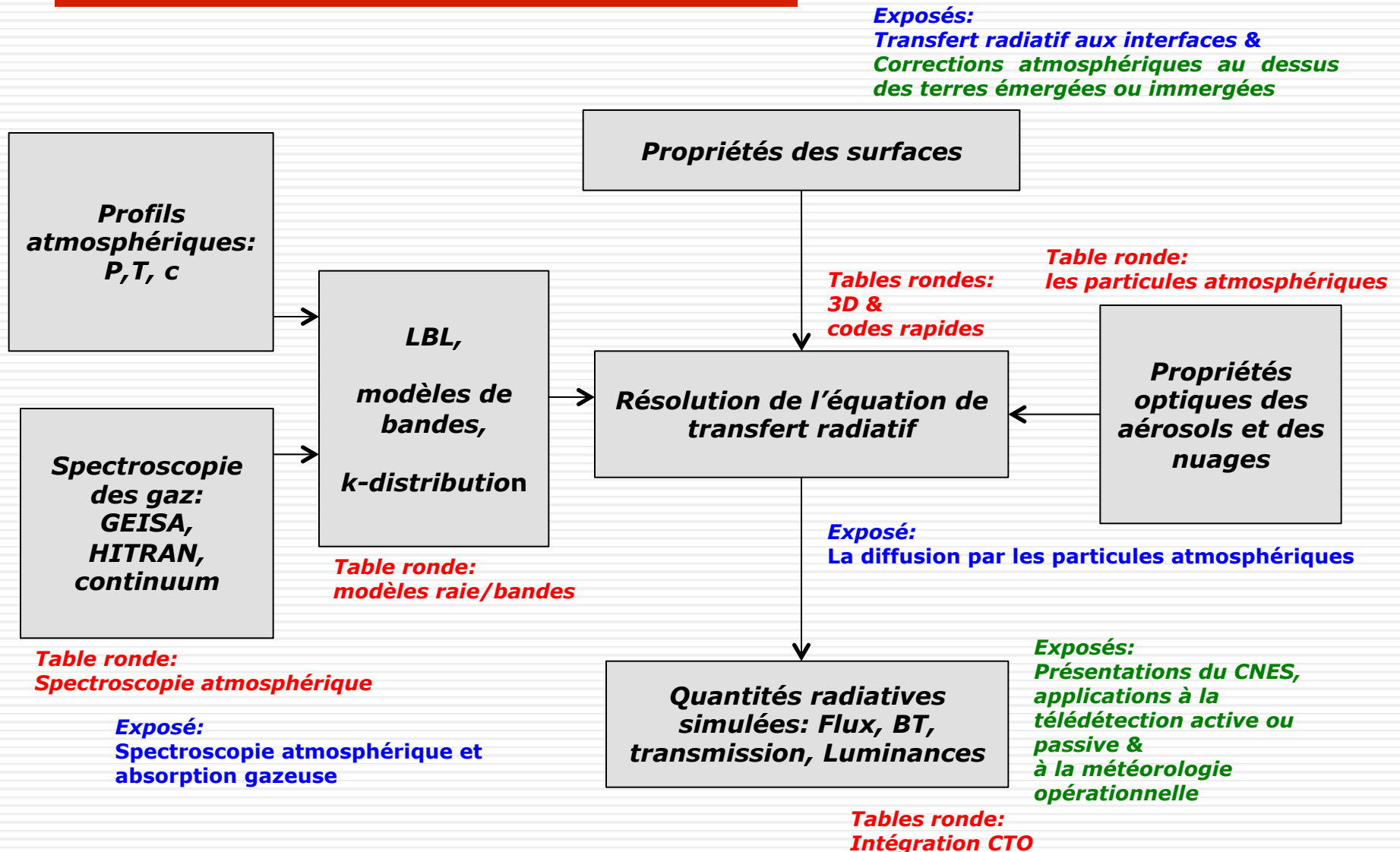


# *Les différents types de codes*

---

- **Géométrie:** 1D/3D
- **Résolution spectrale:** monochromatique, LBL, Modèles de bandes
- **Méthode de résolution de l'ETR:** DISORT, ADD, OS, Monte Carlo
- **Processus radiatifs:** polarisation, absorption gaz, diffusion/absorption nuages et aérosols.
- **Gamme spectrale:** UV, Visible, IR, hyperfréquences
- **Surface:** lambertienne, bidirectionnelle, polarisée, marine ou continentale
- **Quantités radiatives:** Luminance, réflectance, flux, transmission, Temp. de brillance, Jacobiens

# Architecture des codes



# Liste de codes de transfert radiatif

Table 4.3 Examples of available Radiative Transfer Codes

Code	Type	Geometry	Spectrum	Output	Gaseous Absorption	RTE	Scattering	Polarization	Source	
LBLRTM [1]	Spectral	1D	IRT to UV	Radiance & Flux	LBL	DISORT	yes	no	<a href="http://rtweb.aer.com/lblrtm.html">http://rtweb.aer.com/lblrtm.html</a>	
4A/OP	Spectral	1D	IRT to PIR	Radiance	LBL	DISORT	yes	no	<a href="http://4aop.noveltis.com/">http://4aop.noveltis.com/</a>	
LIDORT	Monochromatic	1D	?						<a href="http://www.rtslidort.com/mainprod_lidort.html">http://www.rtslidort.com/mainprod_lidort.html</a>	
DISORT [2]	Monochromatic	1D	IRT to UV	Radiance & Flux	-	DISORT	yes	yes	<a href="http://en.wikipedia.org/wiki/DISORT">http://en.wikipedia.org/wiki/DISORT</a>	
RRTM	Spectral	1D	IRT to UV	Radiance & Flux	CkDist	DISORT	yes		<a href="http://rtweb.aer.com/">http://rtweb.aer.com/</a>	
STREAMER	Spectral	1D	IRT to visible	Radiance & Flux	ESFT	DISORT			<a href="http://stratus.ssec.wisc.edu/streamer/">http://stratus.ssec.wisc.edu/streamer/</a>	
SBDART	Spectral	1D	IRT to UV		Band Model	DISORT			<a href="http://arm.mrcsb.com/sbdart/">http://arm.mrcsb.com/sbdart/</a>	
MODTRAN	Spectral	1D	IRT to UV	Radiance & Flux		DISORT			<a href="http://www.MODTRAN5.com/">http://www.MODTRAN5.com/</a>	
MATISSE	Spectral	1D/3D	IRT to visible	Radiance & BT	CkDist				<a href="http://matisse.onera.fr/accueil">http://matisse.onera.fr/accueil</a>	
RTTOV	Spectral	1D	IRT to PIR	Radiance & BT					<a href="http://nwpsaf.eu/deliverables/rtm/index.html">http://nwpsaf.eu/deliverables/rtm/index.html</a>	
SHDOM	Spectral	3D	IRT to PIR	Radiance & Flux	CkDist	DOM & HS	yes	no	<a href="http://nit.colorado.edu/shdom.html">http://nit.colorado.edu/shdom.html</a>	
LIBRADTRAN:	LIBrary for RADiative TRANSfer		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							<a href="http://www.libradtran.org/doku.php?id=start">http://www.libradtran.org/doku.php?id=start</a>
ARTDECO:	Atmospheric Radiative Transfer Database for Earth Climate Observation									<a href="http://loa-git.univ-lille1.fr/wikiloa_public/doku.php?id=artdeco:start">http://loa-git.univ-lille1.fr/wikiloa_public/doku.php?id=artdeco:start</a>

# Liste de données

Table 4.2 Digital Resources for Radiative Transfer

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

# Exemples de ressources en transfert radiatif

---

A titre d'exemple, bases de données et codes:

**LIBRADTRAN** : *LIBrary for RADiative TRANSfer*

**ARTDECO** – *Atmospheric Radiative Transfer Database for Earth & Climate Observation:*

Codes de transfert radiatif & données relatives aux aérosols, nuages et gaz,

LOA avec financement CNES/TOSCA,

Diffusion: CGTD ICARE,

Disponibilité: été 2015,

Voir poster Miladi *et al.*, ARTDECO.

***Communauté française: disposer de plusieurs codes, basés sur des approches différentes, capables de répondre aux différentes applications et permettant des exercices d'intercomparaisons.***