

***Modélisation du transfert radiatif dans les nuages:
méthodes et codes numériques
pour la télédétection et l'estimation du bilan radiatif.***

P. Dubuisson

Laboratoire d'Optique Atmosphérique

UMR CNRS 8518 – Université de Lille – Sciences et Technologies

et

Collègues du LOA et du LaMP



Introduction

Télédétection:

Nombreuses missions spatiales pour les vingt prochaines années (Sentinel, post-EPS, etc.).

Nécessité de pouvoir prendre en compte avec précision la qualité radiométrique et la diversité des mesures (haute résolution spectrale, polarisation, synergie spectrale, etc.).

Impact du rayonnement dans les modèles:

Nécessité de bien représenter les échanges radiatifs dans les modèles, en particulier pour les nuages (LES, GCM).

Objectif de cette présentation:

Présenter les méthodes et codes actuels, avec leurs limites, de l'UV à l'infrarouge thermique.

Introduction

Codes de transfert radiatif

Entrées:

Profil thermodynamique
Gaz
Nuages
Aérosols
Irradiance solaire
Surfaces
Géométrie ...

Théories

Bases de données

Mesures, radiosondages

Paramétrisations

Données climatiques

Sorties des modèles

Equation du transfert radiatif:

Processus Physiques
Méthodes mathématiques
Résolution numérique

Méthodes numériques de résolution:

Monte Carlo (3D)

Ordonnées Discrètes

Ordres Successifs de Diffusion

Adding-Doubling

Méthodes à 2-Flux

Réseaux de neurones ...

Sorties:

Luminance
Flux radiatif
Température de brillance
Transmission

Calcul des forçages radiatifs

Echauffement et refroidissement radiatifs

Estimation du bilan radiatif

Grandeurs radiatives calculées: Luminance ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}$), flux radiatif (W.m^{-2}), température de brillance (K)

Température de brillance : température d'équilibre équivalente si elle était un corps noir émettant le même rayonnement vers l'espace.

Equation de transfert radiatif

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

Equation de transfert radiatif

$$F^\uparrow = \int_{2\pi} L^\uparrow(\theta, \phi) \vec{u} \cdot \vec{n} d\Omega$$

Luminance L_ν en $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}$

Flux radiatif F_ν en W.m^{-2}

Forçages radiatifs

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

Equation de transfert radiatif

$$F^\uparrow = \int_{2\pi} L^\uparrow(\theta, \phi) \vec{u} \cdot \vec{n} d\Omega$$

Luminance L_ν en $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}$

Flux radiatif F_ν en W.m^{-2}

Forçages radiatifs

DIFFUSION

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

Equation de transfert radiatif

$$F^\uparrow = \int_{2\pi} L^\uparrow(\theta, \phi) \vec{u} \cdot \vec{n} d\Omega$$

Luminance L_ν en $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}$

Flux radiatif F_ν en W.m^{-2}

Forçages radiatifs

DIFFUSION

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

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

**ABSORPTION /
EMISSION**

Equation de transfert radiatif

$$F^\uparrow = \int_{2\pi} L^\uparrow(\theta, \phi) \vec{u} \cdot \vec{n} d\Omega$$

Luminance L_ν en $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}$

Flux radiatif F_ν en W.m^{-2}

Forçages radiatifs

DIFFUSION

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

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

**ABSORPTION /
EMISSION**

**Épaisseur optique
Fonction de diffusion
Albédo de diffusion simple**

Plan

I. Généralités dur le transfert Radiatif

Diffusion par les particules

Absorption gazeuse

II. Codes 1D

III. Transfert radiatif 3D

Trattoria 2015:

Transfert Radiatif dans les ATmospheres Terrestres pour les ObseRvations spatIAles.

Atelier organisé par le CNES et le LOA / Université de Lille 1

Ressources disponibles sur le site du LOA:

<http://www-loa.univ-lille1.fr/workshops/Trattoria-2015/>

Et du CNES:

<http://cct.cnes.fr/content/vidéos-de-latelier-trattoria-2-0>

Paramètres importants

Description des nuages:

- Phase thermodynamique
- Microphysique des nuages: distribution en taille, forme, etc.
- Extension géométrique: Pression de sommet des nuages, épaisseur, opacité, hétérogénéité verticale et horizontale.

Propriétés à traduire en propriétés optiques pour le transfert radiatif:

- Fonction de diffusion
- Albédo de diffusion simple / facteur d'asymétrie
- Épaisseur optique d'extinction (absorption et diffusion)

À toutes les longueurs d'onde.

Diffusion

Paramètre de Mie:
 $x = 2\pi r/\lambda$

Gouttes d'eau, neige,
grêle

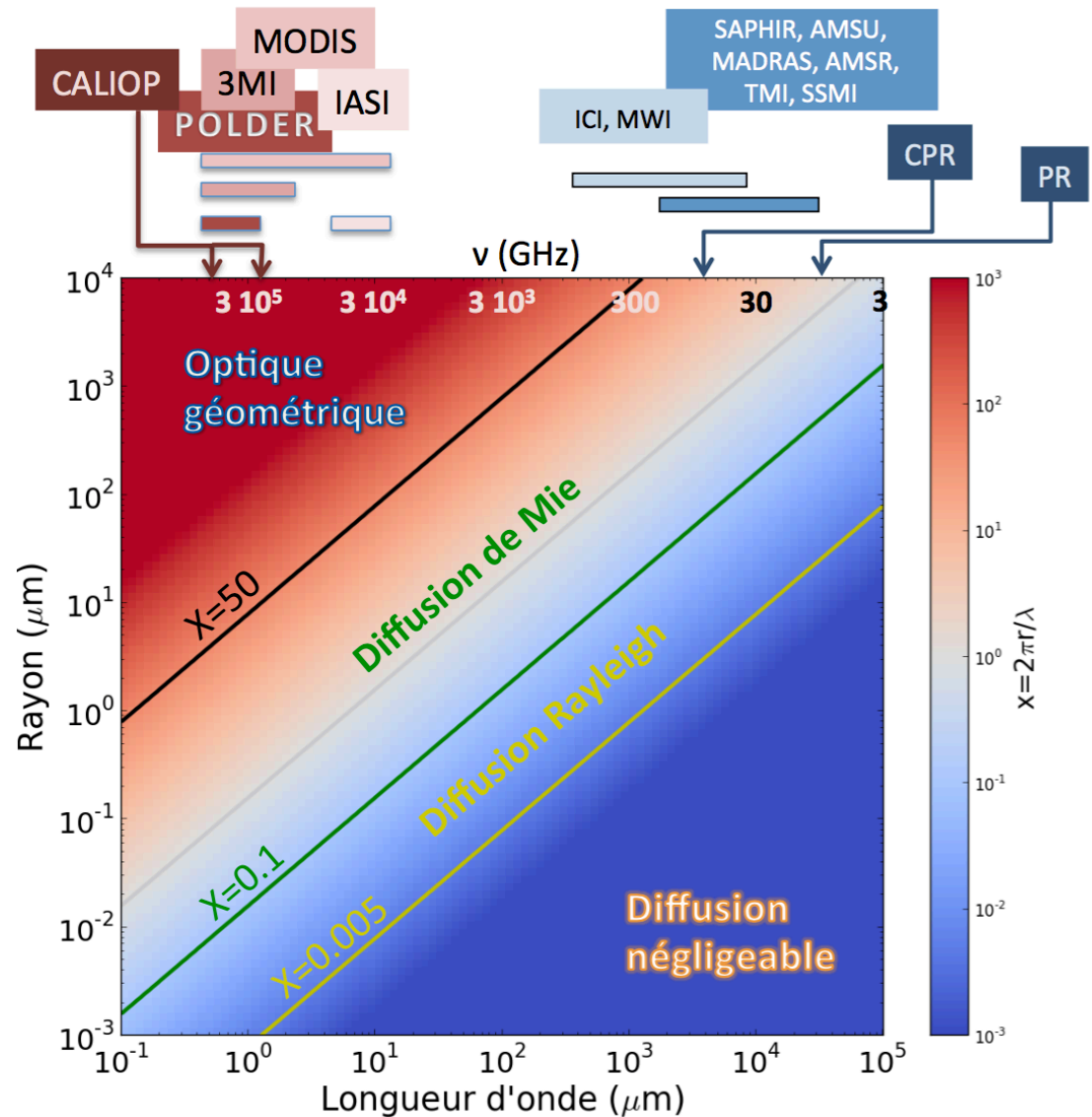
Cristaux de glace

Gouttelettes d'eau
nuageuse

Poussières désertiques,
fumées,
pollens, embruns,
brumes

Acide sulfurique, suie

Molécules d'air



Diffusion

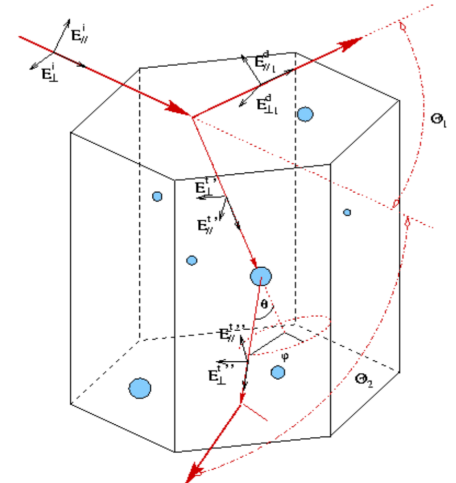
Diffusion Rayleigh : formulation approchée.

Diffusion de Mie: Méthode exacte pour résoudre les équations de Maxwell pour des particules sphériques – Temps de calcul prohibitif pour $x > 100$.

Diffusion géométrique (ou optique géométrique) : $x > 50$
méthodes approchées fondées sur les lois de l'optique géométrique (Fresnel, Snell-Descartes). Forme quelconque. Temps de calcul importants.

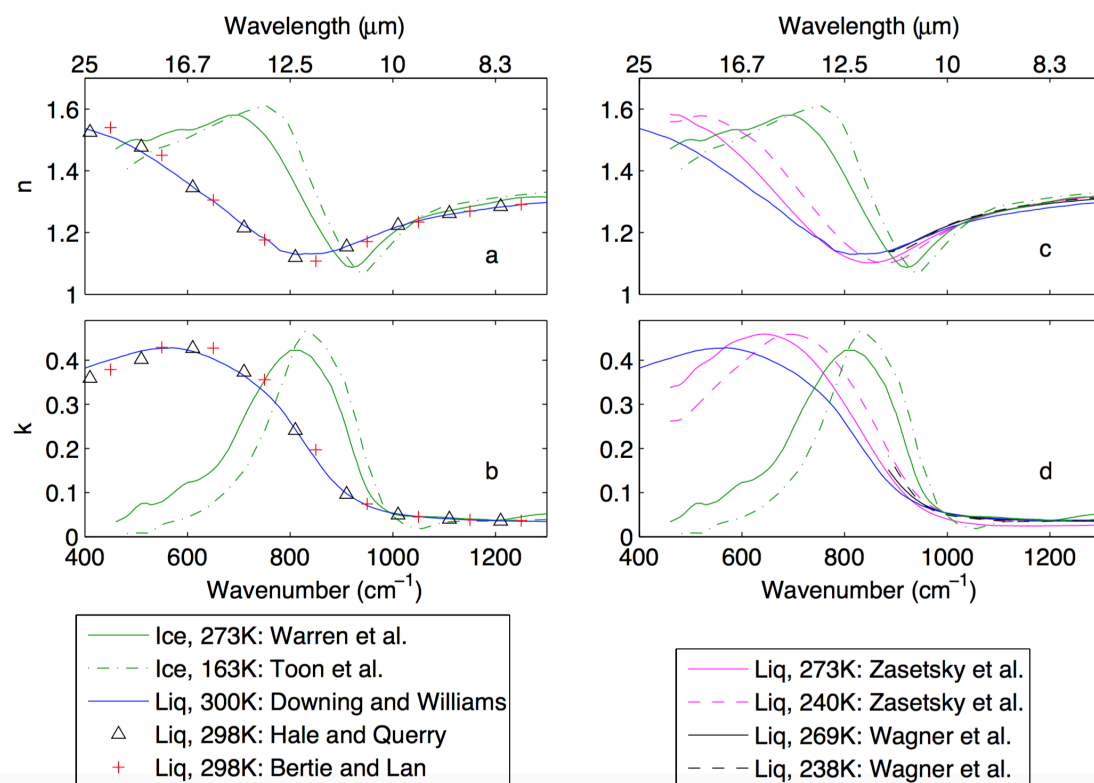
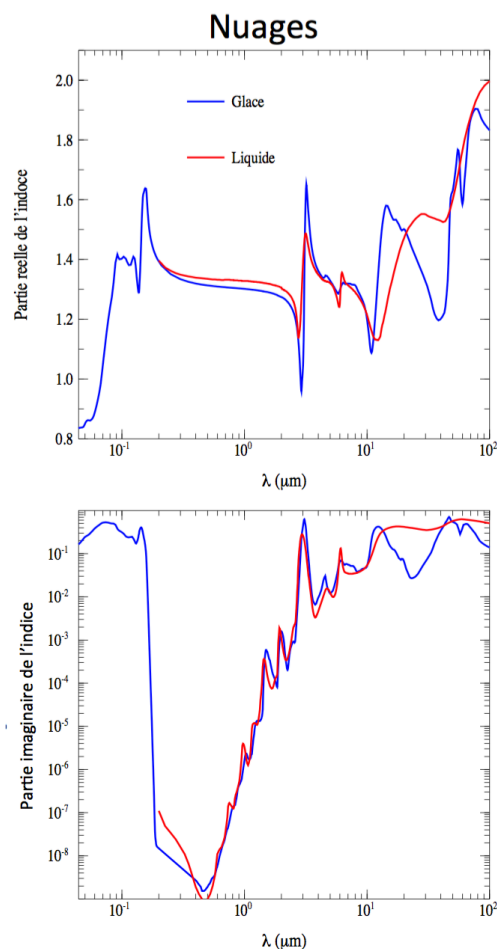
Nécessite de connaître **l'indice de réfraction complexe et la distribution en taille**.

→ Calcul des propriétés optiques: en général, utilisation de **LUTs et database**.



Paramètres importants pour la diffusion

Indice de réfraction:



Indice de réfraction: Rowe et al., ACP, 2013
À gauche: données antérieures à 2005; $T > 273$ K,
À droite: données plus récentes pour l'eau surfondue : $T < 273$ K

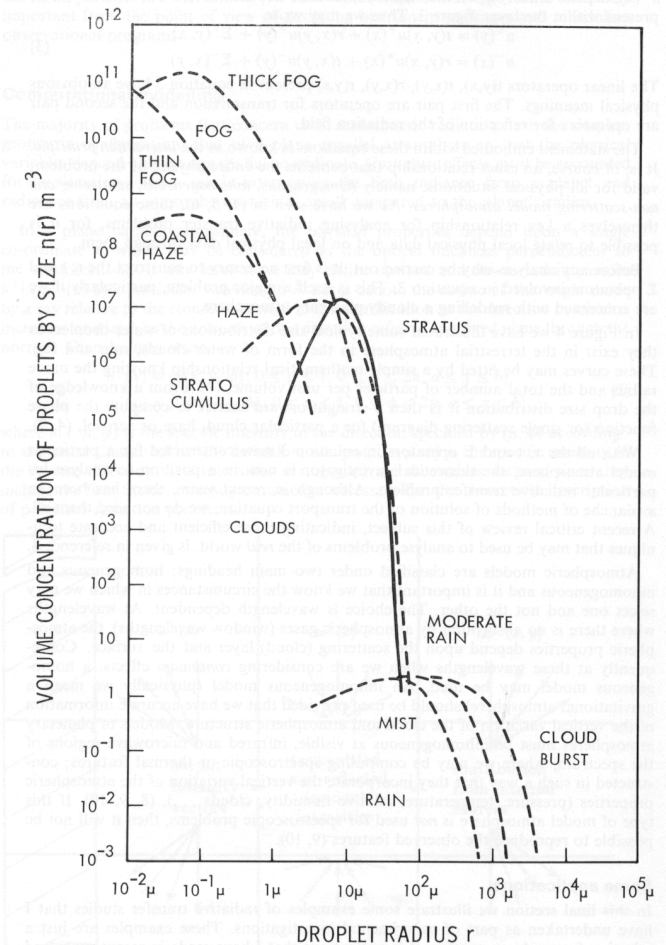
Paramètres importants pour la diffusion

Distribution en taille:

Paramètres importants: rayon effectif et variance effective.

Exemple pour MODIS: gamma modifiée, avec le rayon effectif r_e et la variance σ [Hansen and Travis, 1974, Heymsfield et al., 2002, 2004].

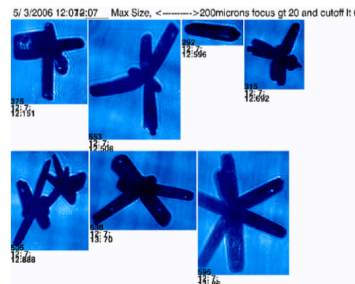
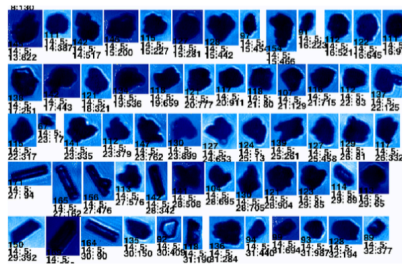
$$n(r, r_e) = N_0 r^{(1-3\sigma)/\sigma} e^{(r/r_e\sigma)}$$



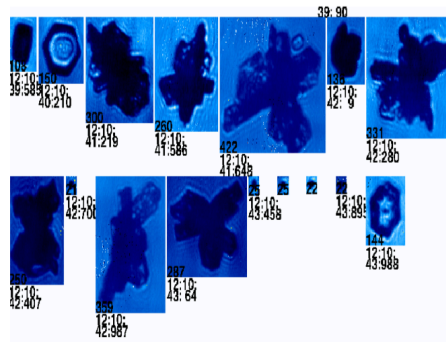
Paramètres importants pour la diffusion

Pour l'optique géométrique: forme des cristaux

- Forme (Cristaux)

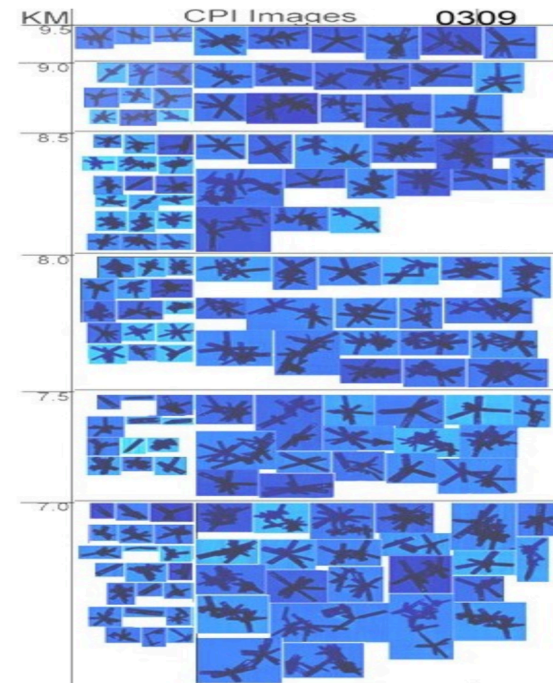


Exemple Cristaux
de glace de latitude
moyenne



Trattoria, Lille 2015

Exemple Cristaux de glace
tropicaux



A. Heymsfield (NCAR)
CPI (SPEC) Images

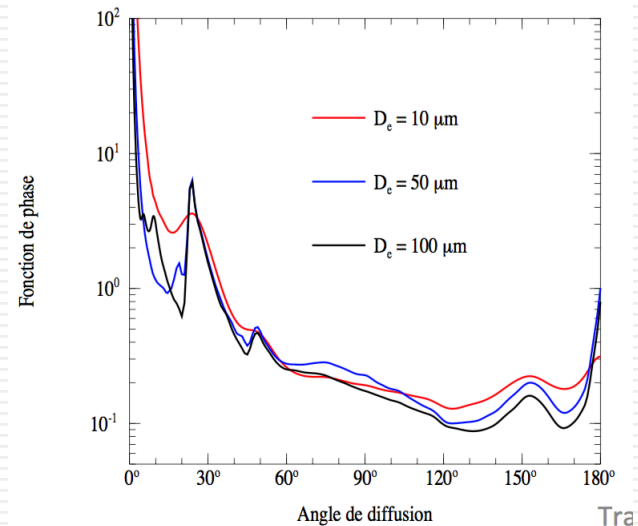
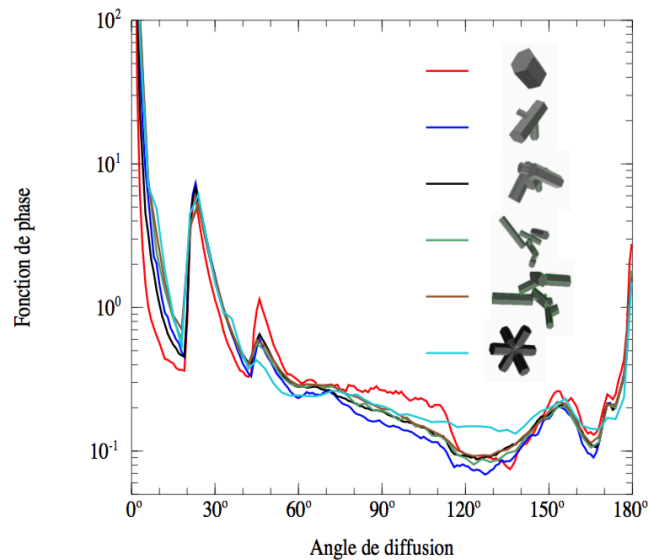
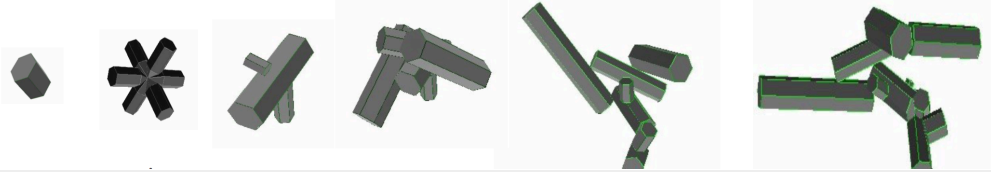
Paramètres importants pour la diffusion

Prise en compte de la forme et de la taille des cristaux:

- Forme (Cristaux)

Cristal $\rightarrow$ forme hexagonale

Formes se complexifiant avec la taille des cristaux



Méthodes:

DDA (discrete dipole approximation) pour les petits cristaux (Purcell and Pennypacker, 1973)

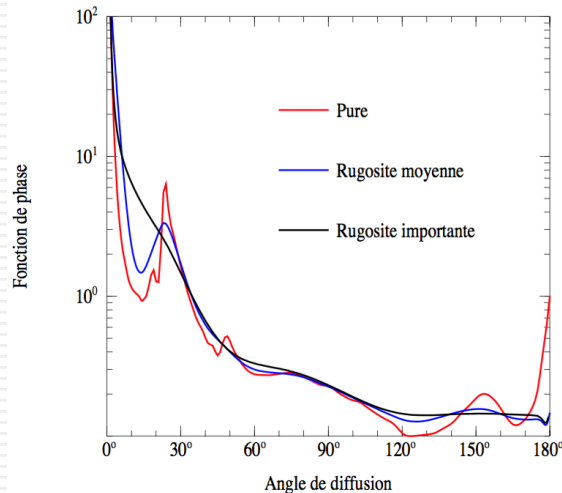
IGOM (improved geometric optics method) pour les plus gros cristaux (Yang and Liou, 1997)

Introduction d'une distribution en taille couplée à une distribution en forme Baum et al. (2014)

Baran and Labonnote (2007)

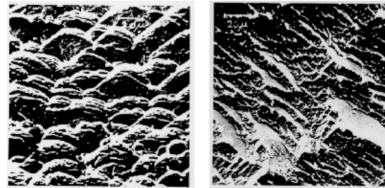
Paramètres importants pour la diffusion

Rugosité:

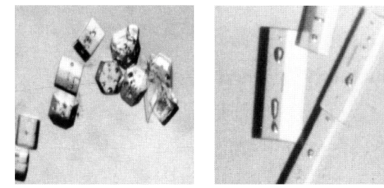


- Hétérogénéités (Cristaux)

Rugosité de surface



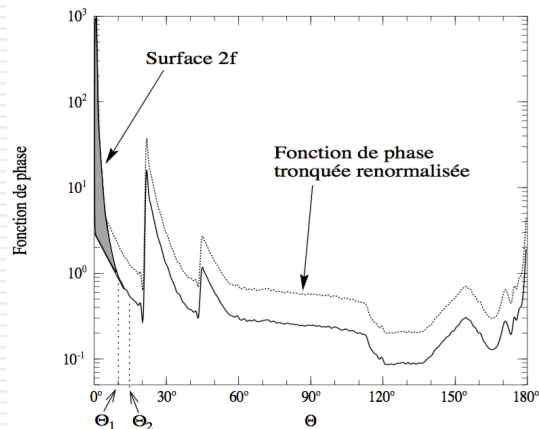
Inclusions



Ice Cloud Research Team: *Bryan A. Baum (UW-Madison), Ping Yang and colleagues (Texas A&M), Andrew J. Heymsfield, Carl Schmitt, and Aaron Bansemer (NCAR)*

https://www.ssec.wisc.edu/ice_models/

Troncature de la fonction de phase:



Décomposition de la matrice de phase en fonctions sphériques généralisées. Nombre de termes de la décomposition augmente avec la taille → **temps de calcul prohibitif**

Méthodes de troncature pour réduire le nombre de termes du développement (Potter, Delta-M et Delta-fit).

Bonne précision, accélération des temps de calcul

Diffusion multiple

Base de données multi-sources

Code	Type	Limitation
GEISA	Indices de réfraction de plusieurs types d'aérosols et propriétés optiques et microphysiques des aérosols et nuages. Mise à jour en 2014. Hébergé par le Pôle Atmosphère.	Jacquinet-Husson et al., 2011 https://www.aeris-data.fr/geisa/
HITRAN	Indices de réfraction de plusieurs types d'aérosols et propriétés optiques et microphysiques des aérosols.	www.cfa.harvard.edu/hitran
GADS/OPAC	Indices de réfraction de plusieurs types d'aérosols, distribution en taille de particules (aérosols et nuages) et propriétés optiques calculés par des codes de Mie et récemment T-Matrix. Intégrée dans GEISA.	Hess et al., 1998 http://cds-espri.ipsl.fr/etherTypo/?id=989
ADIENT	Indices de réfraction des d'aérosols et autres mesures issues 4 campagnes aéroportées	www.met.reading.ac.uk/adient/ADIENT.html
CHARMEX, AMMA, FENNEC	Exemples de campagnes de terrain de grande envergure, où nombreuses mesures des particules ont été effectuées	charmex.lsce.ipsl.fr amma-international.org fennec.ouce.ox.ac.uk
LaMP	Mesures de propriétés microphysiques et optiques des aérosols et des nuages	wwwobs.univ-bpclermont.fr/atmos/
LOA	Mesures de propriétés microphysiques et optiques des aérosols et des nuages	http://www-loa.univ-lille1.fr/

Diffusion multiple

Méthodes de résolution de l'ETR en diffusion multiple disponibles:

Code	Type	Limitation	Spectral
Two-Streams	Oper.	Flux montants et descendants	SW / LW
Adding-Doubling	Rech. / Oper.	PP Polarisation	SW / LW
OS	Rech. / Oper.	PP Polarisation aérosols	SW
DISORT	Rech. / Oper.	PP	SW / LW
VLIDORT	Rech. / Oper.	Pseudo - sphérique Polarisation	SW / LW
Monte Carlo	Rech.	3D Polarisation	SW / LW

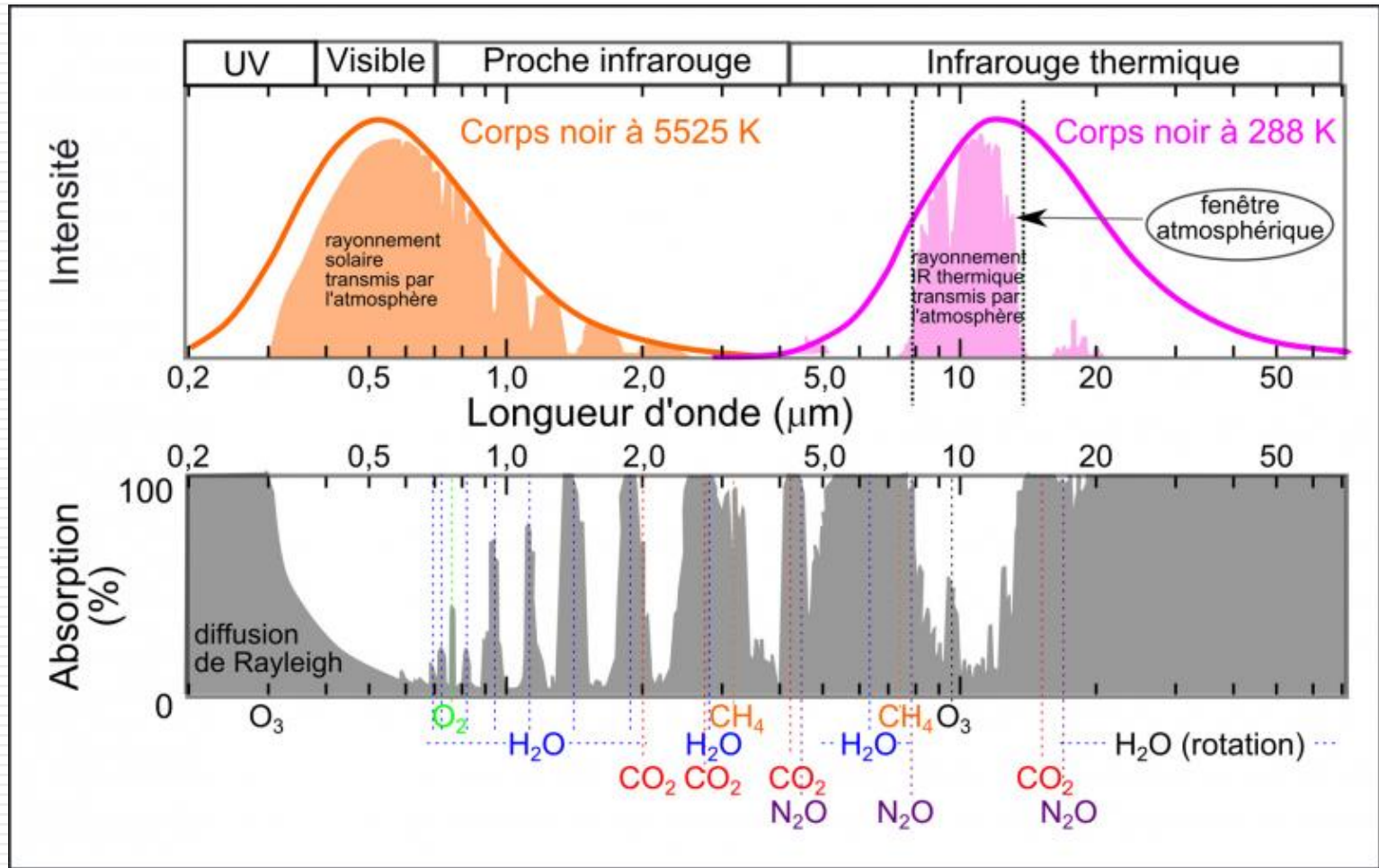
★ **Plus d'information, voir Trattoria 2015:**
Conférence de Laurent Labonnote.

Diffusion

Recommandations TRATTORIA:

- Disposer de bases de données pour les propriétés optiques des particules (nuages et aérosols).
- Disposer d'indices de réfraction complexes de bonne qualité pour les particules (en particulier pour les aérosols).
- Développer des méthodes synergétiques exploitant la complémentarité des instruments de mesures pour restituer de nouvelles propriétés des particules.
- Disposer de codes inverses rapides prenant en compte l'ensemble des paramètres.

Absorption gazeuse



C. Clerbaux / Le climat en questions

Spectroscopie des gaz

Epaisseur optique d'absorption τ_a fonction du coefficient d'absorption K_ν :

$K_\nu = S * f(\nu)$ avec S l'intensité et $f(\nu)$ la forme de la raie (pour chaque transition)

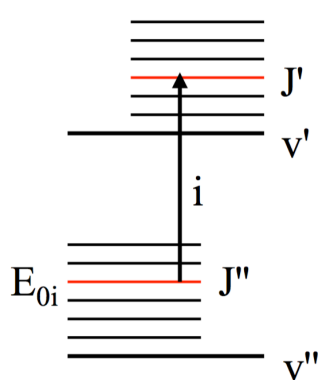
$$K_\nu = S \times f(\nu)$$

intensité intégrée

forme de raie

$$S = \int_0^{+\infty} K_\nu d\nu$$

$$\int_0^{+\infty} f(\nu) d\nu = 1$$



1 transition

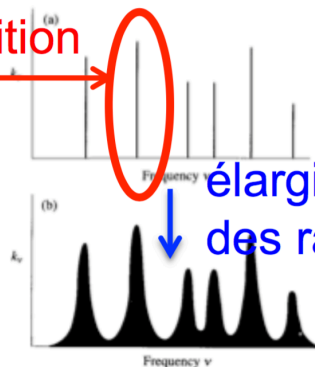
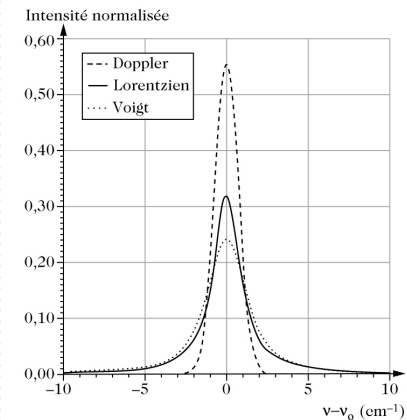


Fig. 3.5 Hypothetical line spectrum (a) before broadening, (b) after broadening.

Collision,
Effet doppler

élargissement
des raies



Nombreuses avancées ces dernières années: nombre de transitions et de molécules, forme des raies, prise en compte des line-mixing, etc.

★ **Plus d'information, voir Trattoria 2015:**
Conférence de Cyril Crevoisier

Absorption du rayonnement par les gaz

Bases de données spectroscopiques: GEISA (LMD) ou HITRAN (USA)

Raies spectrales sur l'ensemble du spectre

1975: 100 000 raies spectrales dans HITRAN

2015: Plus de cinq millions de raies spectrales pour GEISA

52 molécules d'intérêt atmosphérique (H_2O , CO_2 , O_3 , CH_4 , O_2 ...)

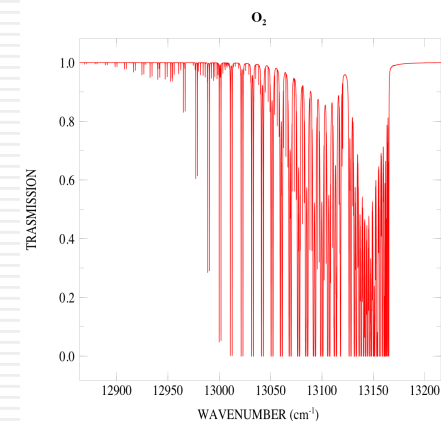
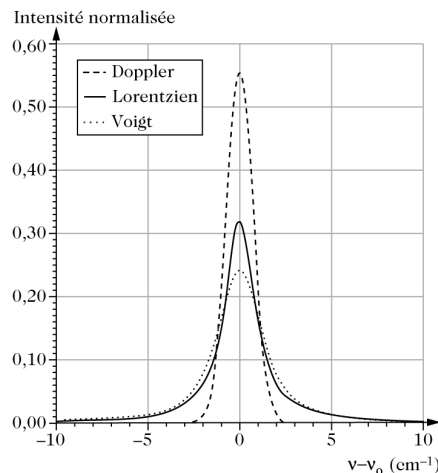
Complétées par des continua d'absorption (paramétrisations) pour H_2O , O_3 , N_2 , CFC ...

Haute résolution spectrale ($\Delta\nu \approx 0.0001 \text{ cm}^{-1}$; $\Delta\lambda \approx 1 \cdot 10^{-6} \mu\text{m}$): **code raie-par-raie (LBL)**.

Table 2
Description of the quantities present in the 100- and 160-character records of the *HITRAN* line-by-line section

Parameter	Meaning	Field length of the (100/160) character records	Type	Comments or units
<i>M</i>	Molecule number	2/2	Integer	<i>HITRAN</i> chronological assignment
<i>I</i>	Isotopologue number	1/1	Integer	Ordering within a molecule by terrestrial abundance
<i>v</i>	Vacuum wavenumber	12/12	Real	cm^{-1}
<i>S</i>	Intensity	10/10	Real	$\text{cm}^{-1}/(\text{molecule cm}^{-2})$ at standard 296 K
<i>W</i>	Weighted square of the transition moment	10/10	Real	Debye ² (for an electric dipole transition)
<i>A</i>	Einstein <i>A</i> -coefficient	0/10	Real	s^{-1}
γ_{air}	Air-broadened half-width	5/5	Real	WHHM at 296 K ($\text{in cm}^{-1} \text{ atm}^{-1}$)
γ_{self}	Self-broadened half-width	5/5	Real	WHHM at 296 K ($\text{in cm}^{-1} \text{ atm}^{-1}$)
<i>E'</i>	Lower-state energy	10/10	Real	cm^{-1}
<i>E''</i>	Temperature-dependence exponent for γ_{air}	4/4	Real	unless, with $\gamma_{\text{air}}(T) = \gamma_{\text{air}}(T_0) \times (T_0/T)^{E''}$
<i>b_{air}</i>	Air pressure-induced line shift	8/8	Real	$\text{cm}^{-1} \text{ atm}^{-1}$ at 296 K
<i>J'</i>	Upper-state "global" quanta	3/15	Hollerith	see Table 3
<i>J''</i>	Lower-state "global" quanta	3/15	Hollerith	see Table 3
<i>Q'</i>	Upper-state "local" quanta	9/15	Hollerith	see Table 4
<i>Q''</i>	Lower-state "local" quanta	9/15	Hollerith	see Table 4
<i>Ierr</i>	Uncertainty indices	3/6	Integer	Accuracy for 3/6 critical parameters
<i>Iref</i>	Reference indices	6/12	Integer	References for 3/6 critical parameters
<i>*</i>	Flag	0/1	Character	Availability of program and data for the case of line mixing
<i>g'</i>	Statistical weight of the upper state	0/7	Real	See details in Ref. [3]
<i>g''</i>	Statistical weight of the lower state	0/7	Real	See details in Ref. [3]

Notes: For the field-length column, the notation A/B corresponds to the number of characters respectively in the 100- and 160-character records. For example, concerning the weighted square of the transition moment, the number of characters for *W* is 10 in the case of the *HITRAN* 2000 edition [1], and 0 in the case of the *HITRAN* 2004 edition since this parameter has been replaced by the Einstein *A*-coefficient.



Bases spectroscopiques



Raies d'absorption



Spectres d'absorption (LBL)

Bases de données spectroscopiques

HITRAN (2016): high-resolution transmission molecular absorption database / Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, MA, USA – Gordon et al., JQSRT, 2016

Table 1
Parameter identifiers in HITRANonline.

Parameters from the HITRAN2004 format in HITRANonline			
Parameter	Units	Identifier ^a	Description
Molecule ID	–	molec_id	HITRAN integer identifying the molecule
Isotopologue ID	–	local_iso_id	HITRAN integer identifying the isotopologue of a particular molecule
ν	cm^{-1}	nu	Transition wavenumber
S	$\text{cm}^{-1}/(\text{molecule cm}^{-2})$	sw	Transition intensity, weighted by isotopologue abundance
A	s^{-1}	a	Einstein A-coefficient
γ_{air}	$\text{cm}^{-1} \text{ atm}^{-1}$	gamma_air	Air-broadened Lorentzian half width at half maximum (HWHM) coefficient (for Voigt lineshape)
γ_{self}	$\text{cm}^{-1} \text{ atm}^{-1}$	gamma_self	Self-broadened Lorentzian HWHM coefficient (for Voigt lineshape)
E'	cm^{-1}	elower	Lower-state energy
n_{air}	–	n_air	Temperature-dependence exponent for γ_{air}
δ_{air}	$\text{cm}^{-1} \text{ atm}^{-1}$	delta_air	Air pressure-induced line shift
V^b	–	global_upper_quanta	Upper-state "global" quanta in HITRAN2004 format
V'^b	–	global_lower_quanta	Lower-state "global" quanta in HITRAN2004 format
Q^b	–	local_upper_quanta	Upper-state "local" quanta in HITRAN2004 format
Q'^b	–	local_lower_quanta	Lower-state "local" quanta in HITRAN2004 format
i_{err}^b	–	ierr	Ordered list of indices corresponding to uncertainty estimates of transition parameters
I_{ref}^b	–	iref	Ordered list of reference identifiers for transition parameters
g'	–	gp	Upper-state statistical weight
g''	–	gpp	Lower-state statistical weight
<i>Metadata and other special parameters</i>			
Transition ID	–	trans_id	Unique integer identifying the transition
Global Isotopologue ID	–	global_iso_id	Global integer ID identifying the isotopologue (unique across the whole database)
qns'	–	statep	Upper-state quantum numbers in HITRANonline format
qns''	–	statepp	Lower-state quantum numbers in HITRANonline format
.par line	–	par_line	Complete representation of the line in the HITRAN2004 160-character format
<i>Parameters for broadening by new perturbing species, X', and line-mixing parameters</i>			
γ_X	$\text{cm}^{-1} \text{ atm}^{-1}$	gamma_X	Lorentzian HWHM coefficient (for Voigt lineshape) for broadening by perturber X
n_X	–	n_X	Temperature-dependence exponent for γ_X
n_{self}	–	n_self	Temperature-dependence exponent for γ_{self}
δ_{self}	$\text{cm}^{-1} \text{ atm}^{-1}$	delta_self	Self-induced pressure line shift
δ'_{air}	$\text{cm}^{-1} \text{ atm}^{-1} \text{ K}^{-1}$	deltap_air	Linear temperature dependence coefficient for δ_{air}
δ'_{self}	$\text{cm}^{-1} \text{ atm}^{-1} \text{ K}^{-1}$	deltap_self	Linear temperature dependence coefficient for δ_{self}
δ'_{H_2}	$\text{cm}^{-1} \text{ atm}^{-1} \text{ K}^{-1}$	deltap_H2	Linear temperature dependence coefficient for δ_{H_2}
δ_X	$\text{cm}^{-1} \text{ atm}^{-1}$	delta_X	Pressure-induced line shift due to perturber X
γ_{air}	$\text{cm}^{-1} \text{ atm}^{-1}$	y_air	First-order (Rosenkranz) line coupling coefficient within Voigt profile; air-broadened environment
γ_{self}	$\text{cm}^{-1} \text{ atm}^{-1}$	y_self	First-order (Rosenkranz) line coupling coefficient within Voigt profile; air-broadened environment

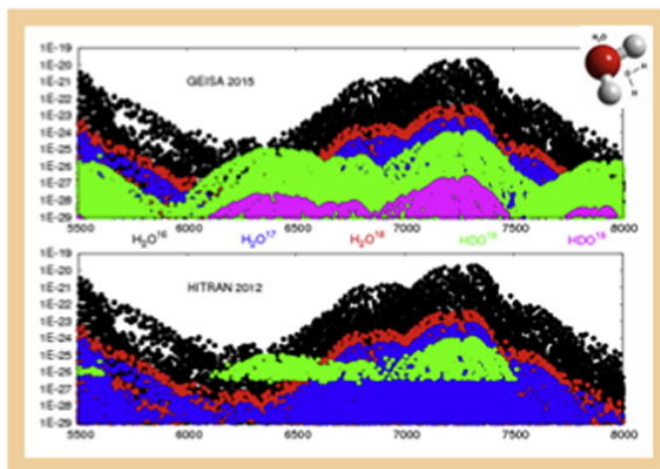
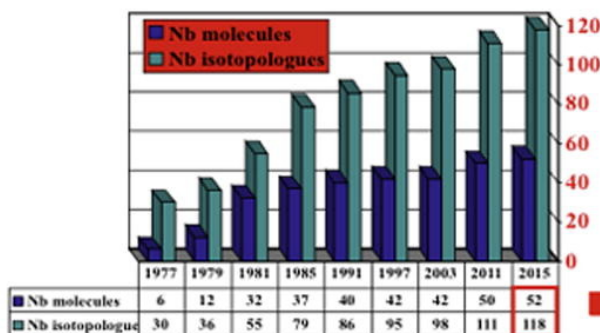
Bases de données spectroscopiques

GEISA (2015): Gestion et Etude des Informations Spectroscopiques Atmosphériques / LMD Ecole Polytechnique, France – Jacquinet-Husson et al., Journal of Molecular Spectroscopy.



GEISA 2015 LINE PARAMETERS SUB-DATABASE

Evolution since 1977

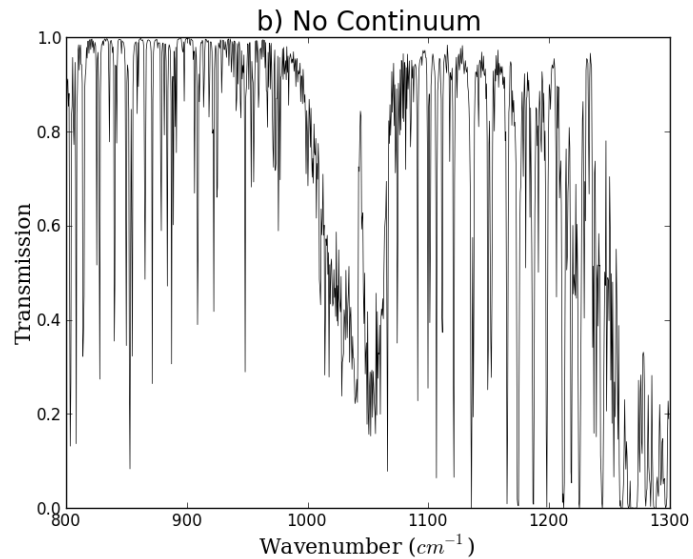
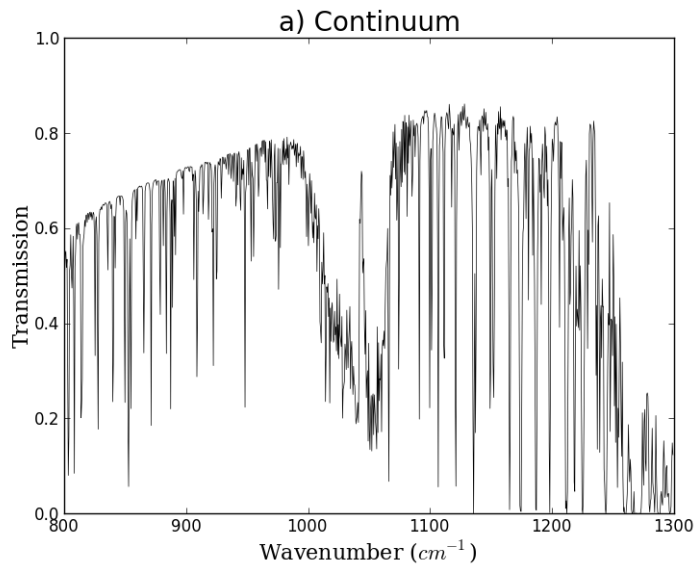


Molecular Species	ID	Contributors
H ₂ O	1	L. Coudert, J. Tennyson, A. Campargue, S. Mikhailenko, O.V. Naumenko, J. Orphal, A. Ruth, R.R. Gamache
CO ₂	2	V.I. Perevalov, S. Tashkun, R.R. Gamache
O ₃	3	A. Barbe, S. Mikhailenko, V.G. Tyuterev
CH ₄	6	V. Boudon, L.R. Brown, A. Campargue, D.C. Benner
O ₂	7	S. Yu, B. Drouin
SO ₂	9	D. Jacquemart, H.S.P. Müller
NH ₃	11	M. Down, J. Tennyson, L.R. Brown
HNO ₃	13	A. Perrin
H ₂ CO	21	D. Jacquemart, H.S.P. Müller
C ₂ H ₆	22	L.R. Brown, K.Y. Sung
CH ₃ D	23	L.R. Brown, A. Campargue
C ₂ H ₂	24	D. Jacquemart
C ₂ H ₄	25	J.-M. Flaud
HCN	27	J. Tennyson
C ₂ N ₂	29	A. Jolly, A. Fayt
C ₂ H ₂	30	A. Jolly, A. Fayt
CH ₃ Cl	34	D. Jacquemart, A. Nikitin, J. Buldyreva, N. Lavrentieva
H ₂ S	36	O.V. Naumenko, L.R. Brown
CH ₃ Br	43	D. Jacquemart
HNC	46	J. Tennyson
HDO (NEW)	51	A. Campargue, S. Mikhailenko, O.V. Naumenko, R.R. Gamache
SO ₂ (NEW)	52	J. Tennyson, D.S. Underwood

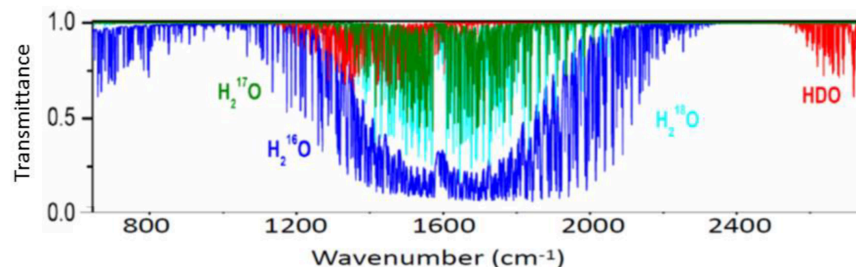
Codes « line-by-line »

Absorption gazeuse à haute résolution spectrale: de 10^{-4} à 10^{-2} cm^{-1} (environ 10^{-6} μm)

Codes LBL: très précis mais lents



Prise en compte du continuum de vapeur d'eau



Prise en compte des isotopologues

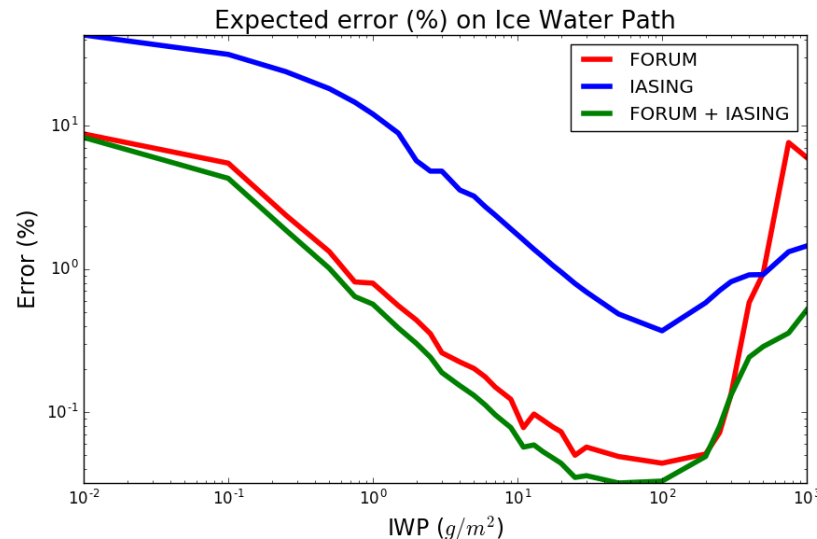
Codes « line-by-line »

Apport de l'infrarouge lointain pour l'étude des nuages:

Intérêt de l'IR à haute résolution spectrale: IASI entre 645 et 2760 cm^{-1} (3.6 à 15 μm)

FORUM (Far Outgoing Radiation Understanding and Monitoring): de 100 et 1600 cm^{-1}

Simulations LBL + VLIDORT: meilleure restitution de IWP en prenant en compte: l'erreur de mesure des instruments, mauvaise connaissance de l'émissivité et de la température de surface, du profil de température, du profil du contenu en vapeur d'eau, O_3 , CH_4 et CO_2 , ainsi qu'une mauvaise représentation du profil de glace dans le nuage.



Impact sur l'IWP (L. Labonnote - LOA)

Méthodes approchées – plus rapides

1. Modèles de bandes:

Transmission moyenne pour un intervalle spectral donné $\Delta\nu$:

$$T_{\Delta\nu} = \prod_{i=1}^N \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} \int_0^\infty p(S_i) \exp[-aS_i g(\nu - \nu_i)] dS_i d\nu_i$$

La position spectrale des raies n'a pas d'importance.

Goody $T_{\Delta\nu} = \exp \left[-a \frac{\bar{S}}{\delta} \left(1 + \frac{a\bar{S}}{\pi\bar{\alpha}} \right)^{-1/2} \right]$

ou

Malkmus $T_{\Delta\nu}^M = \exp \left[-\frac{2\pi\bar{\alpha}}{\delta} \left[\left(1 + \frac{a\bar{S}}{\pi\bar{\alpha}} \right)^{1/2} - 1 \right] \right]$

$$\bar{S} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i \quad ; \quad \bar{\alpha} = \frac{4}{\pi\bar{S}} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i \alpha_i)^{1/2} \right]^2$$

Approche simple, mais moins précise. Difficultés:

- cas des milieux inhomogènes,
- prise en compte de la diffusion multiple.

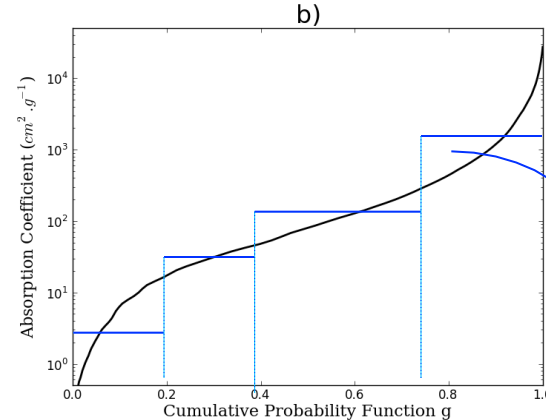
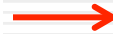
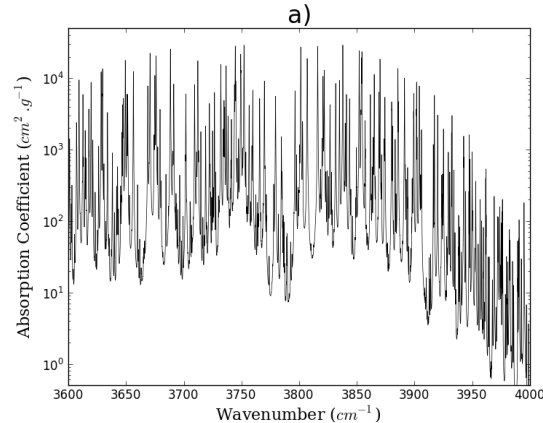
Méthodes approchées

2. Méthode de la k-distribution: actuellement très utilisée en transfert radiatif atmosphérique.

$$T_{\Delta\nu}(P, T) = \frac{1}{\Delta\nu} \int_0^{\infty} f(k) \exp[-k(P, T)u(P, T)] dk$$

Pour chaque intervalle $\Delta\nu$: **Fonction de répartition g**

$$g(k_l) = \int_0^{k_l} f(k) dk$$



Résolution
du transfert
radiatif pour
chaque
coefficient.

$$T_{\Delta\nu}(P, T) \approx \sum_{i=1}^N \Delta g_i \exp[-k_i(P, T)u(P, T)] \approx \sum_{i=1}^N a_i \exp[-k_i(P, T)u(P, T)]$$

Méthodes approchées

Avantages:

- Simple, rapide et assez précise,
- prise en compte de la diffusion multiple,
- prise en compte de la réponse spectrale du capteur,
- atmosphères inhomogènes (correlated k-distribution).

Inconvénients:

- Une grande précision nécessite d'utiliser la « non correlated k-distribution » avec un nombre élevé d'exponentielles ... proche d'un LBL ?
- Il faut recalculer les coefficients de la k-distribution pour chaque nouveau capteur.

Méthodes approchées

3. Méthode des prédicteurs:

L'épaisseur optique d'absorption dans un canal i du sommet de l'atmosphère à un niveau j est prédite par:

$$\tau_{abs,i,j} = \tau_{abs,i,j-1} + \sum_{k=1}^K a_{i,j,k} X_{i,k}$$

- a sont les coefficients et X les prédicteurs (K valeurs)
- Les prédicteurs sont des fonctions des variables atmosphériques (P , T , absorbant) et de la sécante (cosinus inverse de l'angle zénithale).
- Les coefficients sont pré-calculés à partir d'un jeu d'entraînement de profils atmosphériques représentant la variabilité naturelle de l'atmosphère.

➔ Code RTTOV

Absorption du rayonnement par les gaz

Recommandations TRATTORIA:

Spectroscopie:

- Disposer d'incertitudes sur les paramètres des base de données spectroscopiques
- Améliorer la prise en compte des « line mixing » (modifications des formes de raies par interférence entre raies)
- Améliorer les paramètres des continua (en particulier H_2O) et sections efficaces et leur dépendances à P et T.

Codes « line-by-line »:

- Disposer de codes de référence prenant en compte tous les paramètres.
- Rendre ces codes disponibles à la communauté, avec une documentation.

Modèles de bandes:

- Développer des paramétrisations fiables et précises: accélération des calculs.
- Développement dans les autres domaines de la physique: par exemple dans le domaine de l'énergétique / thermique au CETHIL (I-distribution) ou au LAPLACE (Monte Carlo – collisions nulles)

Codes de transfert radiatif

Codes de transfert radiatif: programmes informatiques permettant la résolution numérique de l'équation du transfert radiatif.

Hiérarchie de codes, des codes très précis (mais très lents) à des codes plus approchés (donc plus rapides):

Codes de références

- Codes à haute résolution spectrale dits « raie-par-raie » pour l'absorption
 - Prise en compte des effets 3D (Monte Carlo) pour la diffusion

Codes approchés

- hypothèse plan – parallèle – 1D
- modèle de bande pour les gaz
- moyenne ou basse résolution spectrale

Codes ultra rapides

- réseaux de neurones
- Approches statistiques
- calculs massivement parallèles / cartes graphiques

Codes de transfert radiatif

Quelques codes disponibles (non exhaustif):

Code	Origine	Spectral	type	Application
LBLRTM	AER (USA)	UV → IRT	LBL	Télédétection
4A / 4AOP	LMD /Noveltis (France)	IRT / PIR	LBL	Télédétection
ARAHMIS	LOA (France)	UV → IRT	LBL	Télédétection / en développement
RRTM	AER (USA)	UV → IRT	k-distribution	Climat / Télédétection
MODTRAN	AFGL (USA)	UV → IRT	k-distribution	Climat / Télédétection
RTTOV	MetOffice / EUMETSAT	UV → IRT	prédicteurs	Télédétection
STREAMER	USA	UV → IRT	k-distribution	Climat / Télédétection
5S / 6S	LOA (France) / NASA	UV/PIR	Modèle de bandes	Télédétection
SHDOM	Evans(1998), Efremenko and Trautmann (2013), Pincus and Evans (2009)	UV → IRT	Code 3D	Télédétection Luminance et BT au TOA Lidar à HRS (en développement)
3DMCPOL	LOA (France), Cornet et al.,	UV → IRT	Code 3D	Télédétection Polarisation
MATISSE	ONERA	UV → IRT	Scènes 3D	Télédétection
GRASP	GRASP/LOA	Vis/IR	Multi-propos	Télédétection
LIBRADTRAN	Bernhard Mayer et al.	UV → IRT	Ressources en	Transfert radiatif
ARTDECO	LOA	UV → IRT	Ressources en	Transfert radiatif

ARTDECO

Atmospheric Radiative Transfer Database for Earth and Climate Observation

Base de codes et données pour le transfert radiatif:

Codes et données, de l'UV à l'infrarouge thermique.

Luminances (totale and polarisée) et flux.

Atmosphère 1D verticalement inhomogène.

Absorption: k- distribution pour l'absorption gazeuse.

Propriétés des nuages et aérosols (code de Mie, database pour les cristaux).

ARTDECO est développé et maintenu par le Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA), distribué par le centre AERIS/ICARE and financé par le CNRS / Université de Lille and CNES (programme TOSCA). **ARTDECO** est disponible à AERIS/ICARE data and services center:

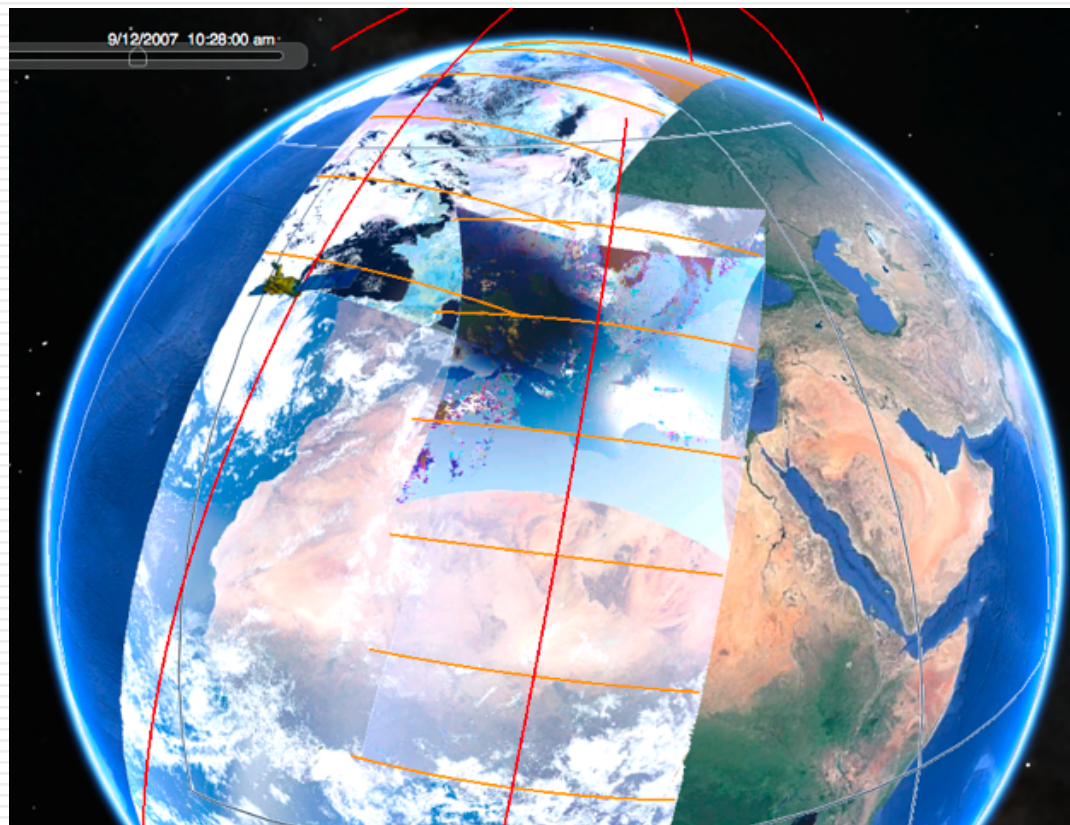
URL : <http://www.icare.univ-lille1.fr/projects/artdeco>

Contact : contact@icare.univ-lille1.fr

Exemple d'application: Etude sur le brouillard (SIRTA), voir conférence et poster demain (session brouillard).



ARTDECO pour la télédétection: mission 3MI



Example of simulated radiances along the orbit of the future 3MI instrument

*This study has been realized as a part of the
EUMETSAT project EUM/CO/13/4600001231/TMa*

ARTDECO: forçage radiatif des aérosols au-dessus des nuages

Exemple d'application: estimation du forçage radiatif des aérosols au-dessus des nuages à l'aide de ARTDECO.

Thèse de Lucia Deaconu – décembre 2017 (LOA).

Estimation obtenues à partir des mesures de POLDER et CALIOP, en utilisant la chaîne de traitement des aérosols et nuage du LOA.

Waquet et al., Geophys. Res. Lett., 2013.

Peers et al., Geophys. Res. Lett., 2016.

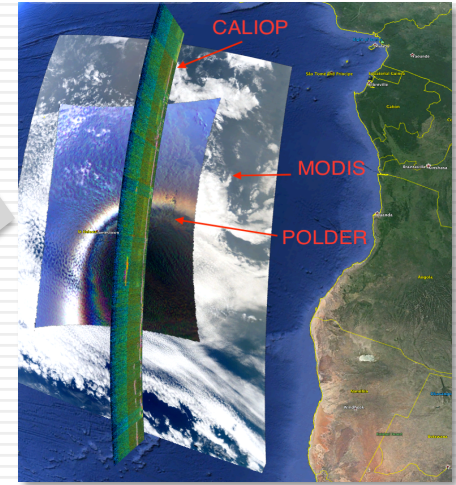
Deaconu L., et al., Atmos. Meas. Tech., 2017.

*"The authors thank the Région Hauts-de-France, and the Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (**CPER Climibio**), and the European Fund for Regional Economic Development for their financial support."*



MINISTÈRE
DE L'ÉDUCATION NATIONALE,
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE

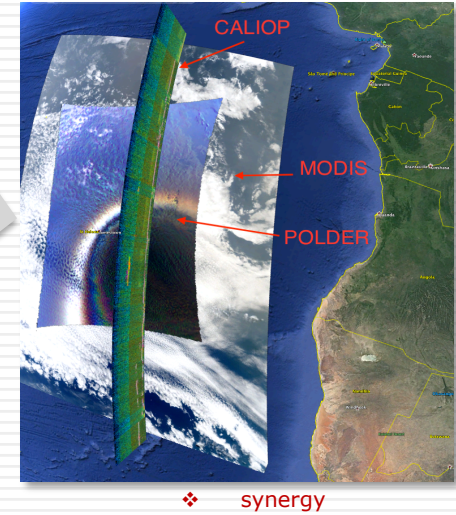
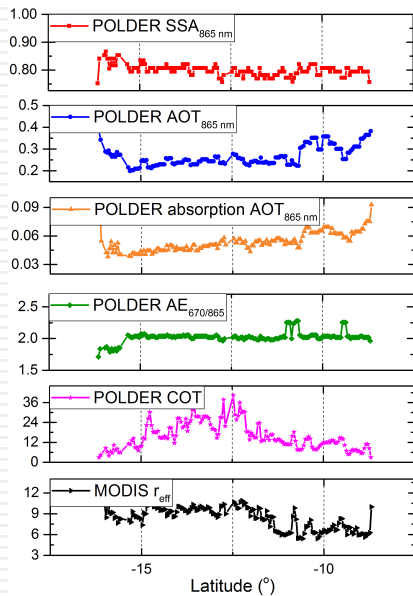
How do we calculate heating rates?



❖ synergy

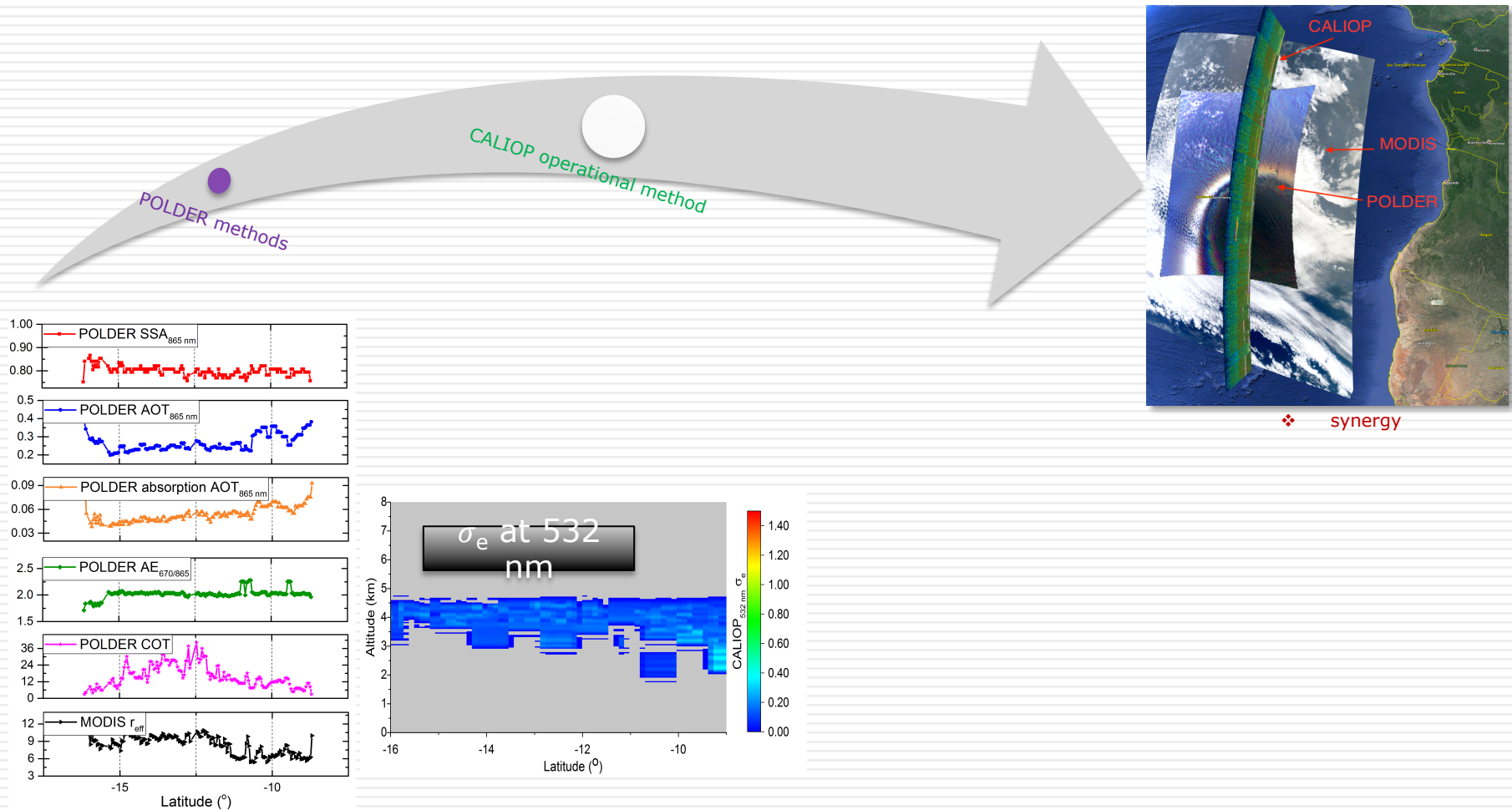
How do we calculate heating rates?

POLDER methods



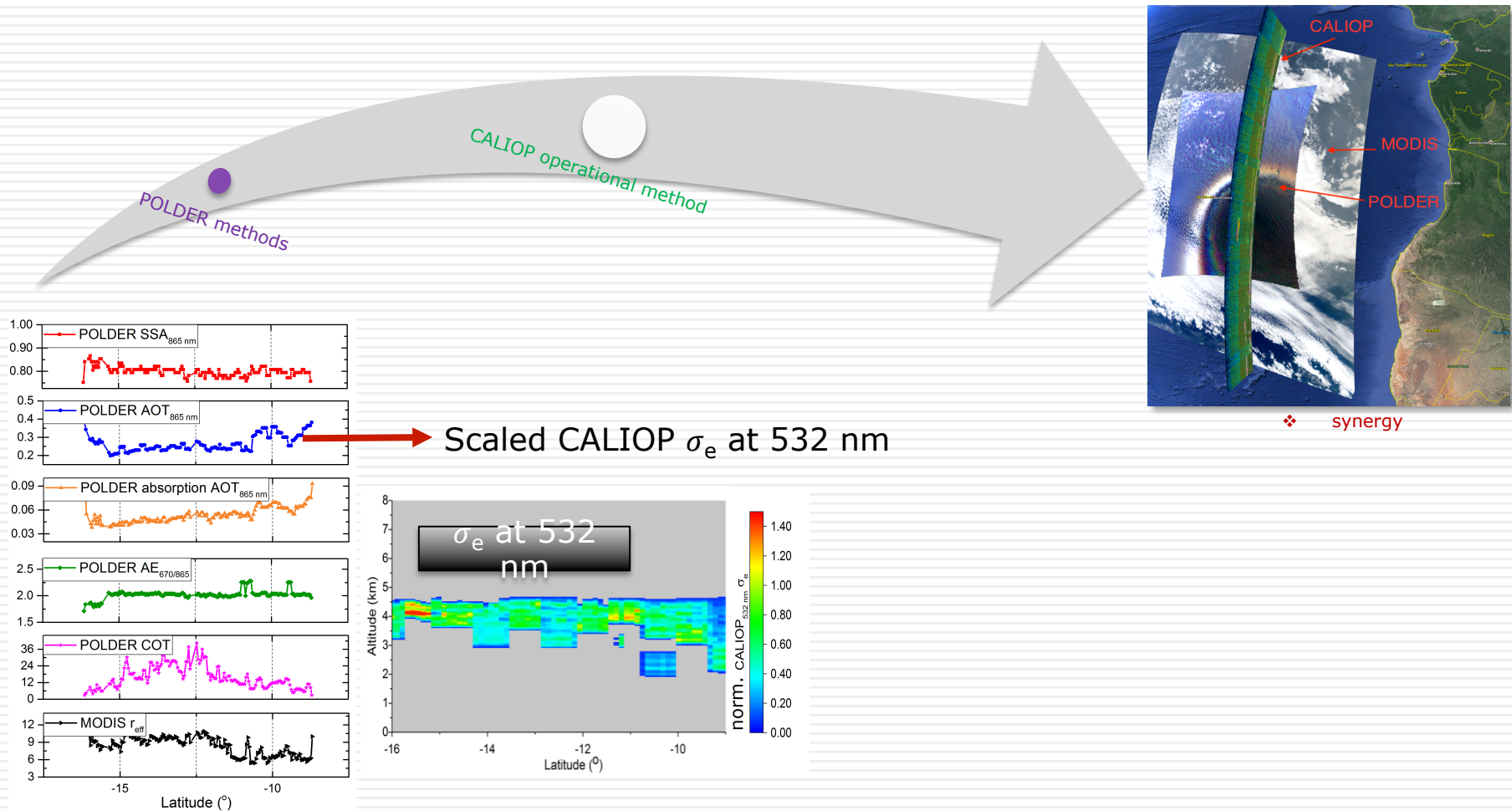
(Waquet et al., 2013 AMT
Peers et al., 2015 ACP)

How do we calculate heating rates?



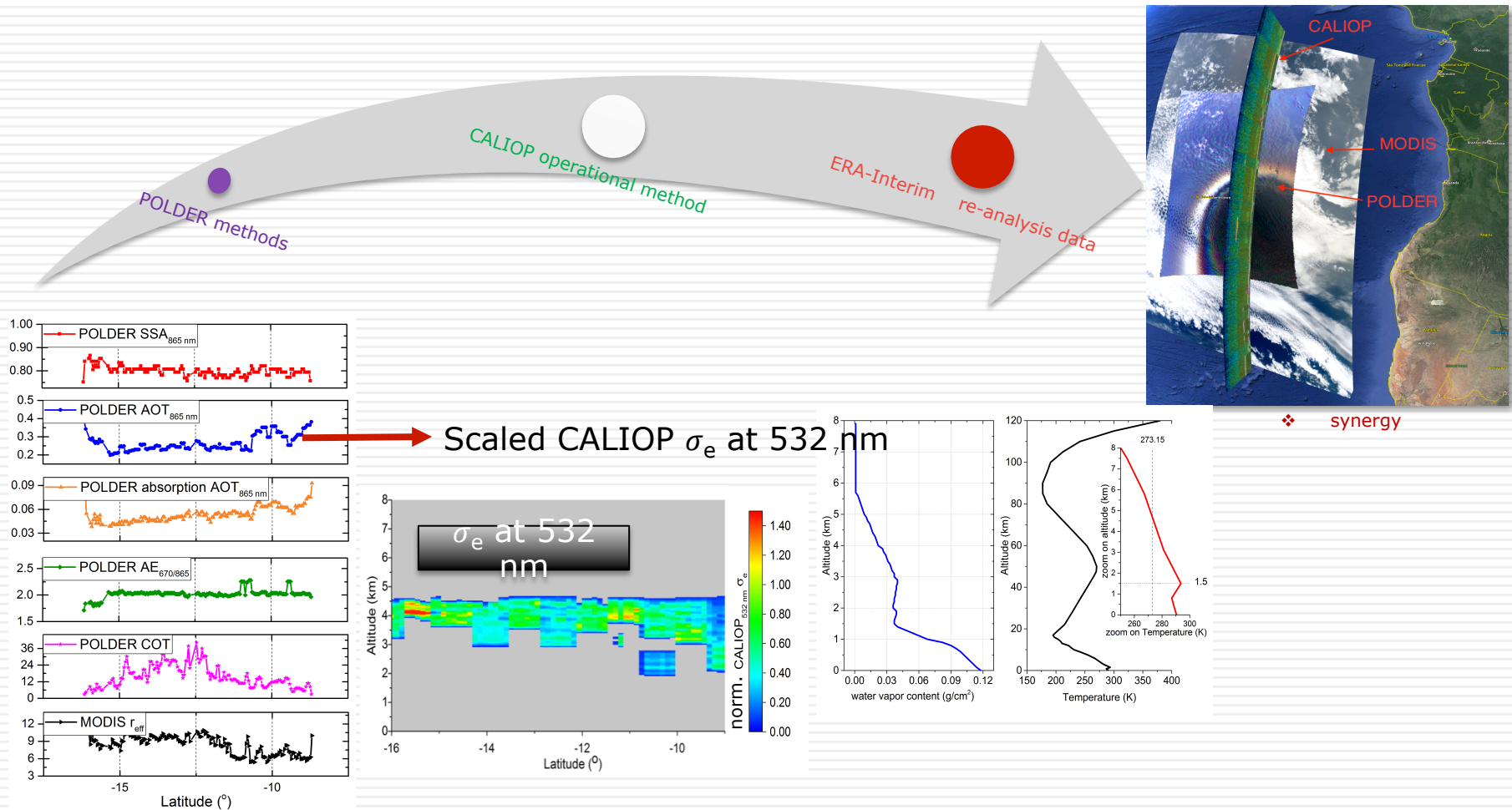
(Waquet et al., 2013 AMT
Peers et al., 2015 ACP)

How do we calculate heating rates?



(Waquet et al., 2013 AMT
Peers et al., 2015 ACP)

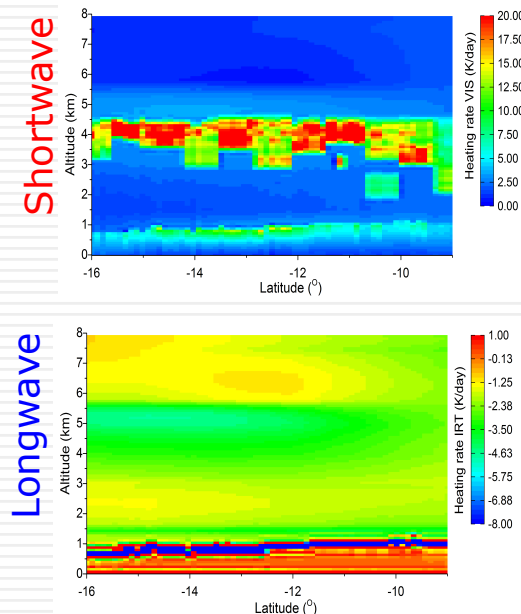
How do we calculate heating rates?



(Waquet et al., 2013 AMT
Peers et al., 2015 ACP)

How do we calculate heating rates?

GAME
Radiative
Transfer code



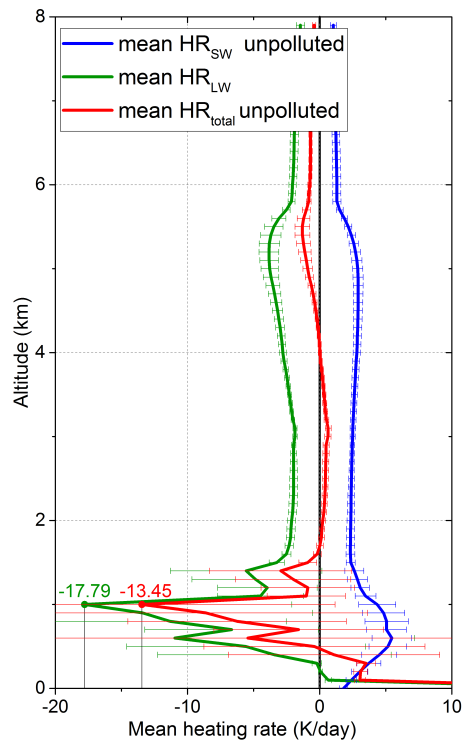
Heating Rates
(100 m vertical resolution)

- Shortwave
- Longwave
- Total

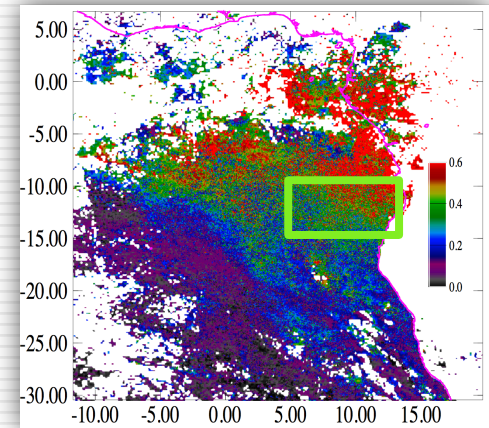
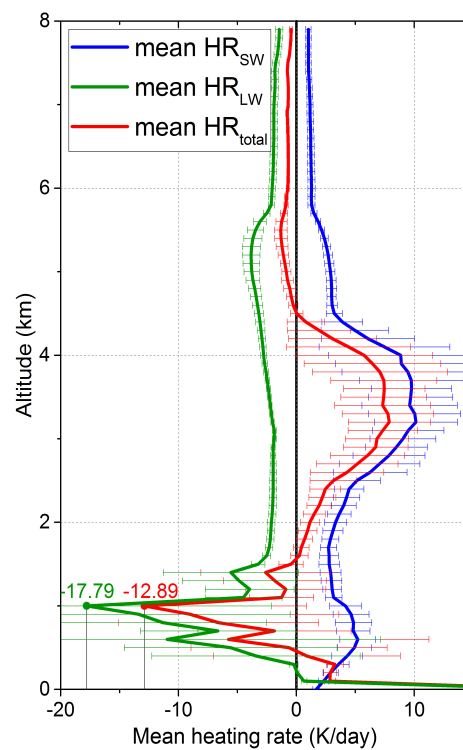
Regional analysis over South Atlantic Ocean (June-August 2008)

Mean heating rate profiles: SW, LW, total

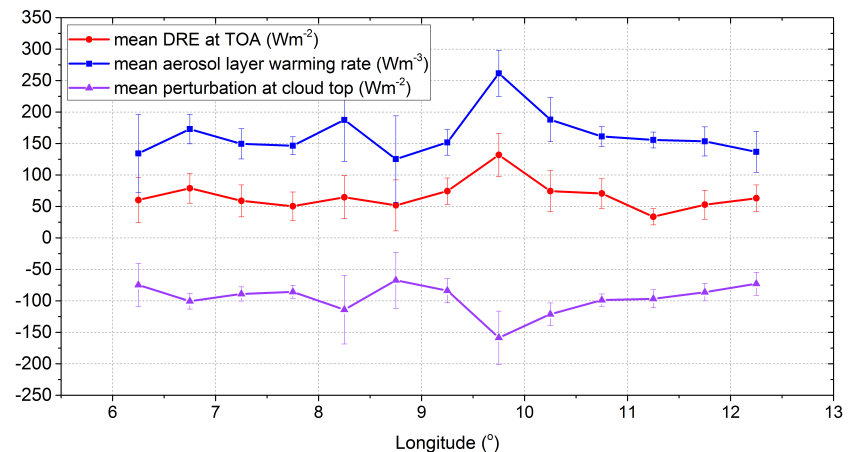
Without aerosols:



With aerosols:



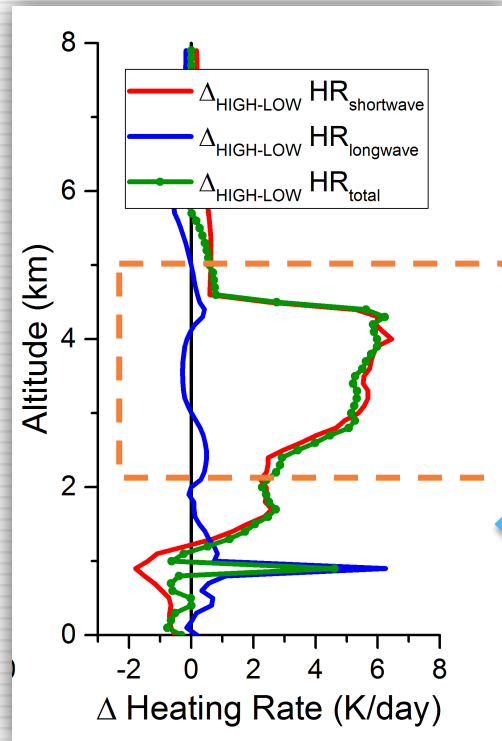
- DRE at TOA (in SW)
- Heat trapped in atmosphere
- Perturbation ($\Delta F \downarrow$ (with - without aerosols) at the cloud top)



Heating rates SW + LW of smoke above cloud

Smoke = aerosol + water vapor

Correlation between the increase of the specific humidity and AOT: necessity of separating the radiative effects.



AOT = 0.26 at 865 nm

$\approx + 0.8$ K/day (water vapor) in SW
 $\approx + 5$ K/day (aerosol) in SW

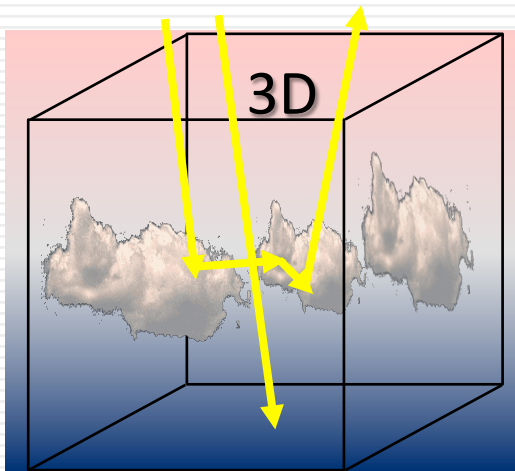
$\approx + 5$ K/day (water vapor) in LW
 $\Rightarrow \approx 7\%$ decrease of cloud top cooling

- The aerosols are **88 %** responsible for warming the layer, modifying the atmospheric stability
- The water vapor leads to approximately **7 %** (at 1 km) decrease in the cloud top cooling

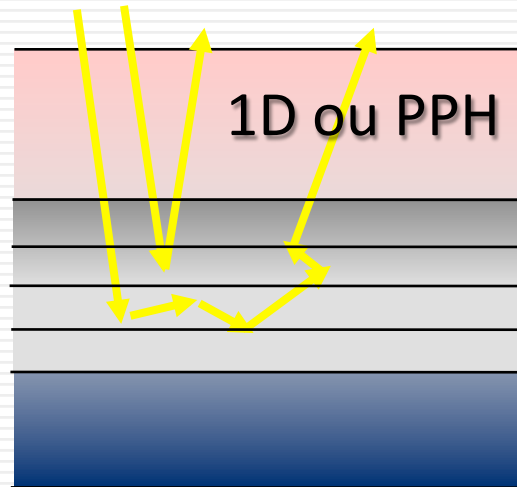
Semi-direct effect may be a **coupled effect of aerosols and water vapor**

Codes de transfert radiatif 3D

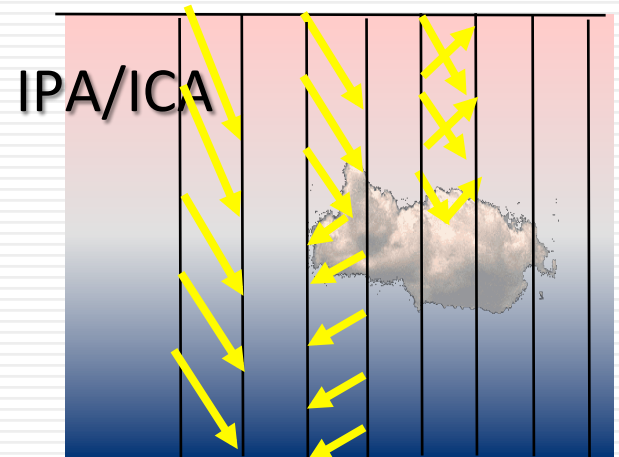
Résolution de l'équation de transfert radiatif: **plan parallèle, 1D ou 3D**



Nuage 3D
Transfert radiatif 3D



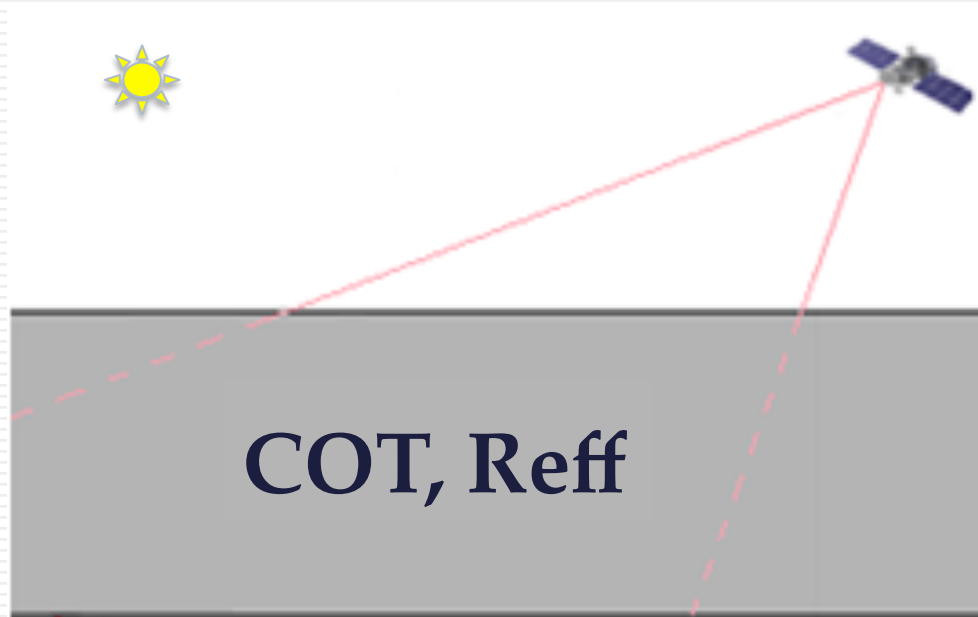
Nuage plan-parallèle
homogène (PPH)
TR1D



Méthode IPA/ICA (Cahalan et al., 1994)
(Independent Pixel/Column Approximation)
Nuage homogène
TR1D

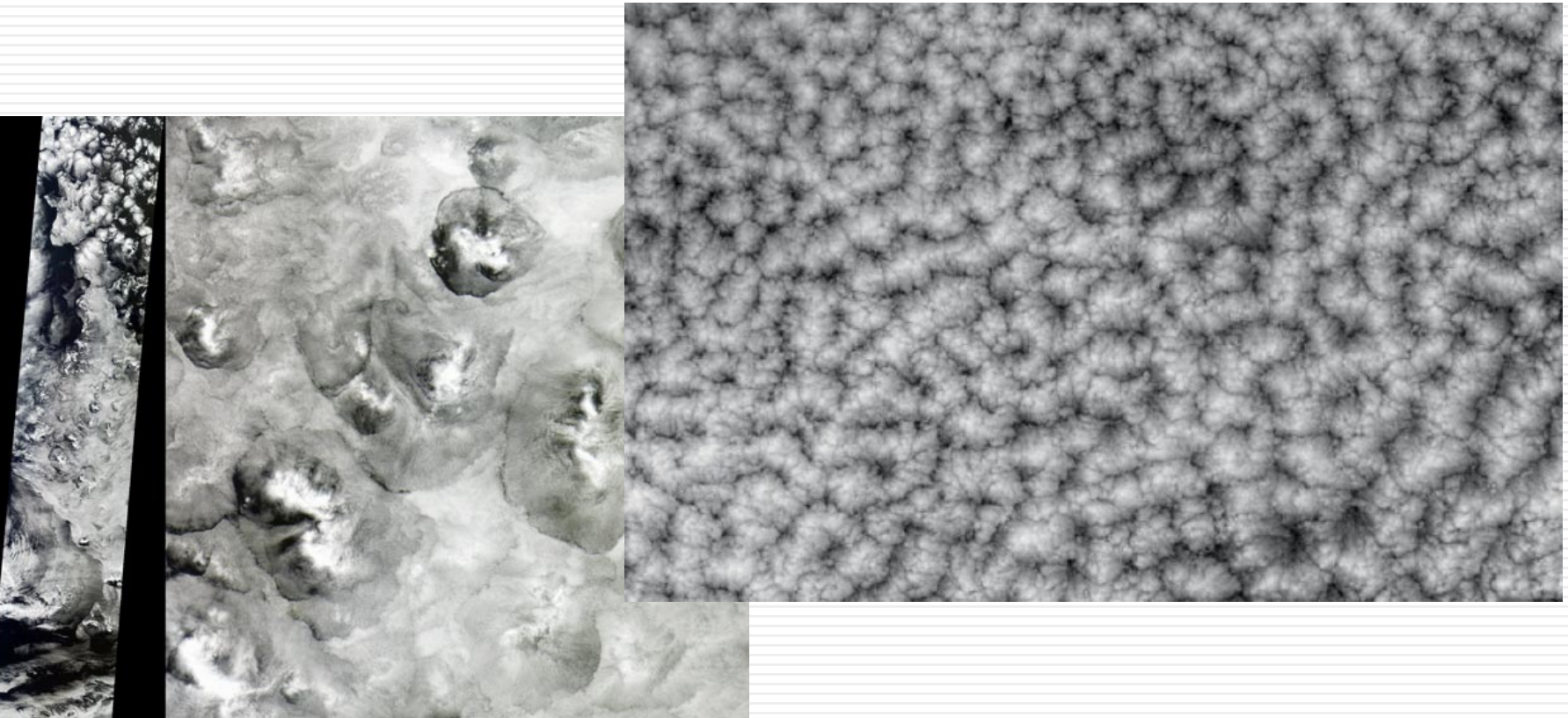
Modèle du nuage homogène

Restitution des paramètres nuageux : **modèle de nuage homogène, plan-parallèle et infini**



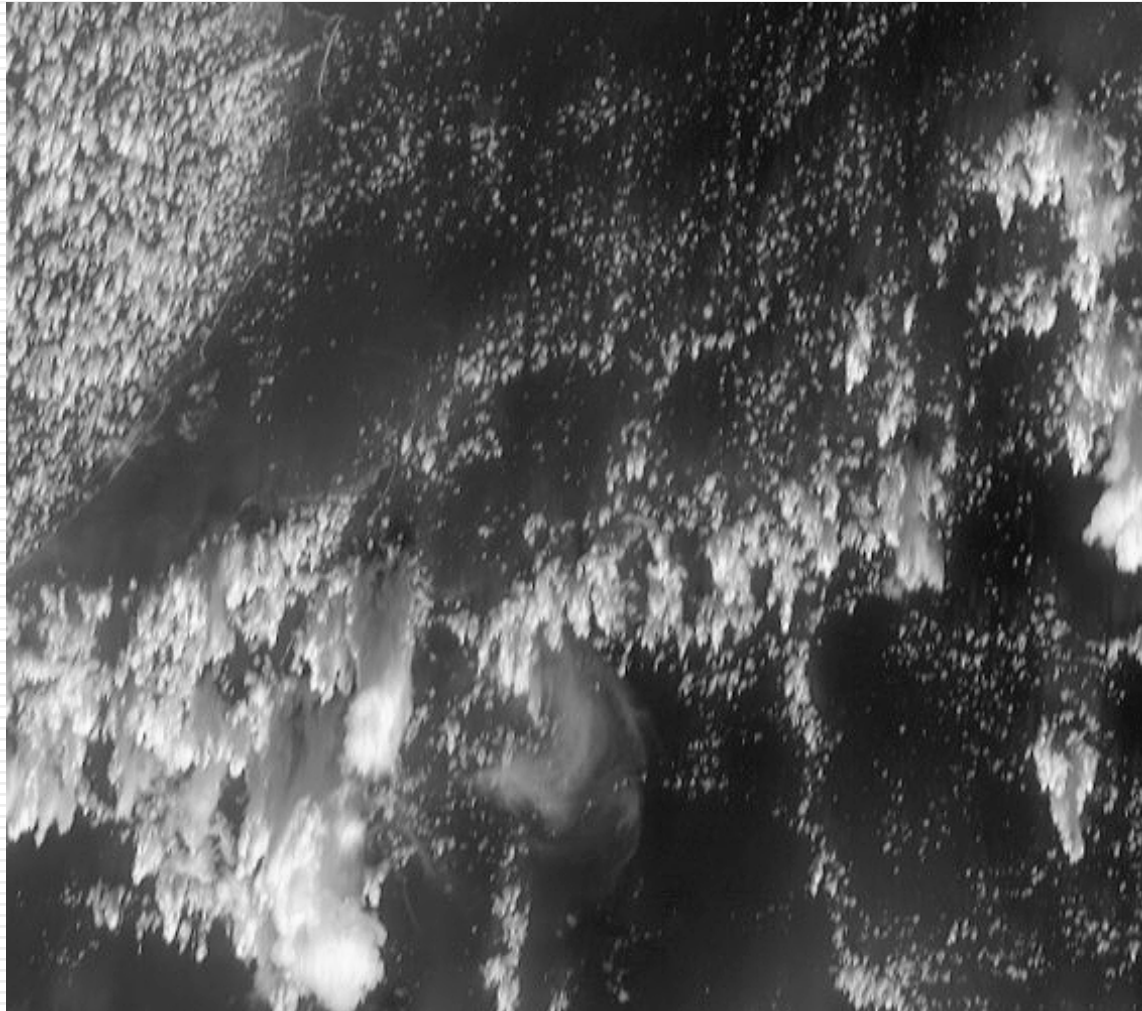
Modèle du nuage homogène

Restitution des paramètres nuageux : **modèle de nuage homogène, plan-parallèle et infini**



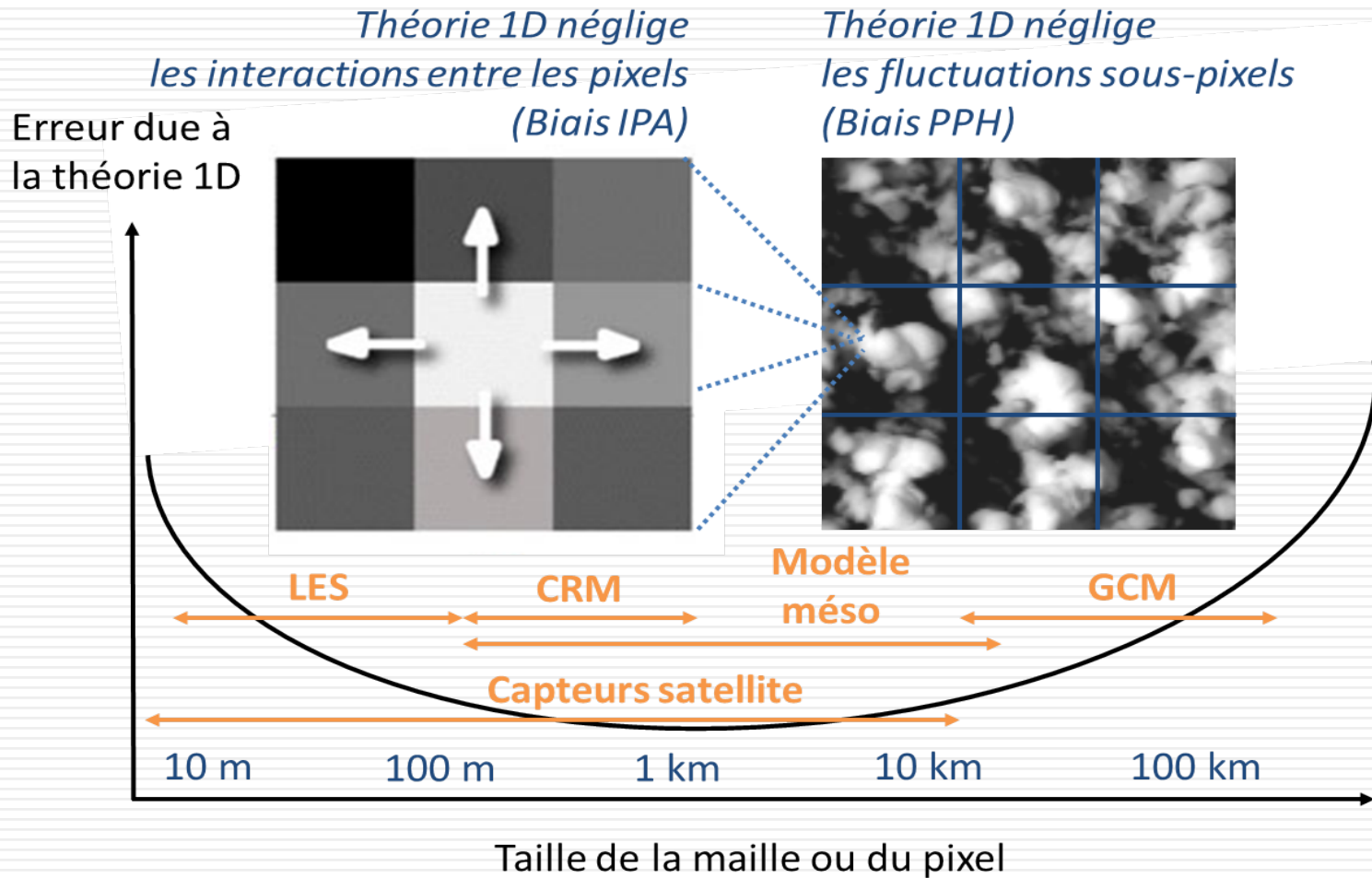
Modèle du nuage homogène

Restitution des paramètres nuageux : **modèle de nuage homogène, plan-parallèle et infini**
Nuages observés par MISR (275m de résolution):



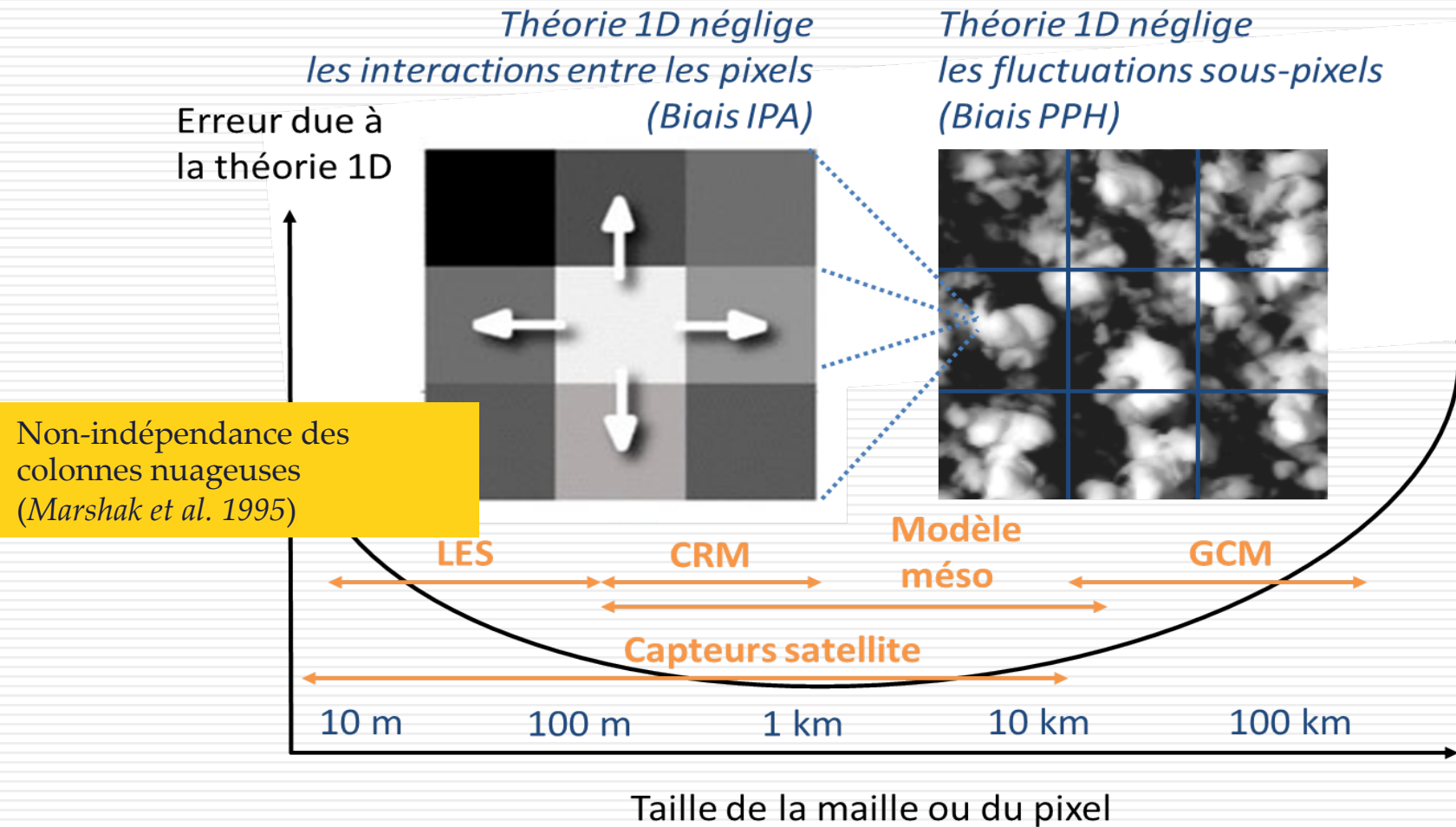
Codes de transfert radiatif 3D

Erreurs dépendantes de la taille du pixel d'observation (Davis et al., 1997; Zinner et Mayer, 2006)



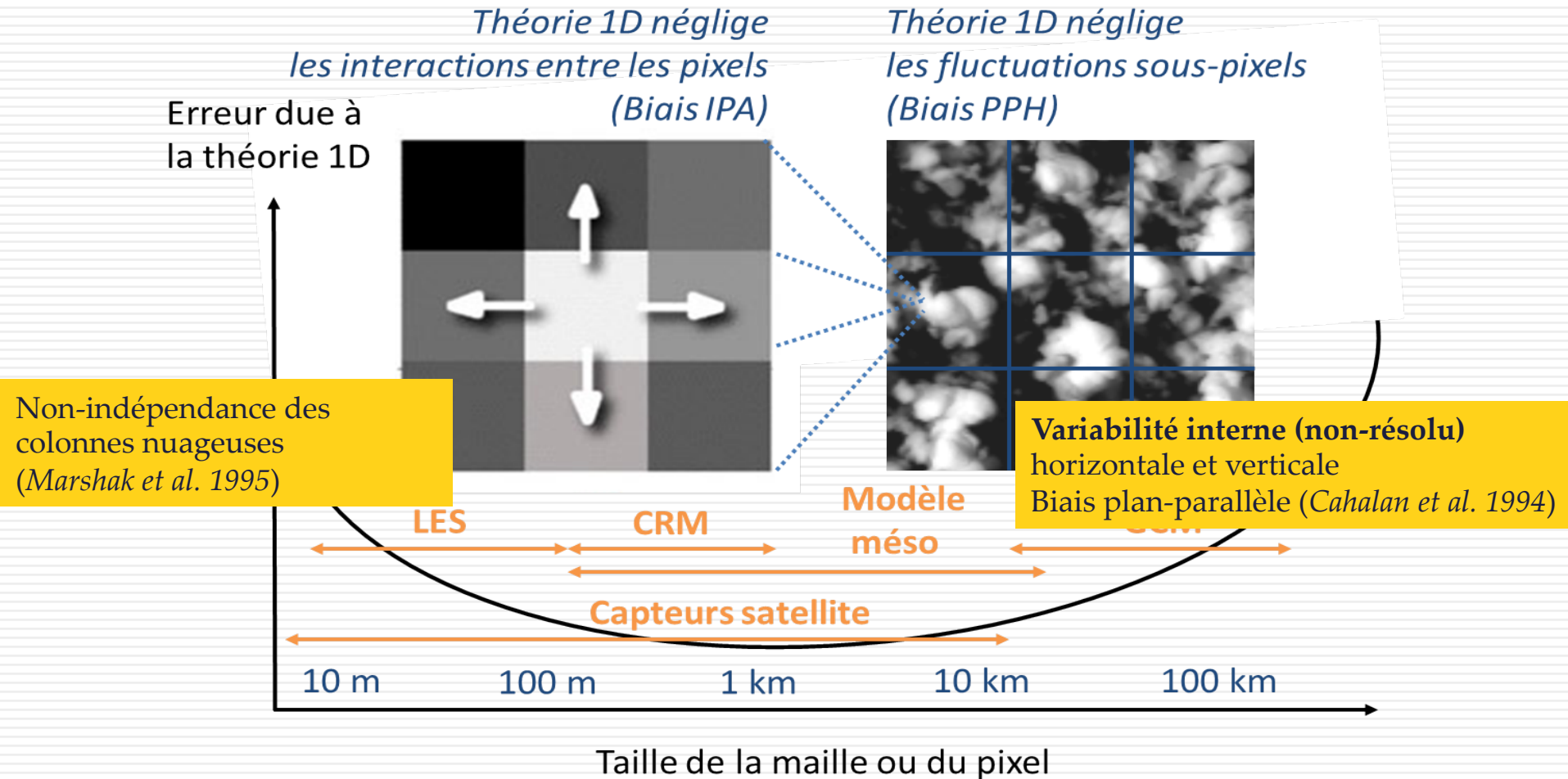
Codes de transfert radiatif

Erreurs dépendantes de la taille du pixel d'observation (Davis et al., 1997; Zinner et Mayer, 2006)



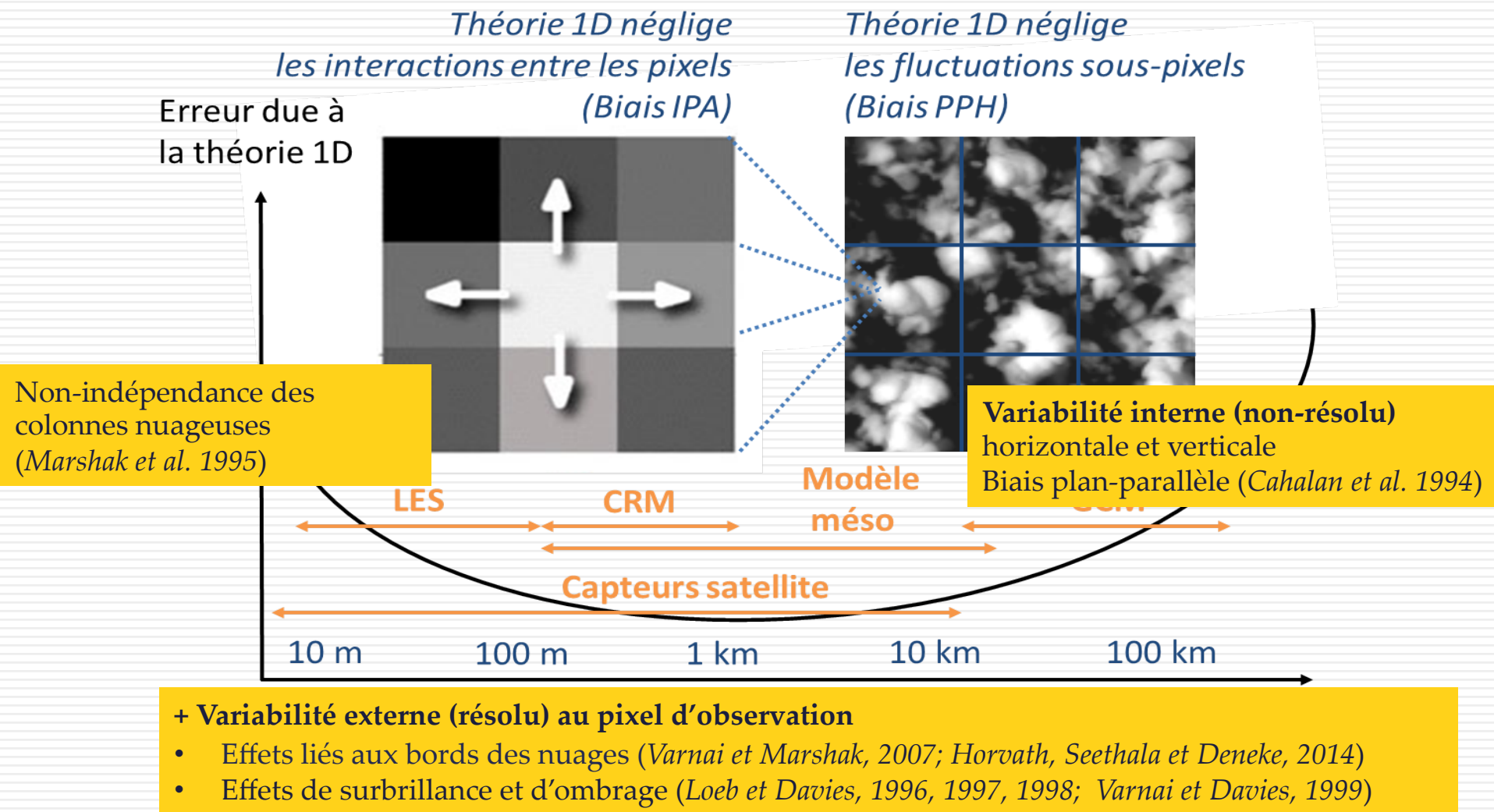
Codes de transfert radiatif

Erreurs dépendantes de la taille du pixel d'observation (Davis et al., 1997; Zinner et Mayer, 2006)



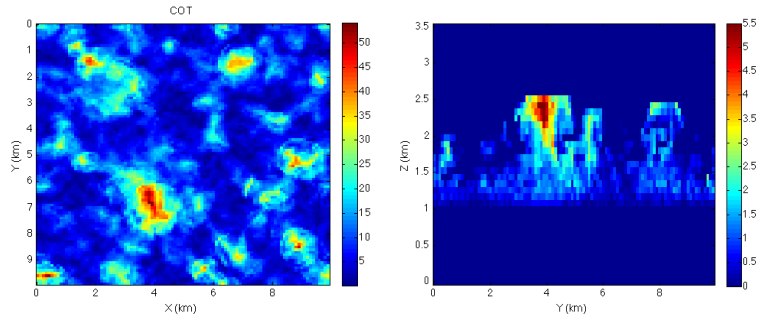
Codes de transfert radiatif

Erreurs dépendantes de la taille du pixel d'observation (Davis et al., 1997; Zinner et Mayer, 2006)



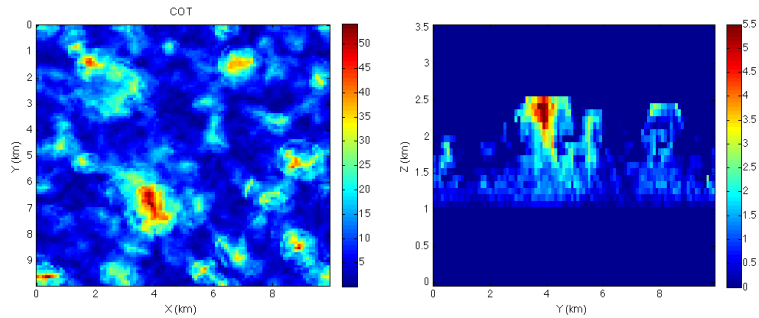
Méthodologie suivie

Génération d'un champ nuageux (100m)
3DCLOUD - *Szczap et al., 2014*
or LES model (RAMS)

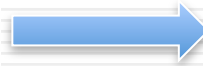


Méthodologie suivie

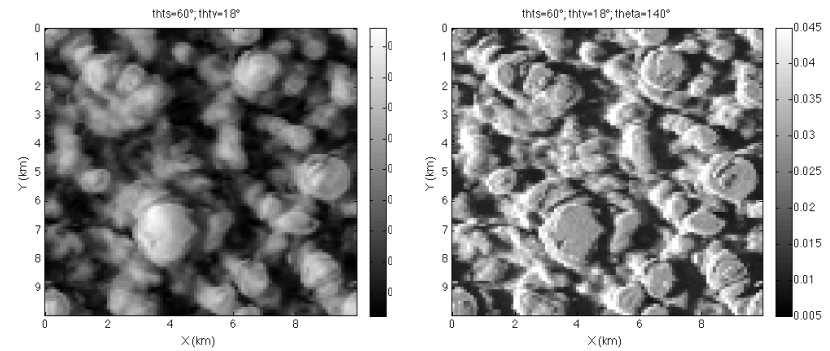
Génération d'un champ nuageux (100m)
3DCLOUD - *Szczap et al., 2014*
or LES model (RAMS)



3D RT

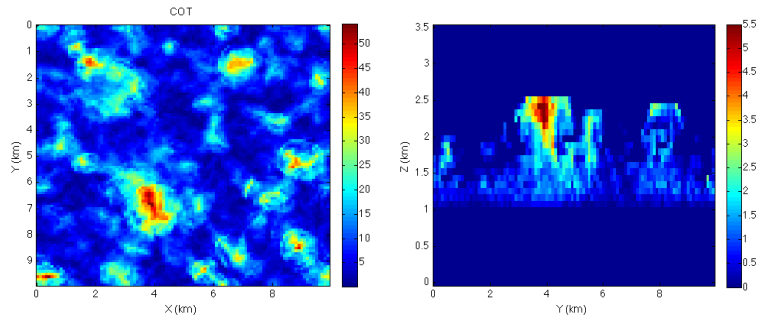


Simulation des luminances
3DMPCOL - *Cornet et al., 2010*

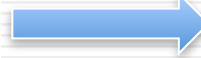


Méthodologie suivie

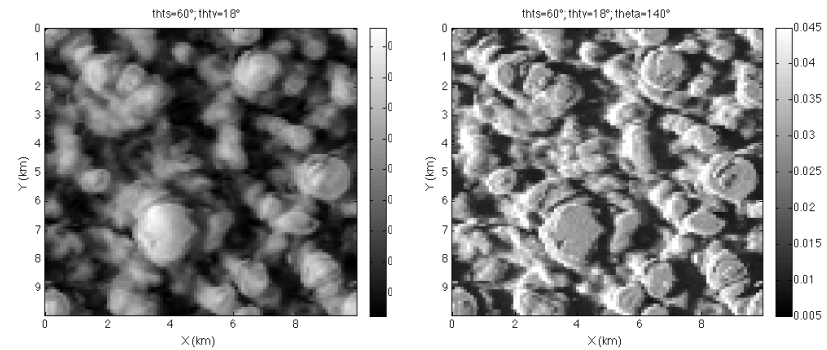
Génération d'un champ nuageux (100m)
3DCLOUD - *Szczap et al., 2014*
or LES model (RAMS)



3D RT



Simulation des luminances
3DMPCOL - *Cornet et al., 2010*



Moyenne champ
nuageux + 1DRT



R1D : Luminance 1D à la
résolution de l'instrument
(6x7km ou 1x1km)

Moyenne le champ
de luminances



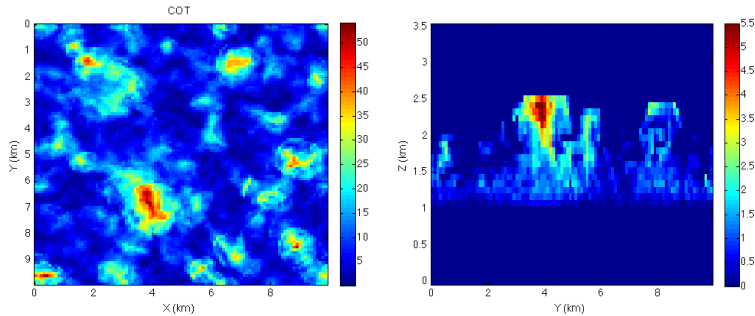
R3D: Luminance 1D à la
résolution de l'instrument
(6x7km ou 1x1km)

1) Comparaisons des luminances
3D et 1D

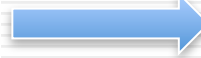


Méthodologie suivie

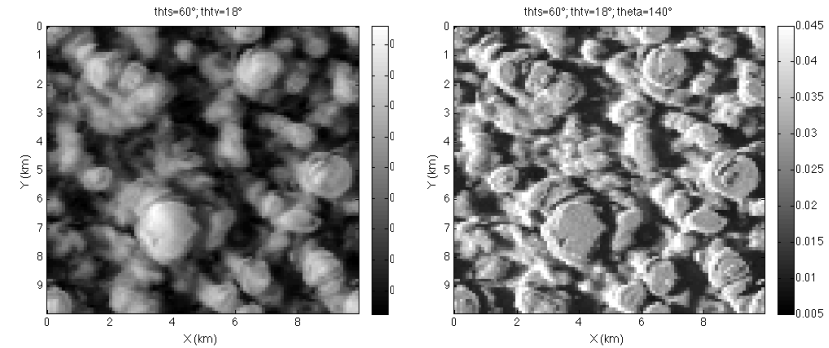
Génération d'un champ nuageux (100m)
3DCLOUD - *Szczap et al., 2014*
or LES model (RAMS)



3D RT



Simulation des luminances
3DMPCOL - *Cornet et al., 2010*



Moyenne champ
nuageux + 1DRT



R1D : Luminance 1D à la
résolution de l'instrument
(6x7km ou 1x1km)

Moyenne le champ
de luminances



R3D: Luminance 1D à la
résolution de l'instrument
(6x7km ou 1x1km)

1) Comparaisons des luminances
3D et 1D

Applique l'algorithme opérationnel

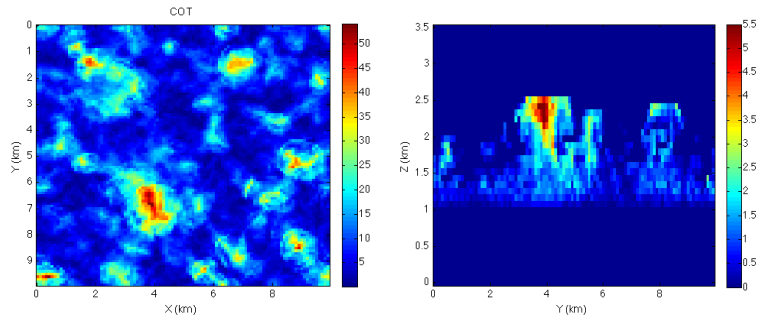
**Propriétés
nuageuses 1D** :
COT, Reff, Veff,
Albedo

2) Comparaisons des
paramètres restitués

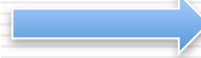
**Propriétés
nuageuses 3D**: COT,
Reff, Veff,
Albedo

Méthodologie suivie

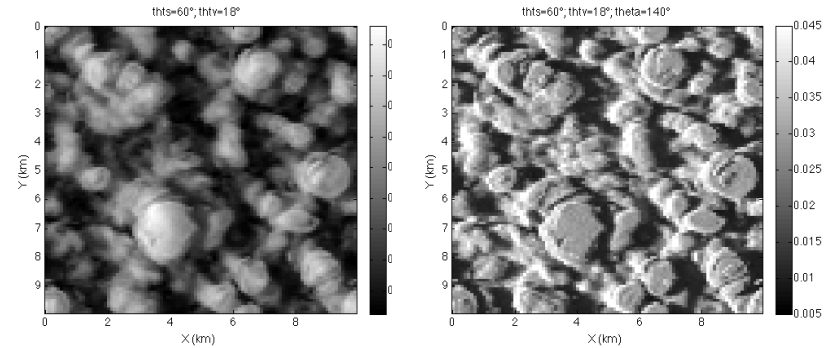
Génération d'un champ nuageux (100m)
3DCLOUD - *Szczap et al., 2014*
or LES model (RAMS)



3D RT



Simulation des luminances
3DMPCOL - *Cornet et al., 2010*



Moyenne champ
nuageux + 1DRT



Moyenne le champ
de luminances



R1D : Luminance 1D à la
résolution de l'instrument
(6x7km ou 1x1km)

1) Comparaisons des luminances
3D et 1D

R3D: Luminance 1D à la
résolution de l'instrument
(6x7km ou 1x1km)

Applique l'algorithme opérationnel

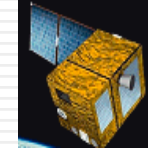
**Propriétés
nuageuses 1D** :
COT, Reff, Veff,
Albedo

2) Comparaisons des
paramètres restitués

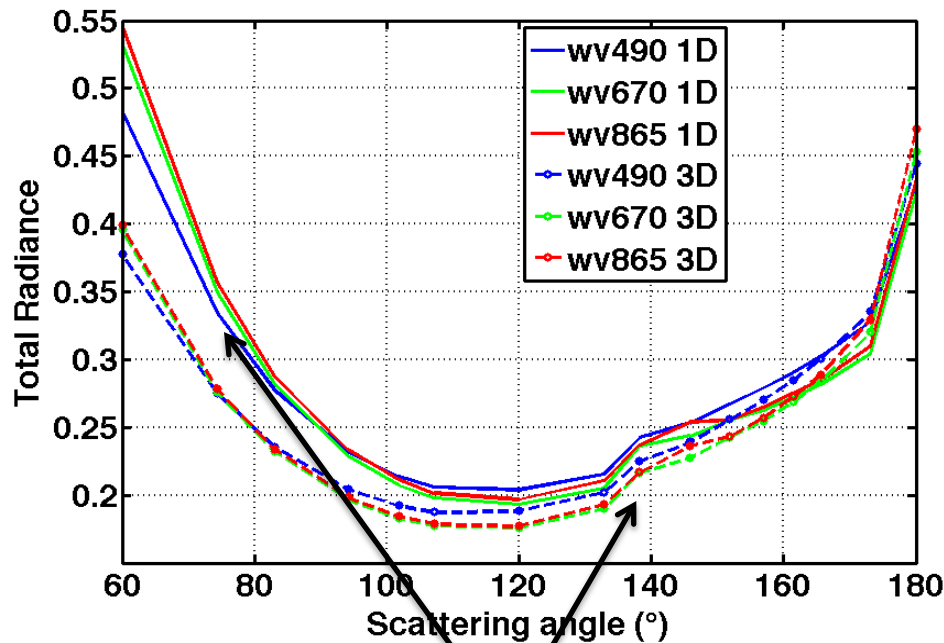
**Propriétés
nuageuses 3D**: COT,
Reff, Veff,
Albedo

Effets sur les luminances totales

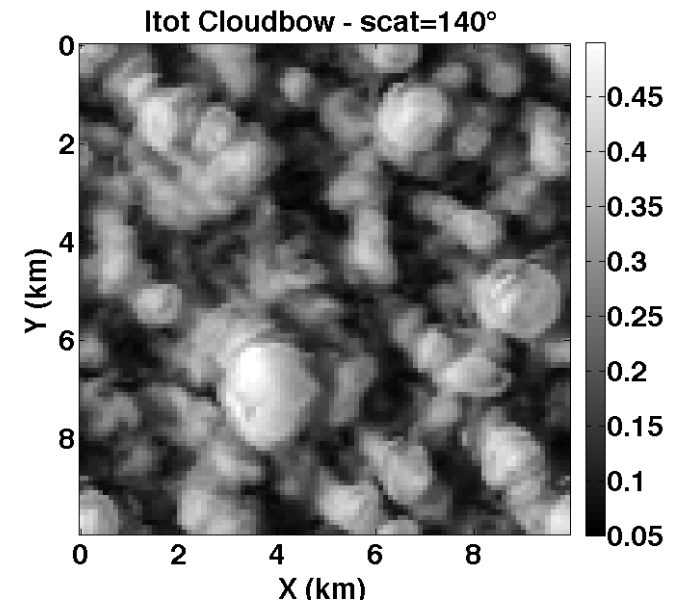
1D (plein) et 3D (pointillés) luminances en fonction de l'angle de diffusion. $\theta_s=60^\circ$



Vue dans l'arc en ciel
 $\Theta=140^\circ$

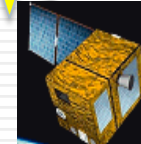


Généralement $R_{3D} < R_{1D}$,
Biais plan-parallèle dû à l'hétérogénéité sous pixel

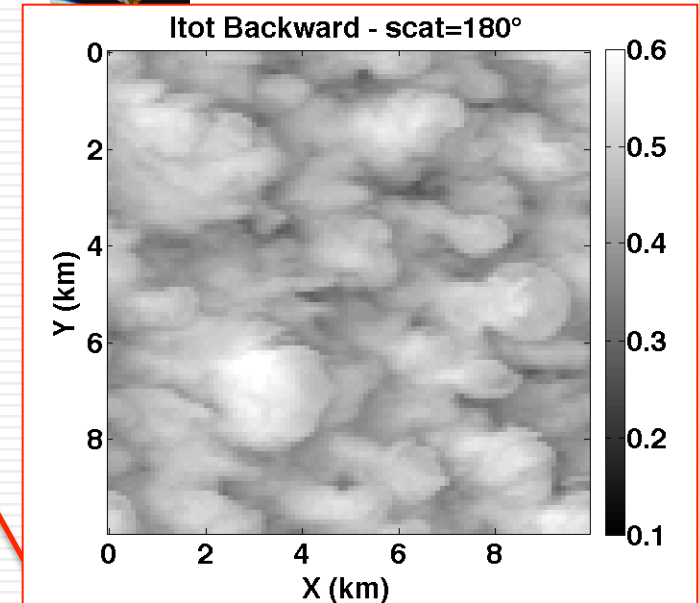
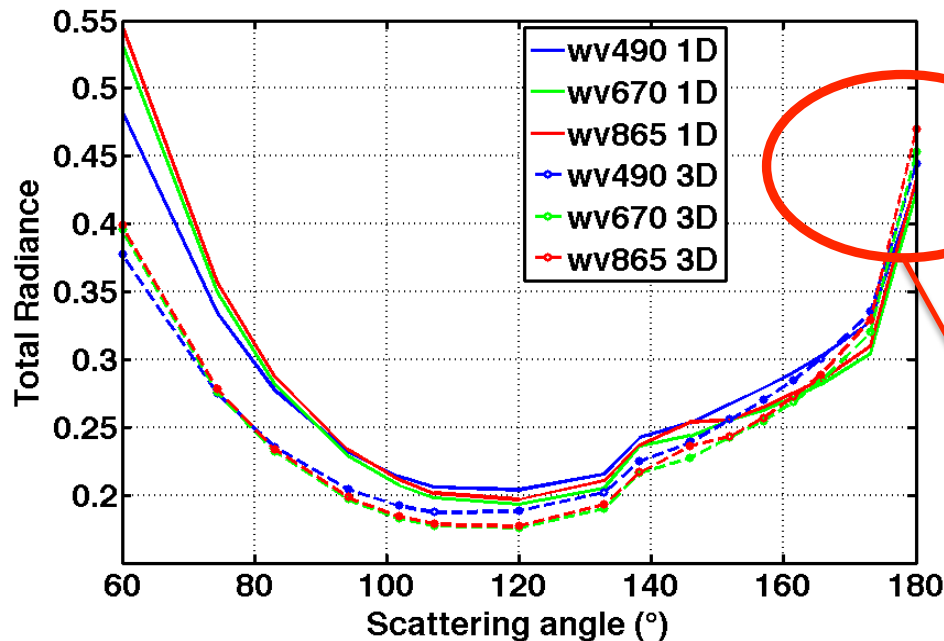


Effets sur les luminances totales

1D (plein) et 3D (pointillés) luminances en fonction de l'angle de diffusion. $\theta_s=60^\circ$



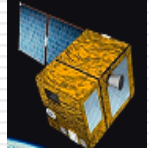
Rétrodiffusion
 $\Theta=180^\circ$



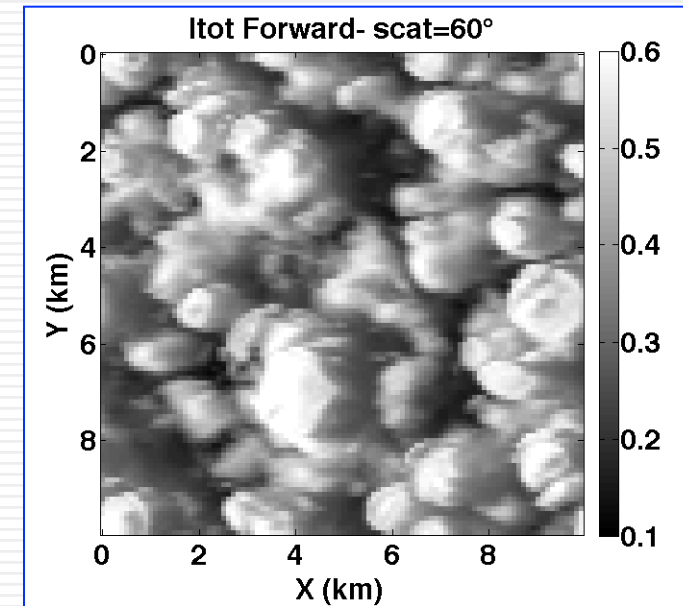
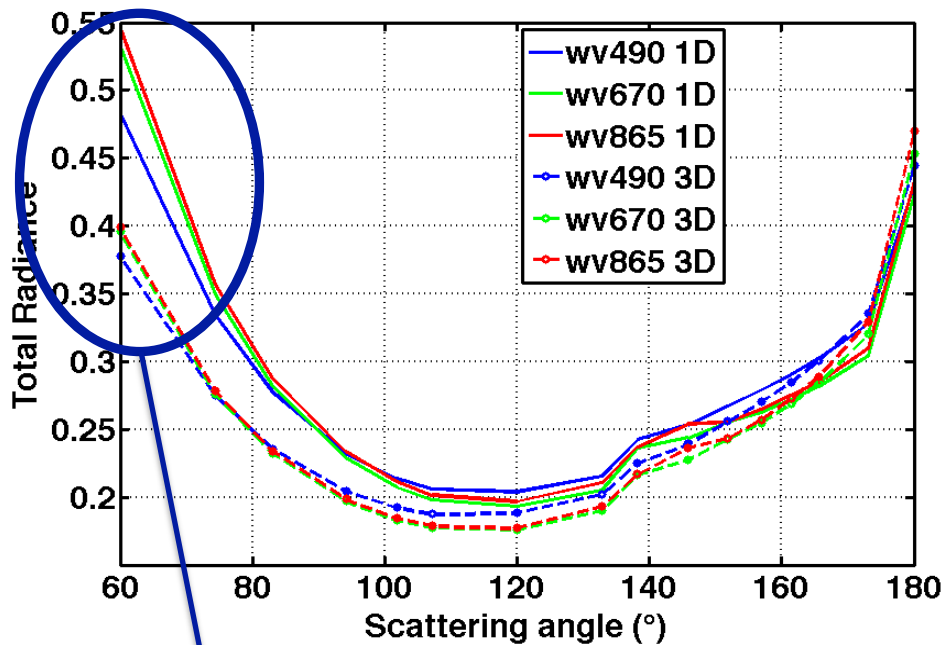
$R3D \geq R1D$, les cotés et/ou bosses nuageuses sont éclairés = surbrillance

Effets sur les luminances totales

1D (plein) et 3D (pointillés) luminances en fonction de l'angle de diffusion. $\theta_s=60^\circ$



Vue avant
 $\Theta=60^\circ$



R3D << R1D, effets d'ombrage des cotés

Conclusion

Demande croissante en transfert radiatif:

Codes de calcul rapides et précis en télédétection et climat.

Codes de référence et groupes utilisateurs

Calcul des sensibilités / jacobiens

Disposer de ressources et documentation en transfert radiatif

Utilisation de plus en plus grande de la modélisation en transfert radiatif 3D:

Création d'un milieu de référence 3D.

Mise en place d'une plateforme web et d'un groupe utilisateur 3D.

Nécessité d'accroître la représentativité des zone de gradients de luminance en bords de nuages.

Veille technique et scientifique du TR 3D dans les autres domaines de la physique.

Modélisation 3D pour les GCM:

Plus rapide car calcul des flux.

Approche statistique pour représenter les nuages.

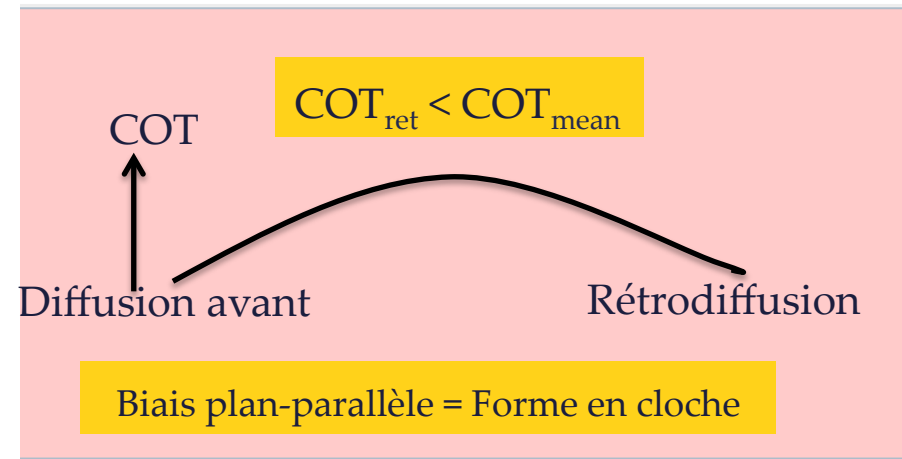
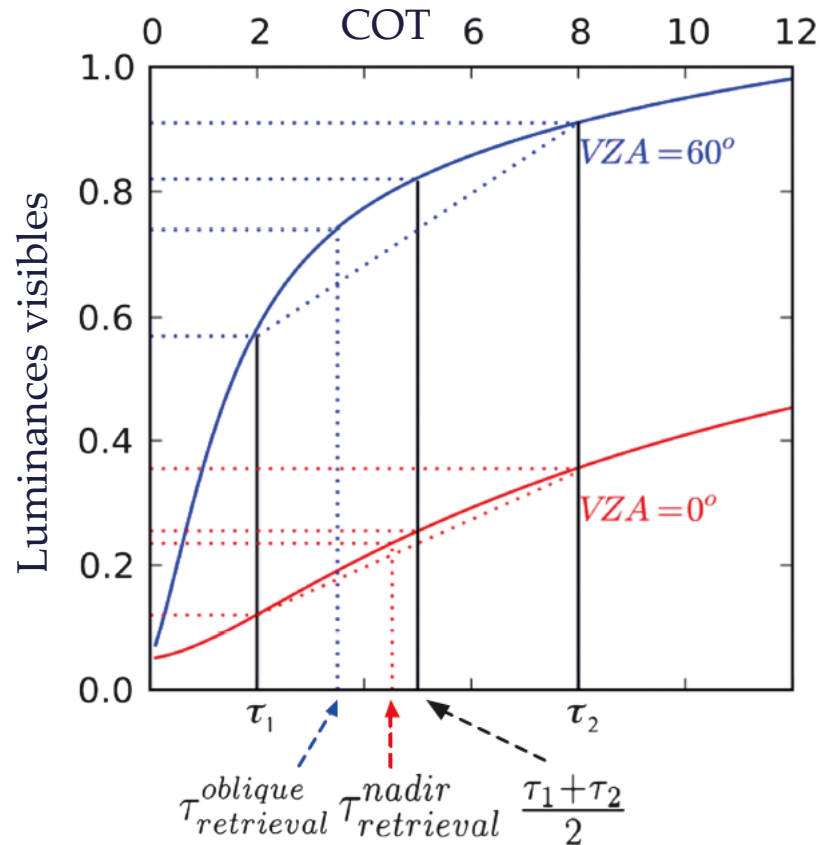
➔ Conférence Richard Fournier « *Rayonnement 3D SW et LW dans les nuages de couche limite : Monte Carlo et calcul de sensibilité* ».

Conclusion

Merci de votre attention

Variation angulaire de COT

Biais plan-parallèle en fonction de l'angle d'observation: θ_v



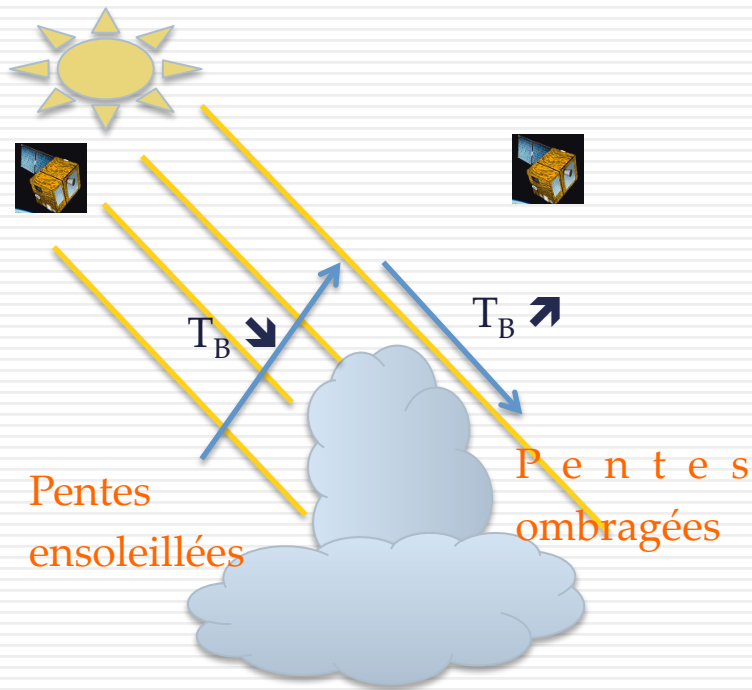
Effets liés aux variabilités externes (3D)

Principe à partir de MODIS: Varnai et Marshak, 2002

Détection des pentes nuageuses

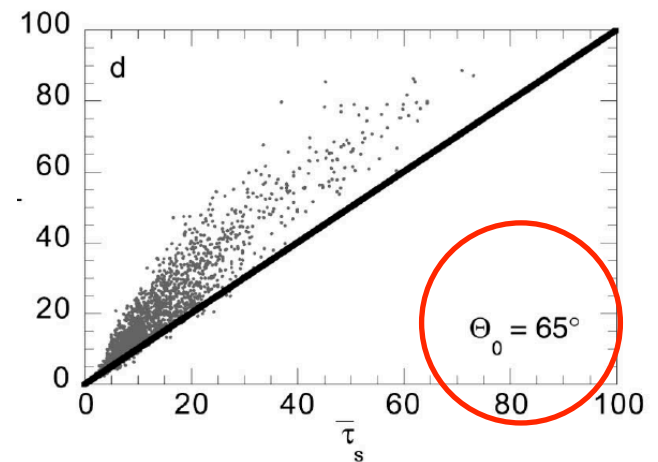
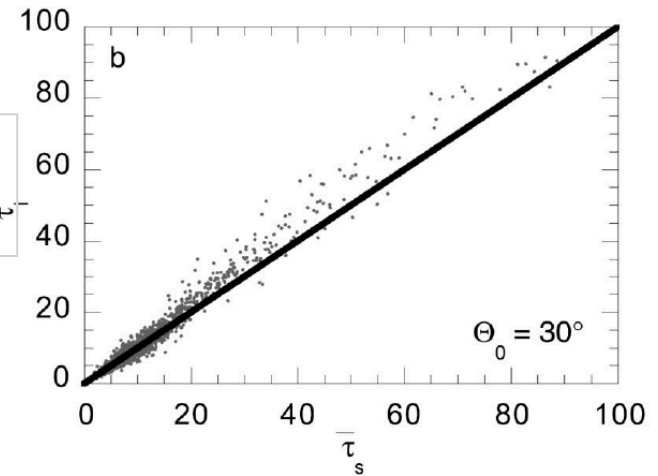
ensoleillées ou ombragées

grâce aux températures de brillance IR



COT
ensoleillées

COT
ensoleillées



COT ombragées