

Panorama des codes de Transfert Radiatif (TR) et état des derniers développements



R. Armante

&

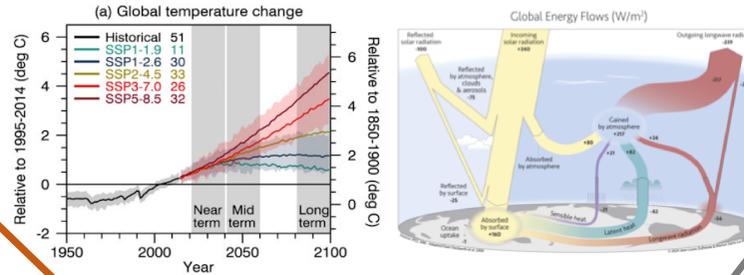
L. C.-Labonnote



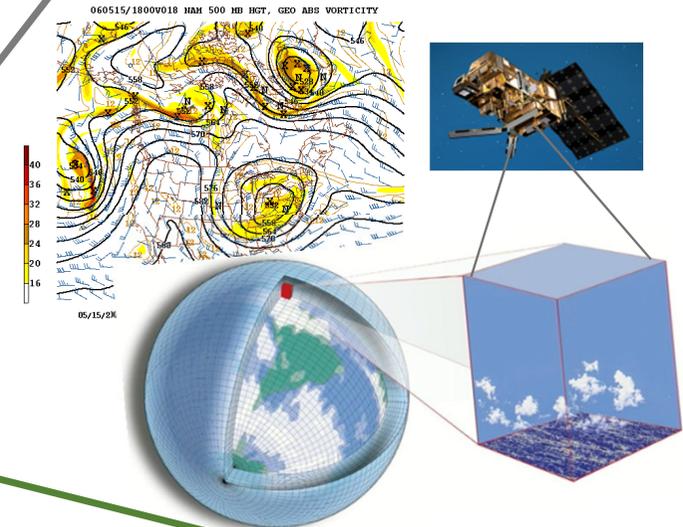
Contexte

Simulation d'observables et préparation de nouvelles missions

Modèles climatiques / Bilan radiatif

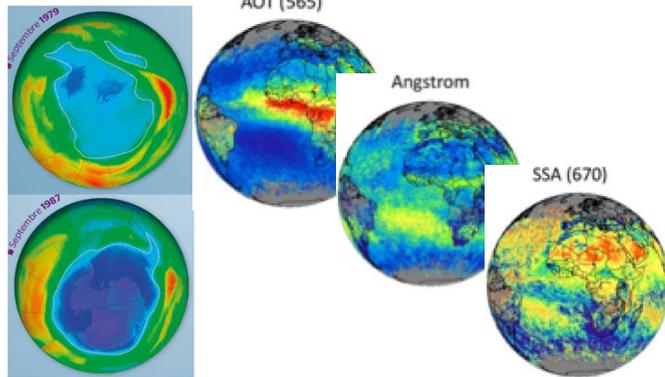


Prévisions numériques / assimilation

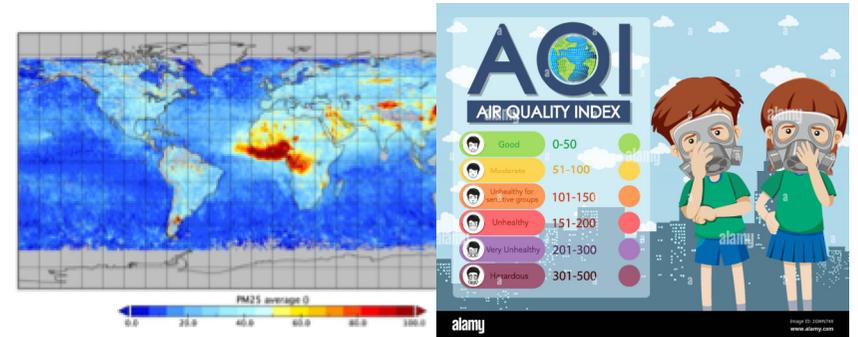


Applications variées du Transfert Radiatif (TR)

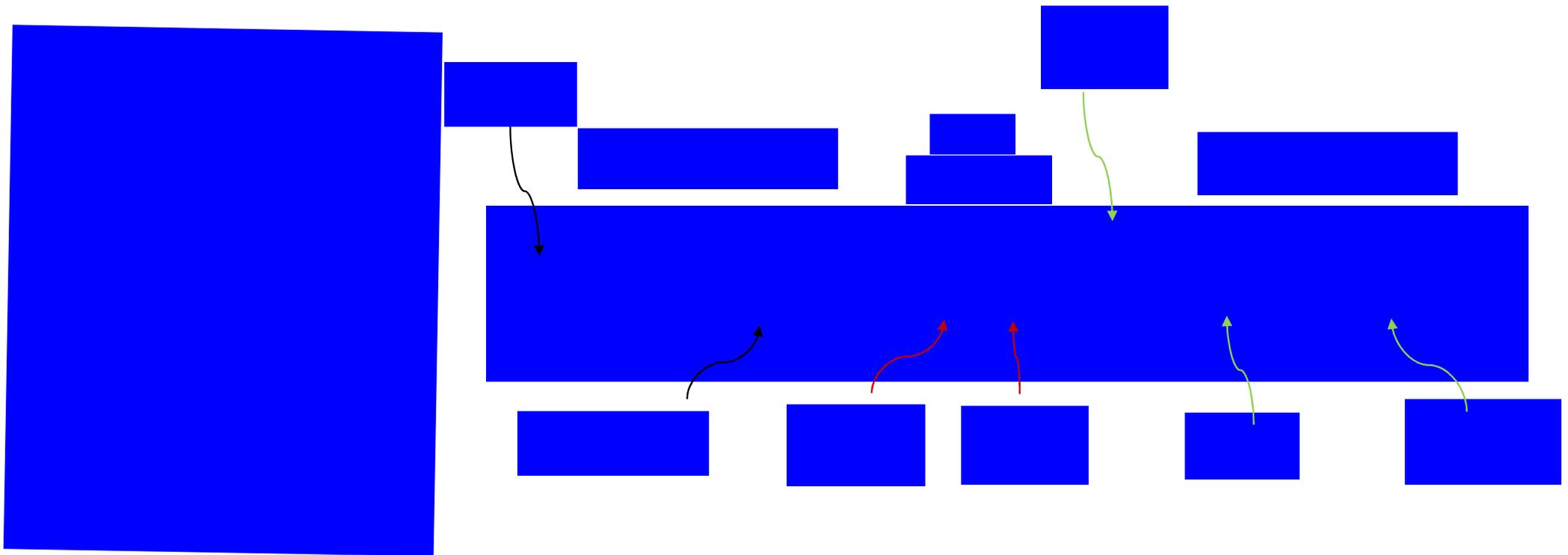
Télédetection / Observation / Tendances



Qualité de l'air / Santé



L'équation du transfert radiatif (ETR)

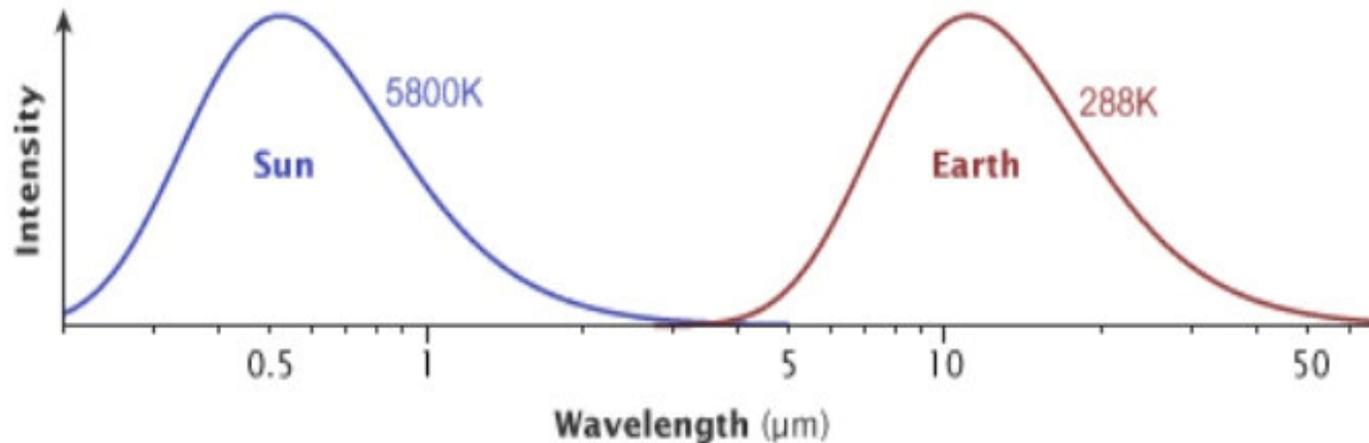


Caractériser au préalable l'émission et l'interaction du rayonnement électromagnétique sur tout le spectre avec le milieu (molécules, particules aérosols / nuageuses / océaniques)

Résolution de l'ETR

□ Emission d'un corps (loi de Planck)

Le soleil, la surface terrestre et chaque couche de l'atmosphère émettent chacun un rayonnement électromagnétique comparable en premier ordre à celui d'un corps noir (loi de Planck).



$$B(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\frac{h\nu}{ek_B T} - 1}$$

B = luminance énergétique spectrale d'un corps

ν = fréquence

T = température absolue

k_B = constante de Boltzmann

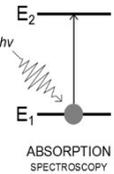
h = constante de Planck

c = vitesse de la lumière dans le milieu

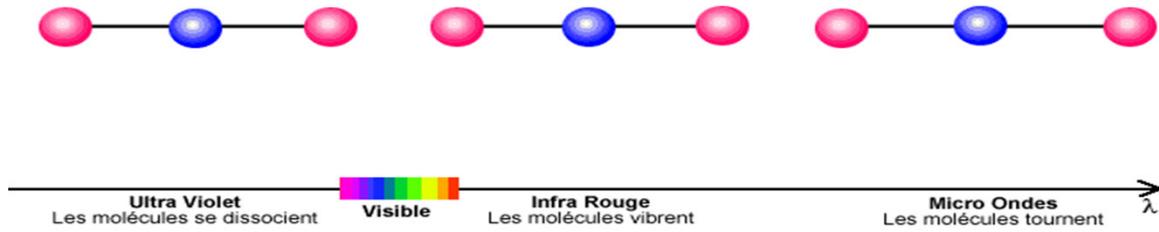
Résolution de l'ETR

□ L'absorption

Le rayonnement électromagnétique transporte une énergie capable de provoquer des processus d'excitation, de dissociation et d'ionisation des molécules. Au cours de ces processus, les photons sont absorbés.



Electronic, vibrational and rotational transition; triatomic molecule



Electronic transitions associated with vibrational and rotational transitions

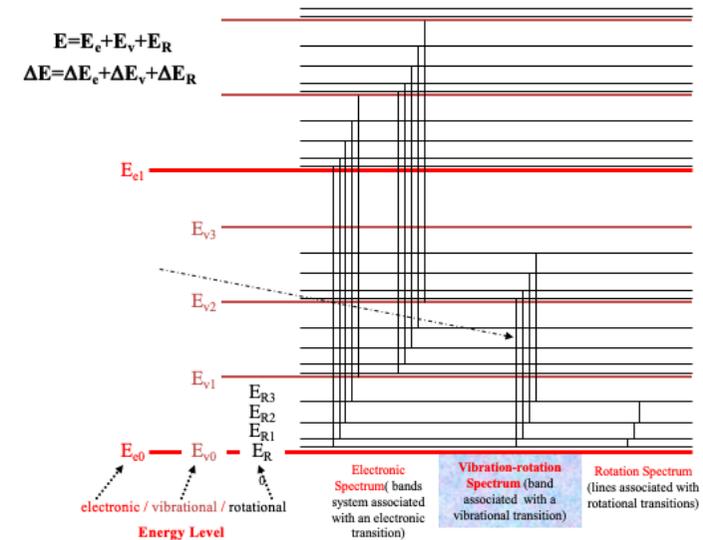
Complex spectral structure

Vibrational and rotational transitions combinations

Group of lines in a vibration-rotation band

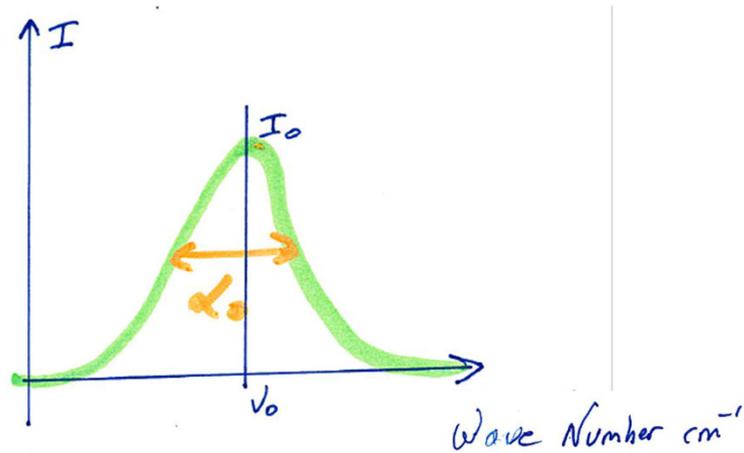
Near Energy levels

Rotation lines in MW and far IR



Résolution de l'ETR

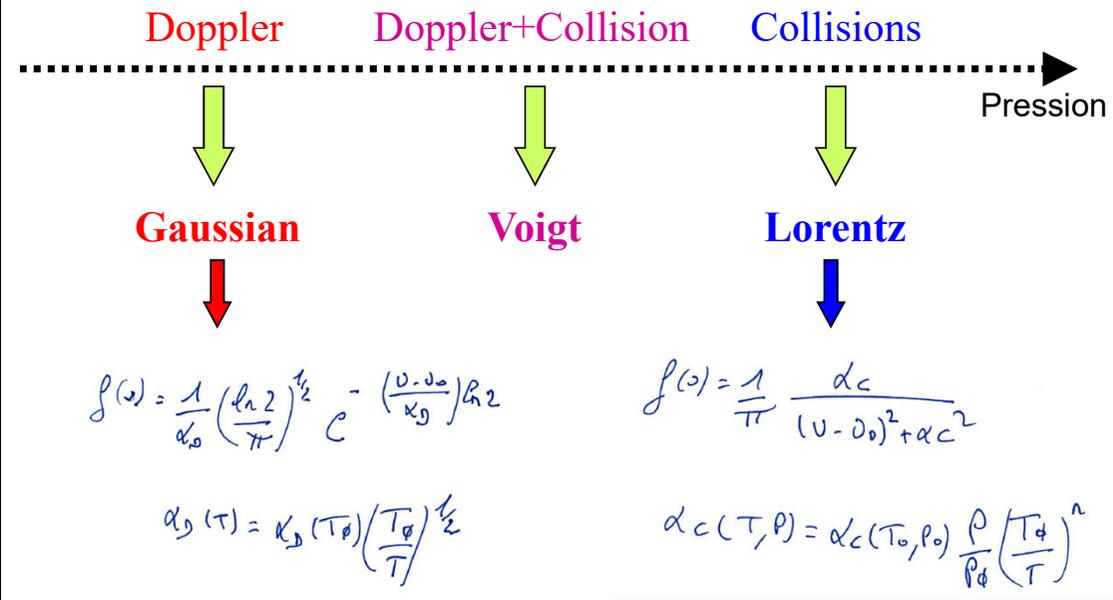
□ L'absorption



Caractérisation du coefficient d'absorption avec des paramètres spectroscopiques (position ν_0 , intensité I_0 , largeur à mi-hauteur de l'élargissement α_0 , énergie de la transition E_0 , ...)

Au 1^{er} ordre, la largeur et le forme d'une raie peut être décomposée en trois contributions :

- Doppler : vitesse des molécules fonction de la température du milieu
- Lorentz : collision entre molécules liée à la pression du milieu



- Pour atteindre de meilleures précisions → Line mixing, speed dependent, Galatry, HTP, ...

Résolution de l'ETR

□ L'absorption

Tous les paramètres (spectroscopiques) des raies sont rangés dans des bases de données :

- Base de données dédiée à une mission (MIPAS, TROPOMI, ...)
- Compilation de base de données : VAMDC
- Base de données où le choix des meilleures données de spectroscopie est fait à un instant t (2015, 2016, 2020, 2025):

- HITRAN (High-resolution TRANmission molecular absorption) et HITEMP
- GEISA (Gestion et Etudes des Informations Spectroscopiques Atmosphériques)



HITEMP

| ID | Formula | Name | Iso count ^a | Line count ^b | $\nu_{\min}/\text{cm}^{-1}$ | $\nu_{\max}/\text{cm}^{-1}$ | Year | Download [file size] | Ref. |
|----|------------------|------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------|----------------------|-------------------|
| 1 | H ₂ O | Water | 6 | 114 241 164 | 0 | 30 000 | 2010 | ↓ [3.2GB] | 1 |
| 2 | CO ₂ | Carbon Dioxide | 12 | 326 260 084 | 0 | 17 697 | 2024 | ↓ [6.0GB] | 3 |
| 4 | N ₂ O | Nitrous Oxide | 5 | 3 626 425 | 0 | 12 899 | 2019 | ↓ [65MB] | 4 |
| 5 | CO | Carbon Monoxide | 6 | 752 976 | 2 | 22 149 | 2019 | ↓ [14MB] | 5 |
| 6 | CH ₄ | Methane | 4 | 31 880 412 | 0 | 13 400 | 2020 | ↓ [0.4GB] | 6 |
| 8 | NO | Nitric Oxide | 3 | 1 137 192 | 0 | 26 777 | 2019 | ↓ [21MB] | 4 |
| 10 | NO ₂ | Nitrogen Dioxide | 1 | 1 108 709 | 0 | 4 775 | 2019 | ↓ [21MB] | 4 |
| 13 | OH | Hydroxyl Radical | 3 | 57 019 | 0 | 43 409 | 2020 | ↓ [0.9MB] | 7 |

Décembre 2024: par manque de RH, décision du LMD d'arrêter la base de données GEISA

Résolution de l'ETR

□ L'absorption

Quand les paramètres spectroscopiques ne peuvent pas être déterminés (molécules trop lourdes (CFCs), dont la concentration est trop importante (N_2 , O_2), ou que le profil de la raie n'est pas bien connu (H_2O), on utilise :

- Continua : CIA (O_2 , N_2 ,...), continuum (H_2O , CO_2)
- Base de données de section efficaces (cross-sections)
 - HITRAN (High-resolution TRANmission molecular absorption)
 - GEISA (Gestion et Etudes des Informations Spectroscopiques Atmosphériques)

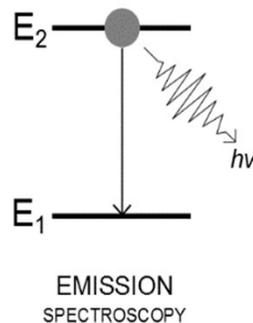


Décembre 2024: par manque de RH, décision du LMD d'arrêter la base de données GEISA

Résolution de l'ETR

□ L'émission spontanée

L'émission spontanée est le phénomène par lequel un système quantique placé dans un état excité retombe nécessairement dans un état de plus basse énergie, par émission d'un photon. En passant d'un niveau excité vers un niveau inférieur, ces molécules émettent spontanément un rayonnement infrarouge dont la longueur d'onde correspond à l'énergie de la transition.



- **Emission spectroscopy:** a photon is **emitted** ("created") as the molecule falls back to a lower energy level

Résolution de l'ETR

$$\frac{K_v^d}{2} \cdot \int_{-1}^1 P_v(\mu, \mu') \cdot I_v(\mu') \cdot d\mu'$$

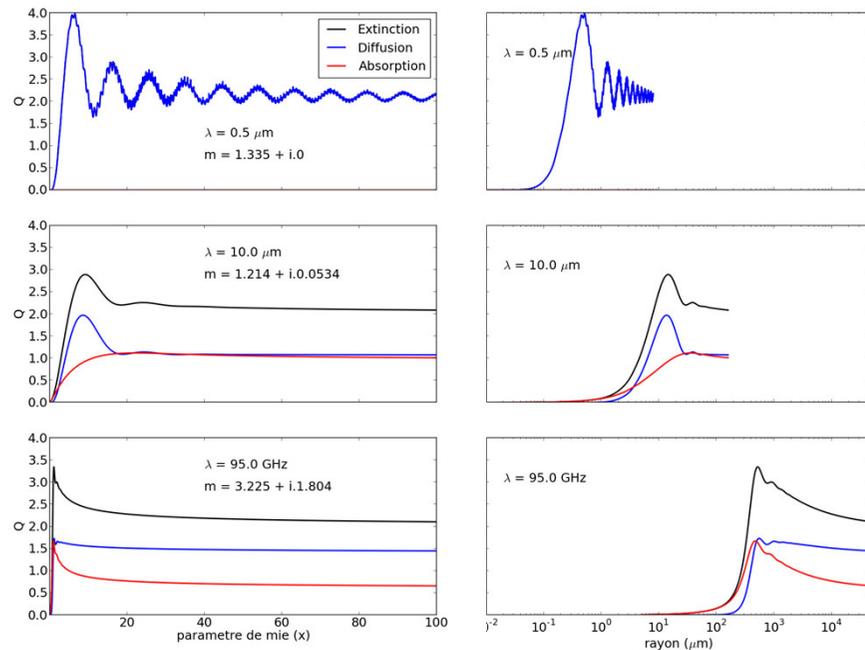
☐ La diffusion

Caractériser le coefficient de diffusion (et d'absorption) et la capacité de diffuser/polariser le rayonnement dans une direction donnée (fonction/matrice de phase) des constituants atmosphériques/océaniques

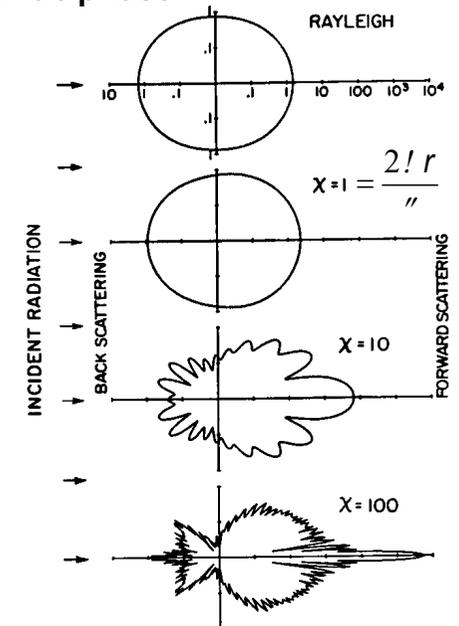
Coefficient de diffusion

$$K_v^d = \int_0^\infty \pi r^2 \cdot Q_v^d \cdot m(\pi) \, d\pi$$

$$N_o = \int_0^\infty m(\lambda) \, d\lambda$$



Fonction de phase



Résolution de l'ETR

☐ La diffusion

Caractériser le coefficient de diffusion (et d'absorption) et la capacité de diffuser/polariser le rayonnement dans une direction donnée (fonction/matrice de phase) des constituants atmosphériques/océaniques

Dépendent de

- L'indice de réfraction et donc du matériel (type d'aérosols/hydrosols, eau liquide/glace)
- La distribution en taille
- La distribution en forme
- La longueur d'onde

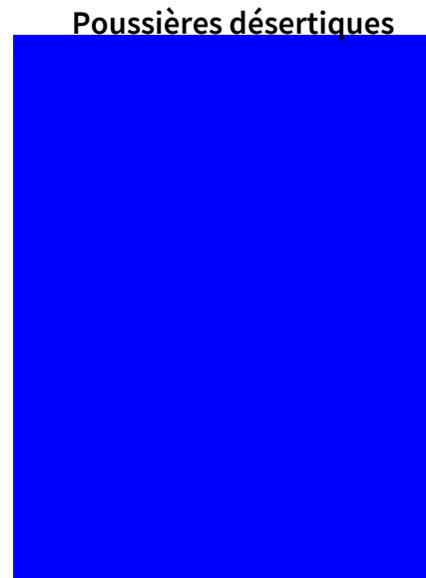
Résolution de l'ETR

Voir présentation plénière « Diffusion et particules »
et table ronde « aérosols »

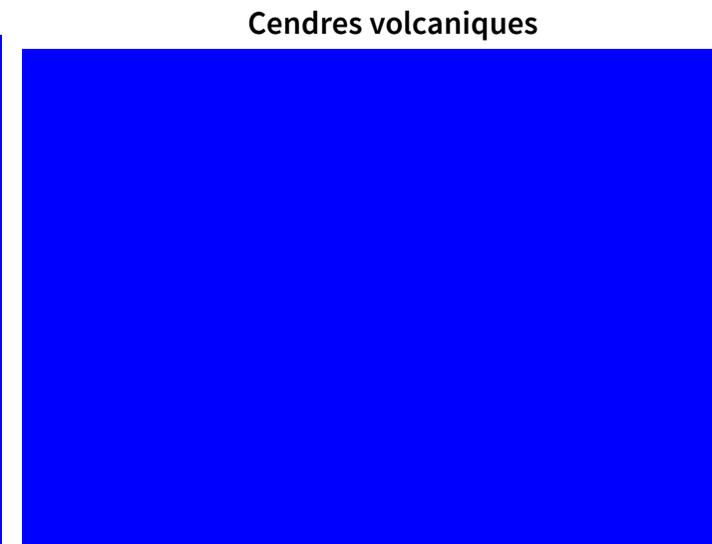
□ La diffusion

Matériel (type d'aérosols, eau liquide/glace) - indice de réfraction

- Base de donnée OPAC (Hess et al. 1998)
10 types d'aérosols/matériaux
Plage spectrale : 0.25 – 40 μm
- Détermination récente en laboratoire plus précise dans l'IR (thermique et lointain) pour différents type d'aérosols désertiques et volcaniques



Di Biagio et al. (2017)



Deguine et al. (2020)

Résolution de l'ETR

☐ La diffusion

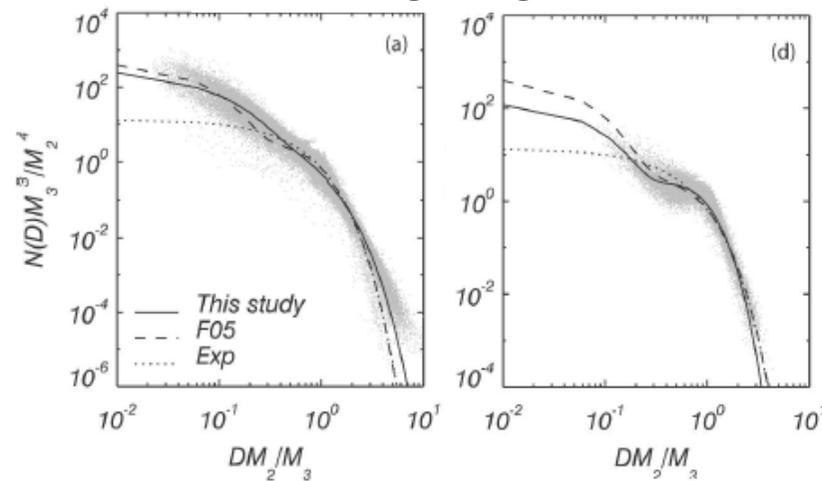
Distribution en taille

aérosols



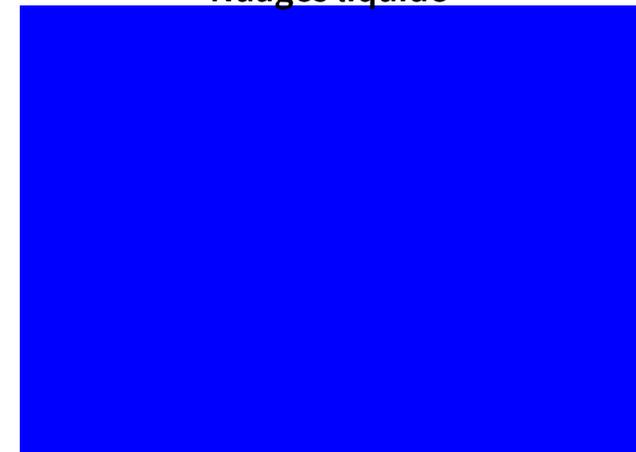
Dubovik et al. (2002)

Nuages de glace



Field et al. (2007)

Nuages liquide



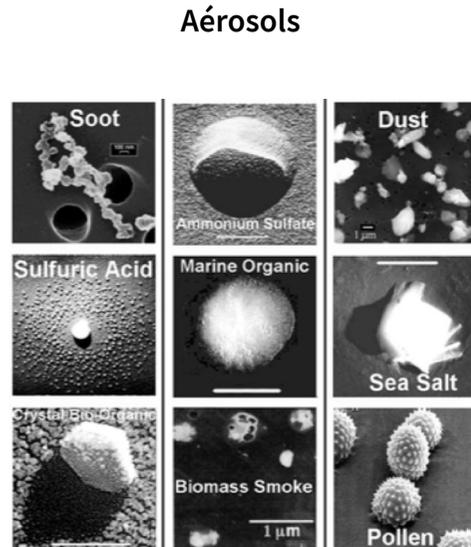
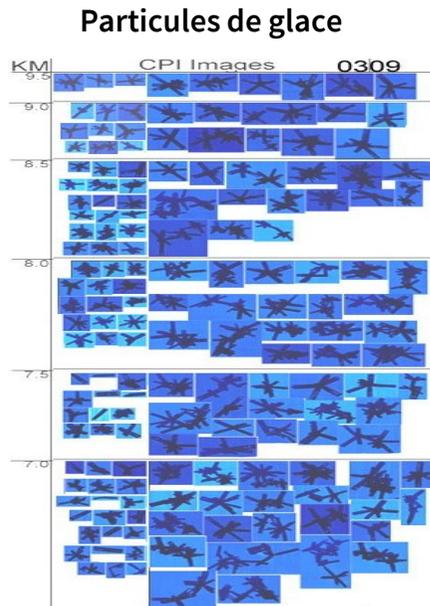
Siebert et al. (2006)

Résolution de l'ETR

La diffusion

Distribution en forme

Mesures



Bases de données

A. J. Baran

Plage spectrale : 0.225 – 100 μm

Particules (6 formes):



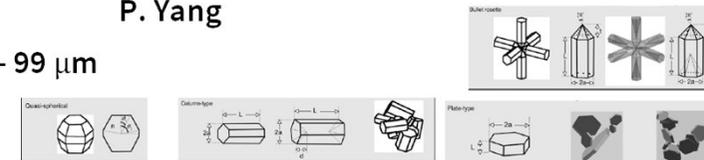
Orientation : Aléatoire

Indice de réfraction : 1 température (266K) (Warren & Brandt 2008)

P. Yang

Plage spectrale : 0.2 – 99 μm

Particules (9 formes):



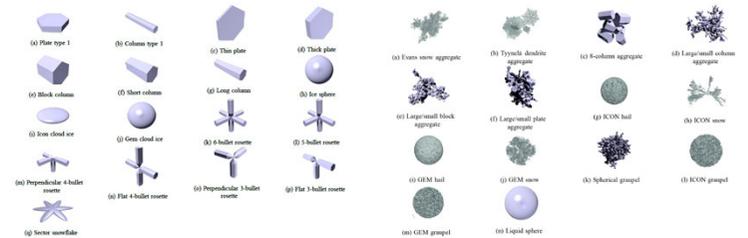
Orientation : Aléatoire

Indice de réfraction : 1 température (266K) (Warren & Brandt 2008)

Eriksson (ARTS)

Plage spectrale : 1 – 886 GHz

Particules (32 formes):



Orientation : Aléatoire et azimutale

Indice de réfraction : 3 températures (190, 230 et 270K) (Matzler 2006)

Résolution de l'ETR

❑ Surface – Terres émergées

Atlas de réflectances/émissivités

Micro-Ondes : TELSEM2

Plage spectrale : 10 – 700 GHz

Résolution spatiale : 0.25° lat/lon

Instruments utilisés : SSM/I

Infra-Rouge : CAMEL (v2)

Plage spectrale : 3.7 – 14.3 μm

Résolution spatiale : 0.05° lat/lon

Instruments utilisés : MODIS

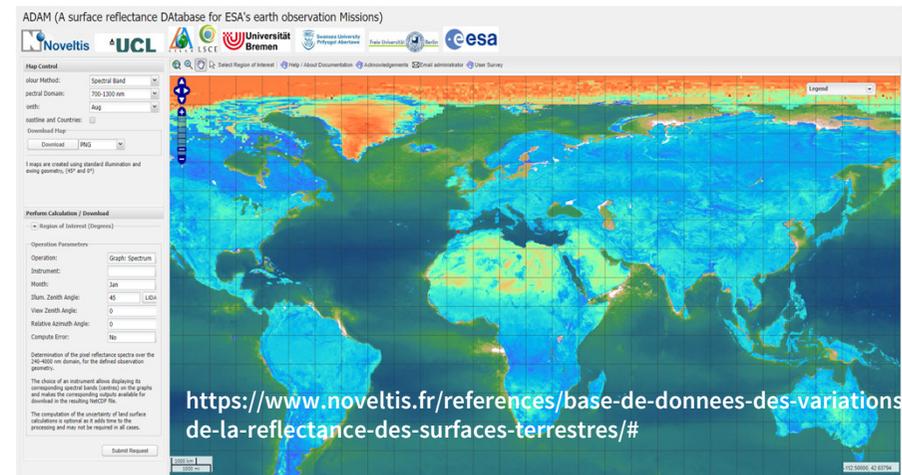
Visible/Proche IR : ADAM

Plage spectrale : 0.24 – 4.0 μm

Résolution spatiale : 0.1° lat/lon

Instruments utilisés : MODIS, SeaWiFS

Voir présentation plénière « Interface (surface) »



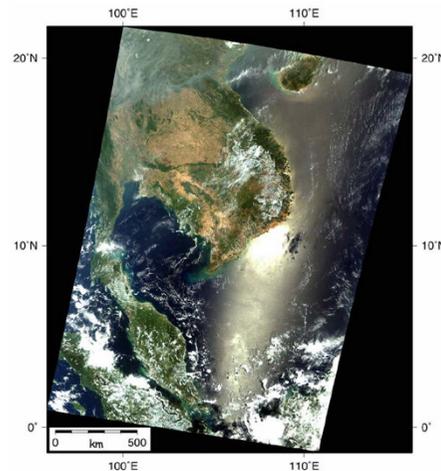
Résolution de l'ETR

☐ Surface - Océanique

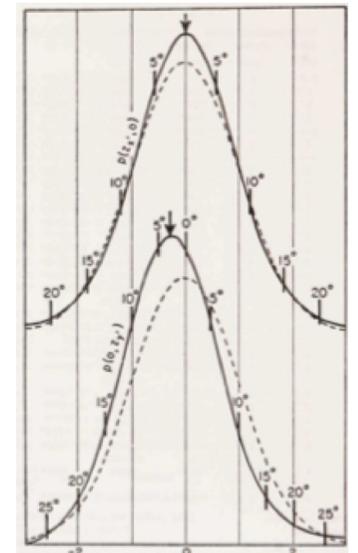
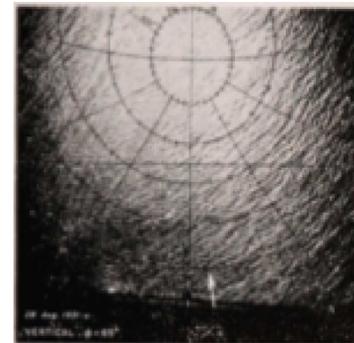
Interaction avec le dioptre surface océan uniquement (non prise en compte du transfert du rayonnement dans l'océan)

- **Modèle Lambertien** Dépend de la concentration en phytoplancton, de la mousse d'écume (vent) ...

- **Glitter**



Modèle Cox & Munk (1954)



Résolution de l'ETR

☐ Surface - Océanique

Couplage océan-atmosphère (prise en compte du transfert du rayonnement dans l'océan et de l'interaction avec les particules océaniques)



Aérosols

Réflectance interface

Hydrosols

Surface océanique

Besoins de caractériser les propriétés optiques des particules océaniques :

- coefficient de diffusion, d'absorption et indicatrice de diffusion des hydrosols
- caractéristique spectrale de la réflectance de la surface océanique

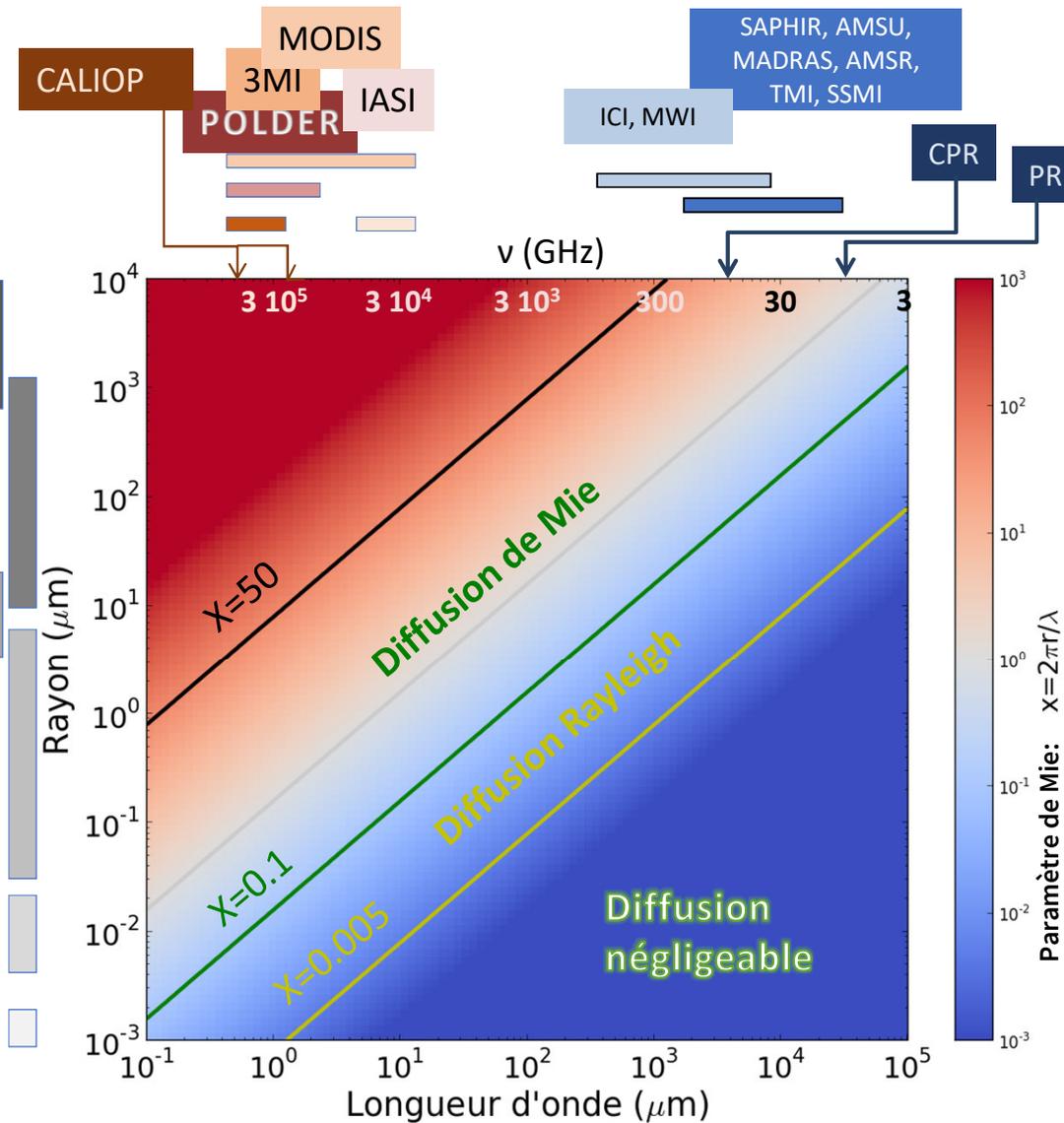
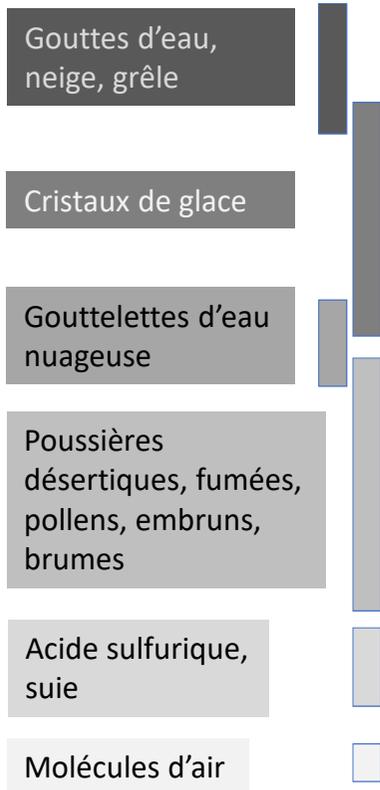
Résolution de l'ETR

☐ Méthodes de résolution de l'ETR

Différentes suivant les applications et la région spectrale

Certaines hypothèses peuvent être faites

- Négliger/paramétriser la diffusion
- Paramétriser l'absorption gazeuse
- Négliger l'émission



Résolution de l'ETR

☐ Méthodes de résolution de l'ETR

Visible

Source thermique négligeable

Source de diffusion non négligeable

$$+ \cancel{K_v^a \cdot B_v} +$$

Infra-Rouge

Source thermique non négligeable

Source de diffusion négligeable (suivant le type de diffuseur)

$$\mu \cdot \frac{dI_v(\mu)}{dz} = -K_v^e \cdot I_v(\mu) + K_v^a \cdot B_v + \frac{K_v^d}{2} \cdot \int_{-1}^1 P_v(\mu, \mu') \cdot I_v(\mu') \cdot d\mu'$$

Résolution de l'ETR

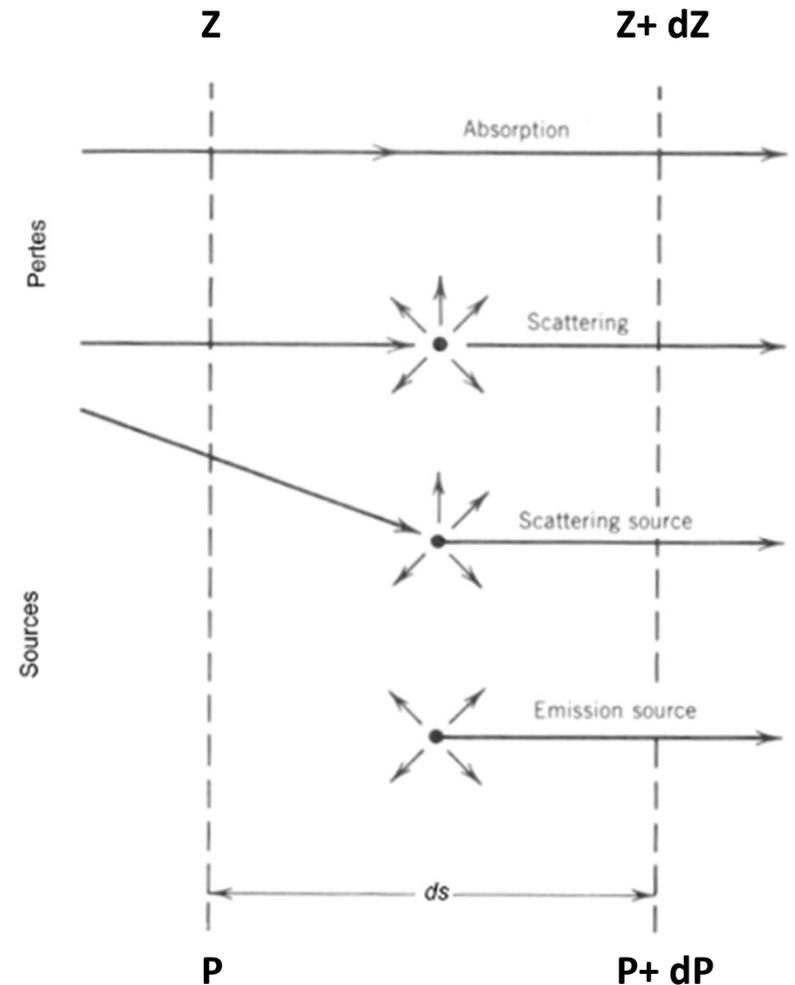
□ Méthodes de résolution de l'ETR

Cas d'une couche homogène

$$\mu \cdot \frac{dI_v(\mu)}{dz} = -\kappa_v^e \cdot I_v(\mu) + \kappa_v^a \cdot B_v + \kappa_v^d \cdot J_v$$

Dans le cas des raies par raies, on calcule les K_a pour toutes les raies d'absorption (nr de 1000 à 1 000 000 suivant les molécules) de chaque molécule n_c qui absorbe dans le domaine spectral simulé

$$K_a = \sum_{n_c} \sum_{n_r} k_a(n_c, n_r)$$



Résolution de l'ETR

☐ Méthodes de résolution de l'ETR

Intégration verticale (pression ou altitude)

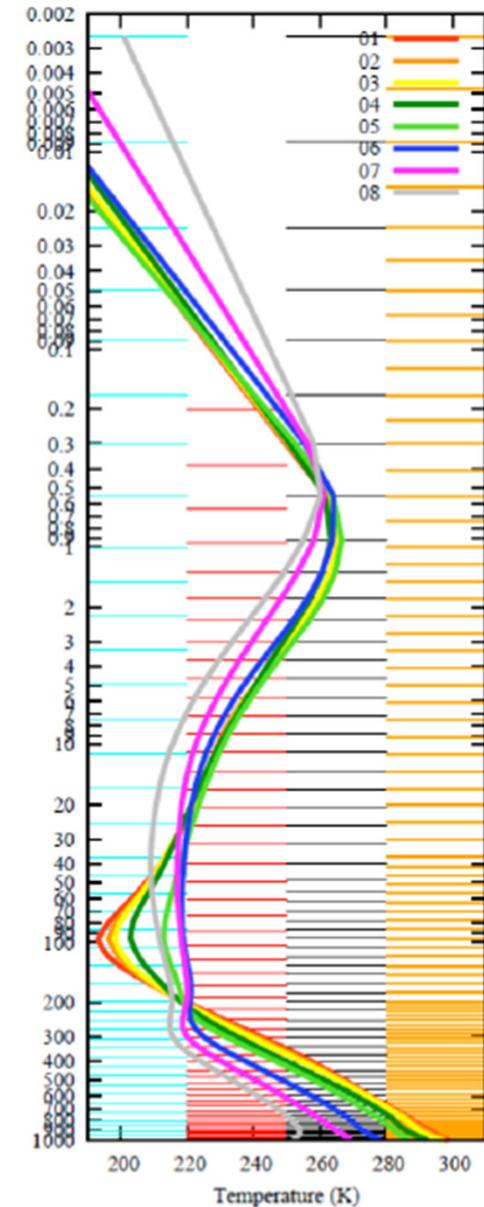
On discrétise en couches suffisamment fines l'atmosphère pour que l'on puisse supposer qu'elles sont homogènes en concentration gazeuses ou particulaires, température, (60 niveaux « hybrides sigma » à l'ECMWF)

On remplace les intégrales en pression/altitude dans l'équation du transfert radiatif par des sommes

$$T_v(P) = e \sum_{n=1}^{NI} \tau_v$$

NI nombre de couches

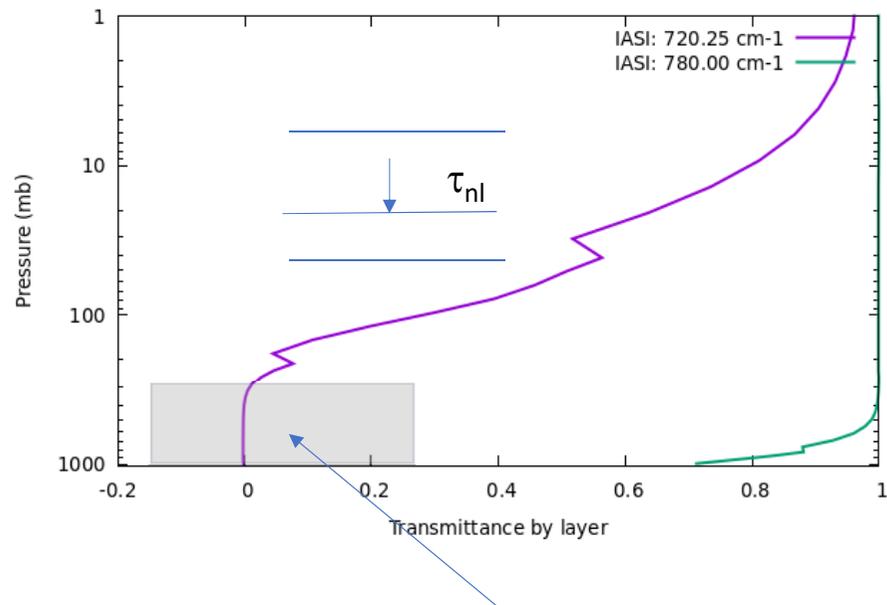
Épaisseur optique
 $\tau_v = \int_0^{\infty} K_v^e(z) \cdot dz$



Résolution de l'ETR

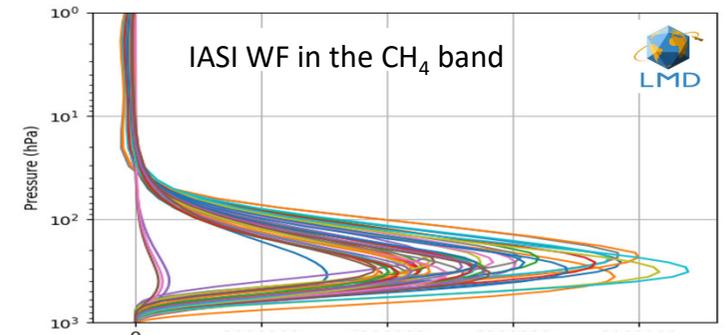
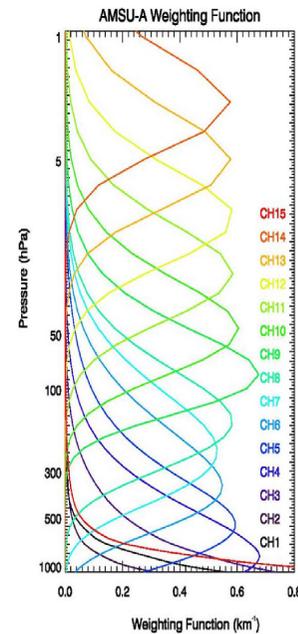
☐ Notion de fonction de poids

La dérivée de la transmission en fonction du logarithme de la pression représente la "fonction de poids" (weighting functions). Elle indique donc d'où vient l'essentiel de l'information



Atmosphère opaque: l'instrument est sensible qu'à une partie plus haute de l'atmosphère en comparaison de canaux voyant la surface (courbe verte)

microwave



Résolution de l'ETR

□ Des processus physiques de plus en plus fins/complexes à prendre en compte

- Non Equilibre Thermodynamique Local
- Fluorescence
- ...

Utilisation pour la 1^{ère} fois depuis l'espace de la bande à 1.27 μm de O_2 pour la détermination de la pression de surface (0.76 μm jusqu'ici) → sensibilité à « l'airglow »

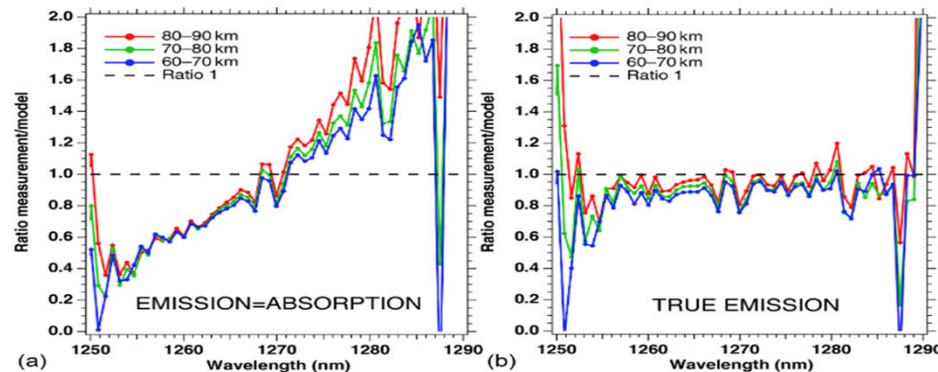
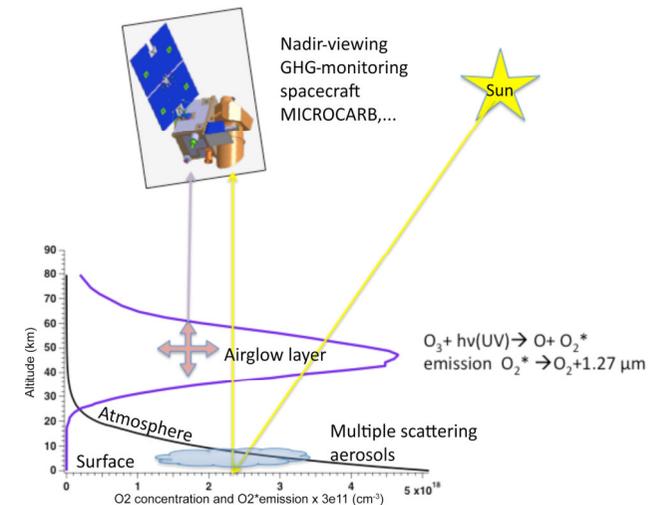


Figure 5. Ratios of measured spectra / model spectra of limb spectra, averaged over a whole Envisat orbit, and binned by altitudes (60–70, 70–80, and 80–90 km). (a) Crude model in which the shape of the emission of O_2^* is identical to the absorption by O_2 . (b) Same ratios with our new model described in Appendix A. The ratios are closer to 1 for larger altitudes because absorption by O_2 is neglected in this particular exercise.



Sketch of a space instrument and platform to monitor greenhouse gases (GHGs), including CO_2 . The O_2 concentration (black curve) and the O_2^* volume emission rate of the 1.27 μm airglow (blue curve) are plotted as a function of altitude. The optical path of nadir-viewing observations is inevitably crossing the airglow layer, whose emission is superimposed on the spectrum of solar radiation scattered by the surface–aerosols–atmosphere system. The O_2 absorption at 1.27 μm is mainly produced in the lower atmosphere, while the airglow is in the range of $\sim 30\text{--}70$ km altitude. Ozone photolysis indicated in the figure is the main source of O_2 airglow at 1.27 μm but not the only one

Résolution de l'ETR

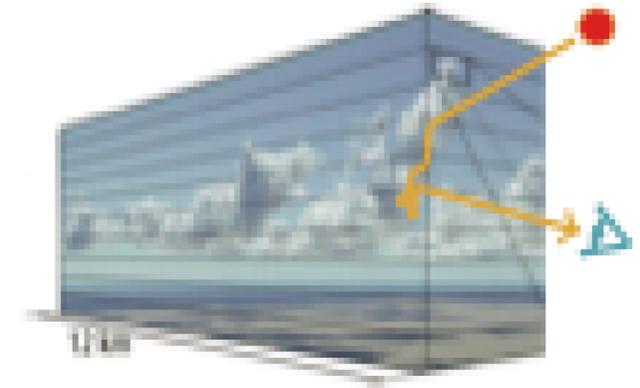
☐ Méthodes de résolution de l'ETR

Représentation 3D (hétérogène) de l'atmosphère
et résolution de l'ETR possible par la méthode de Monte-Carlo

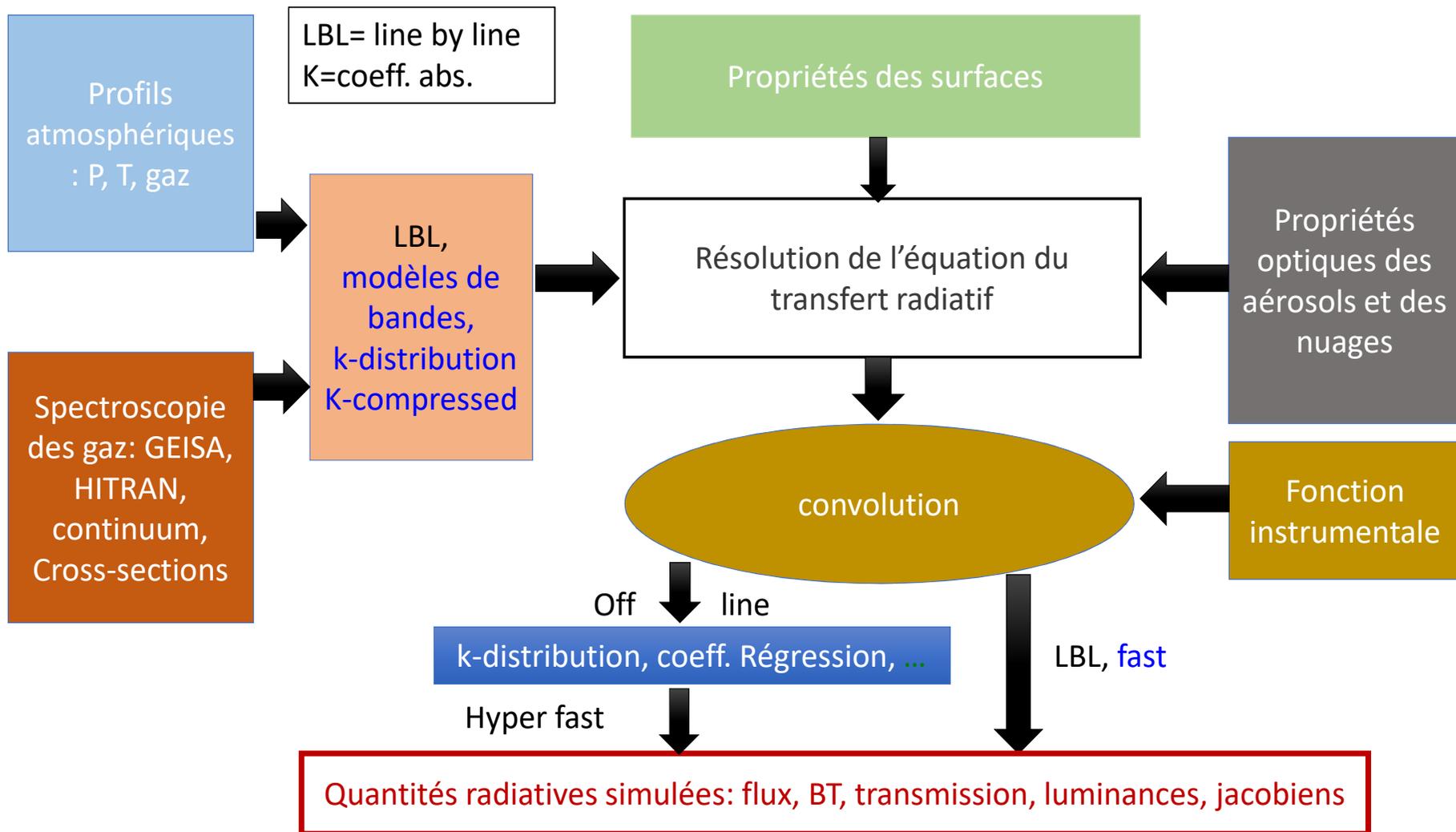
- Méthode probabiliste (estimation d'une moyenne)
- Echantillonnage aléatoire de chemins
- Suivre de la « vie » d'un photon dans le milieu
- Tirage aléatoire du type d'interaction (type de particules rencontrées, absorption, diffusion, direction diffusée, ...)

Avantage: Milieu complexe modélisable

Inconvénient: Temps de calcul rédhibitoire pour certaines applications



Architecture « typique » d'un code de TR



Codes de TR / Applications

☐ Modèles climatiques

Voir présentation plénière « Climat »

Besoins : codes rapides, précis en terme de flux (bilan radiatif)

Codes :

RRTM

Géométrie : 1D
Absorption : k-distribution
Particules : aérosols + nuage
Solveur : delta-eddington

McRad

Géométrie : 1D
Absorption : k-distribution
Particules : aérosols + nuage
Solveur : delta-eddington + Monte-Carlo (McICA)

ecRad

Géométrie : 1D + ~3D
Absorption : k-distribution
Particules : aérosols + nuage
Solveur : delta-eddington + SPARTACUS

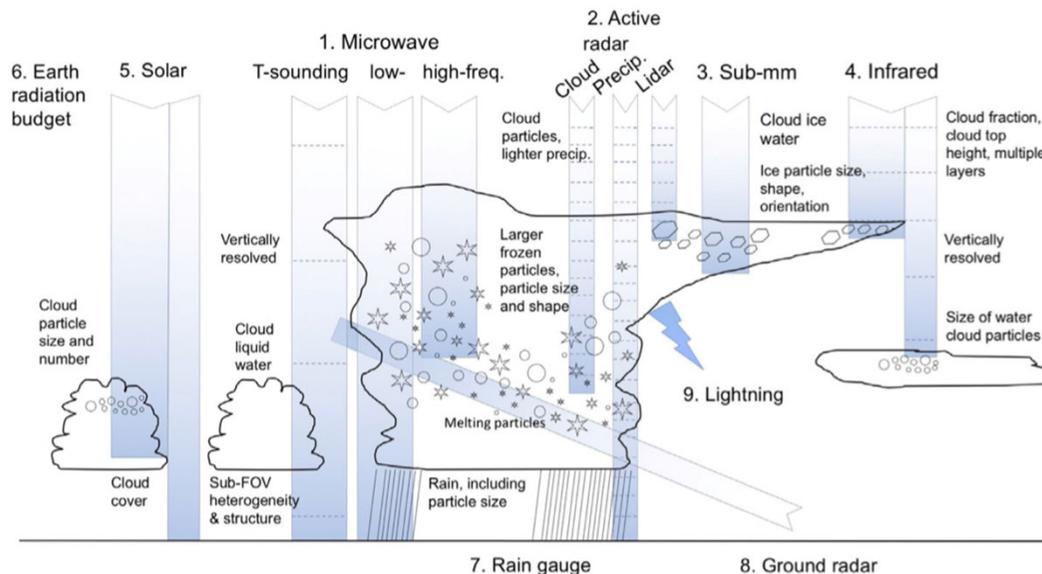
Codes de TR / Applications

☐ Prévisions numériques / Assimilation

Besoins : codes TRES rapides, précis en terme de luminance (assimilation)

Codes :

RTTOV



Spécificités

Géométrie 1D

Absorption paramétrisée (P, T, concentration)

Propriétés optiques P. Yang, A. J. Baran et ARTS (Eriksson)

Jacobiens, Tangent Linéaire, Adjoint

~ 30 instruments Micro-Ondes (20 a 183 Ghz)

Variables d'état (assimilation)

Profil Température, humidité et précipitation

Nouveautés

Extension submillimétrique (200 – 1000 GHz) avec ICI (Ice Cloud Imager)

Constellation mini-sondeur AWS 325 Ghz

Codes de TR / Applications

☐ La télédétection

Besoins : codes rapides (suivant le type de mesures), précis en terme de luminance

La mesure définie souvent le type de code utilisé

• IASI/IASING

Types de mesure : spectralement résolue dans l'IR thermique



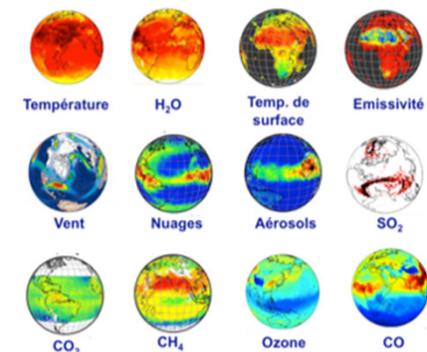
Diffusion souvent négligeable en ciel clair

Paramétrisation de cette diffusion possible (ciel nuageux)

Codes de TR utilisés : [RTTOV](#), [KOPRA](#) (algo inversion KOPRA-FIT), [4A/OP](#) (base apprentissage Neural Network, CAL/VAL, estimation optimale 4ARTIC ou 5AI), [ARAHMIS](#)

Voir tutoriel « [4A/OP](#) » et « [ARAHMIS](#) »

Variables restituées

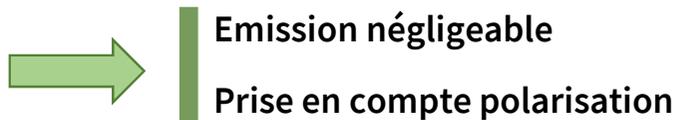


Codes de TR / Applications

☐ La télédétection

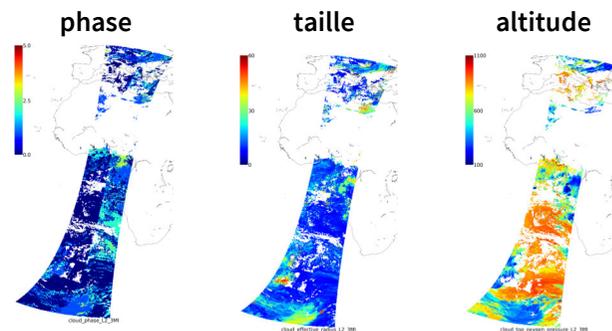
- 3MI

Types de mesure : Multi-angulaire, polarimétrique dans l'UV, VIS, proche IR

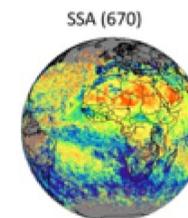


Codes de TR utilisés : ARTDECO (DOAD), OS-GRASP/OS-LOA

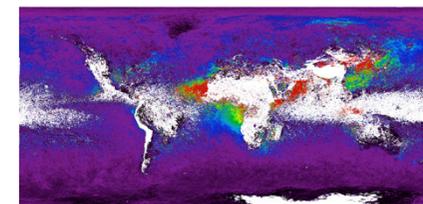
Variables restituées :



Albédo de diffusion simple



AOT au-dessus des nuages

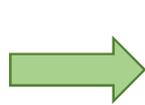


Codes de TR / Applications

☐ La télédétection

- MicroCarb

Types de mesure : Spectralement résolue dans l'UV, VIS, proche IR



Emission négligeable

Modèles aérosols simplifiés 2 couches, diffusion rapide (LSI*)

Codes de TR utilisés : 4A/OP (LSI*)

* Low Stream Interpolation, O'Dell 2010

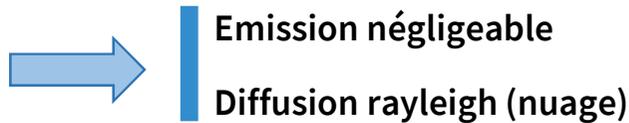
Variables restituées : Colonne CO₂ (XCO₂), Fluorescence

Codes de TR / Applications

☐ La télédétection

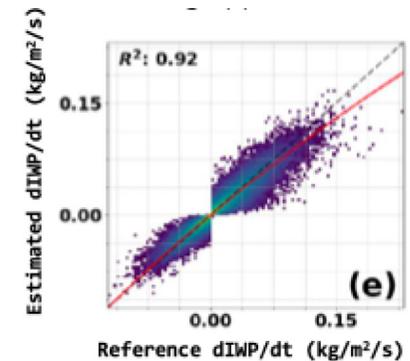
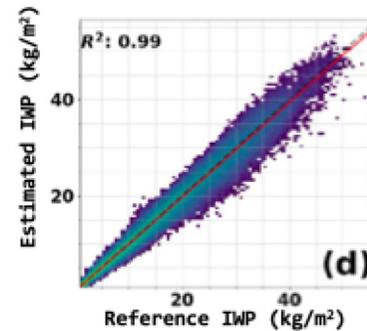
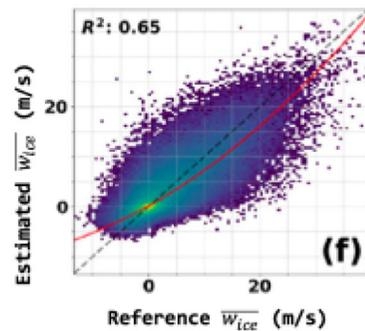
- C²OMODO

Types de mesure : Radiométrique dans les **Micro-Ondes**



Codes de TR utilisés : **RTTOV**

Variables restituées : vitesse verticale du cœur convectif / Contenu en glace intégré (IWP) / flux vertical d'IWP

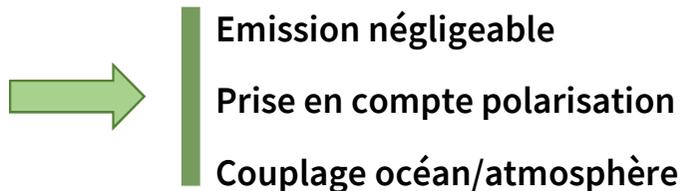


Codes de TR / Applications

☐ La télédétection

- PACE (Ocean Color Instrument + SPEXone + HARP2)

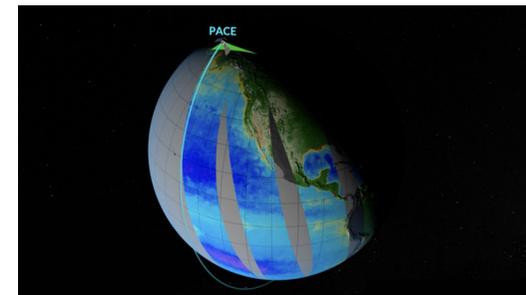
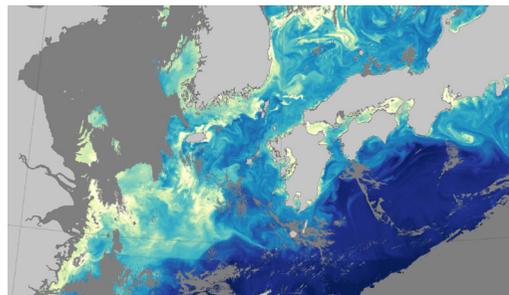
Types de mesure : Spectralement résolue + polarimétrique dans l'UV, VIS, proche IR



Codes de TR utilisés : **OSOAA** (OS), **SMART-G** (Monte-Carlo)

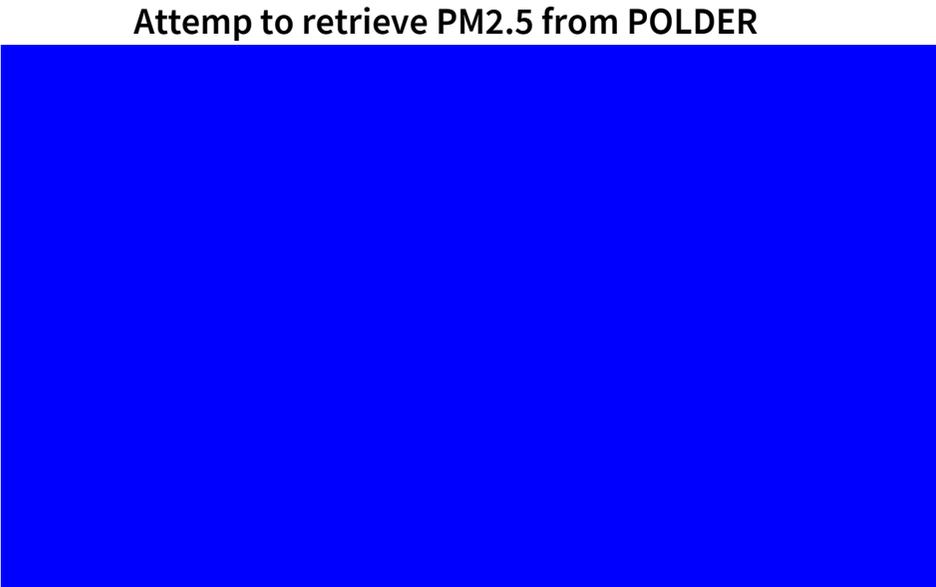
Variables restituées : Phytoplancton, Aerosols, Clouds, ocean Ecosystem (PACE)

Voir tutoriel « OSOAA »



Codes de TR / Applications

- ❑ Qualité de l'air avec les OS-GRASP



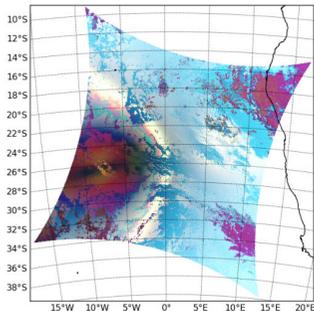
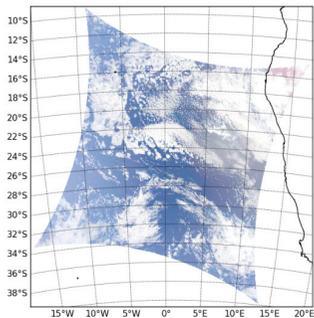
Codes de TR / Applications

Voir tutoriel « ARTDECO »

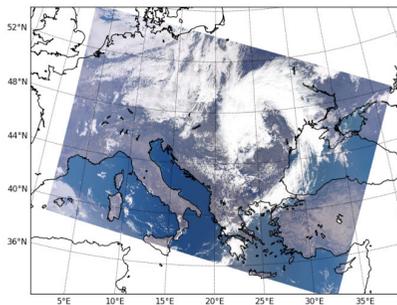
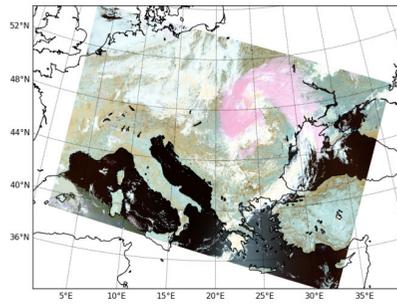
☐ Simulations d'observables avec ARTDECO

- FCI, MetImage, 3MI, CO2M, ...

3MI/METOP-SG



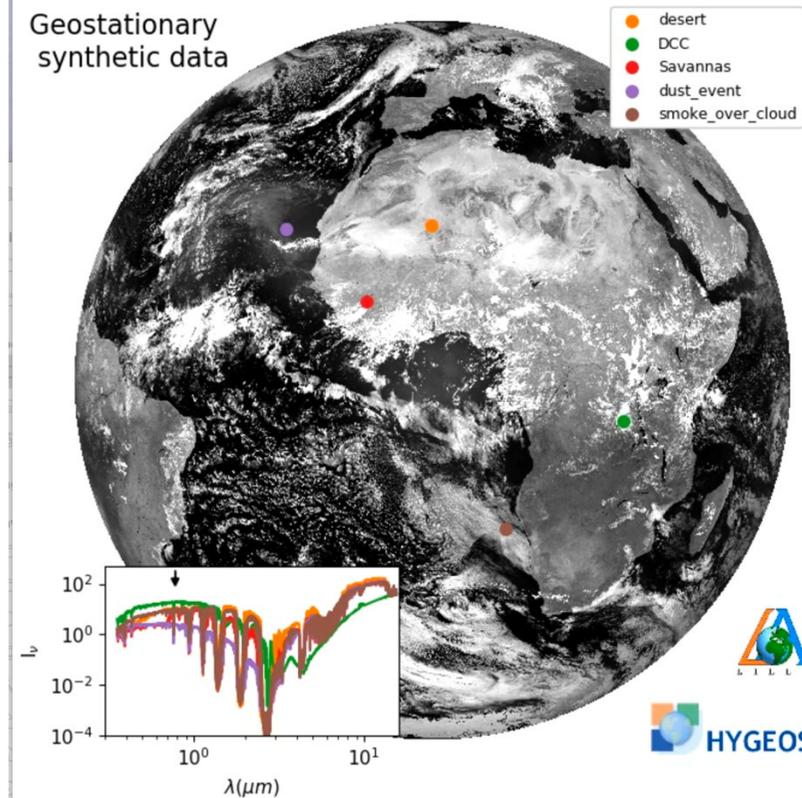
VII/METOP-SG



FCI/MTG

$\lambda = 0.77750\mu\text{m}$

Geostationary synthetic data



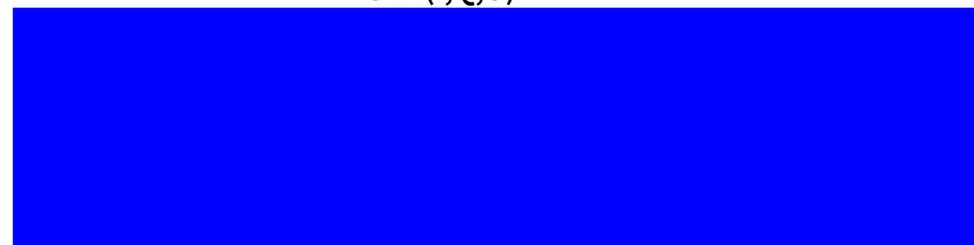
Codes de TR / Applications

☐ Simulations d'observables réalistes (atmosphère sphérique) – SMART-G

Spécificités

- Solveur Monte-Carlo
- Absorption gazeuse (1D) (k-dist, haute résolution spectrale)
- Aérosols / hydrosols / nuages (1D, objets 3D)
- Surface 2D/3D
- Plusieurs modèles de capteurs (caméra, imageur)
- Source solaire
- Prise en compte polarisation
- Couplage Océan/Atmosphère

3MI (I,Q,U)



Sondeur au Limbe ALTIUS



Applications

- Evaluation algorithmes de restitutions
- Télédétection (couleur de l'eau)
- Correction atmosphérique (effets d'environnement)
- Ressource solaire au sol

Voir tutoriel « SMART-G »

Codes de TR / Applications

Voir tutoriel « HTRDR »

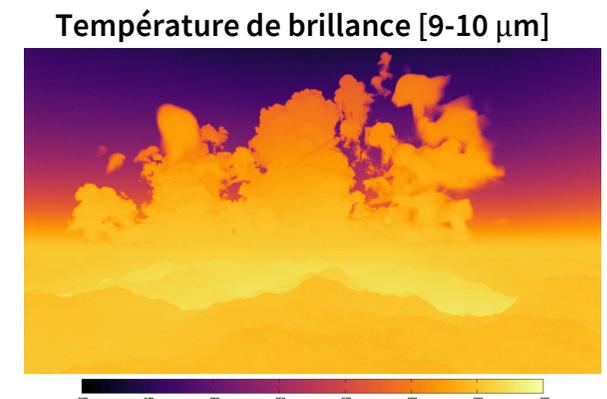
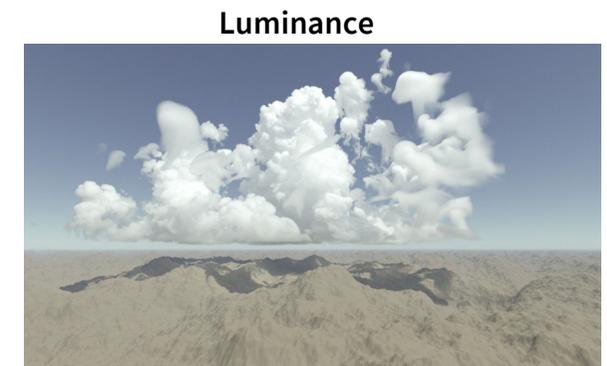
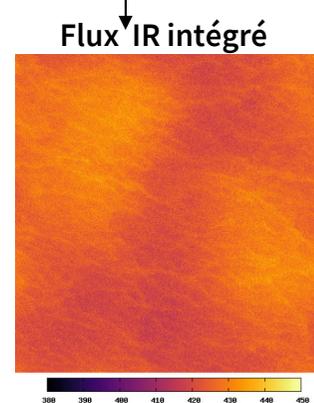
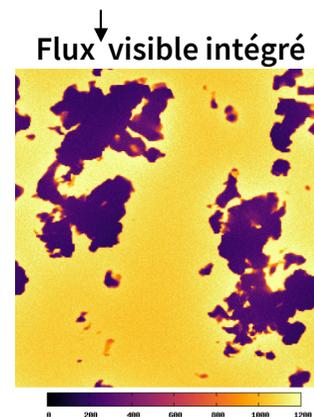
☐ Simulations d'observables réalistes (atmosphère 3D) - HTRDR

Spécificités

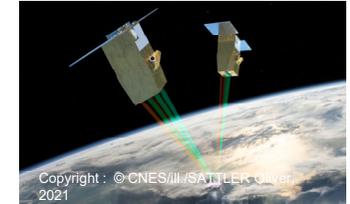
- Solveur Monte-Carlo
- Absorption gazeuse (1D) via k-distribution
- Aérosols / nuages (3D)
- Surface complexe (3D)
- Plusieurs modèles de capteurs (caméra, flux)
- Source solaire et IR

Applications

- Evaluation modèles rapides (SPARTACUS) pour le climat
- Evaluation algorithmes de restitutions
- Compréhension interactions nuages / rayonnement et milieu urbain / rayonnement



Codes de TR / Applications

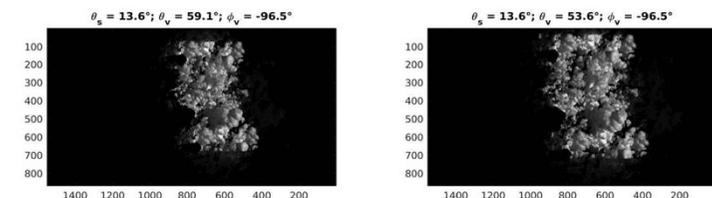
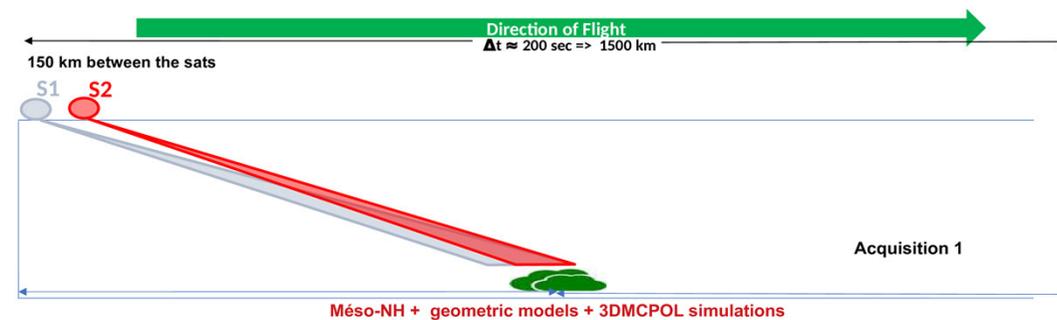
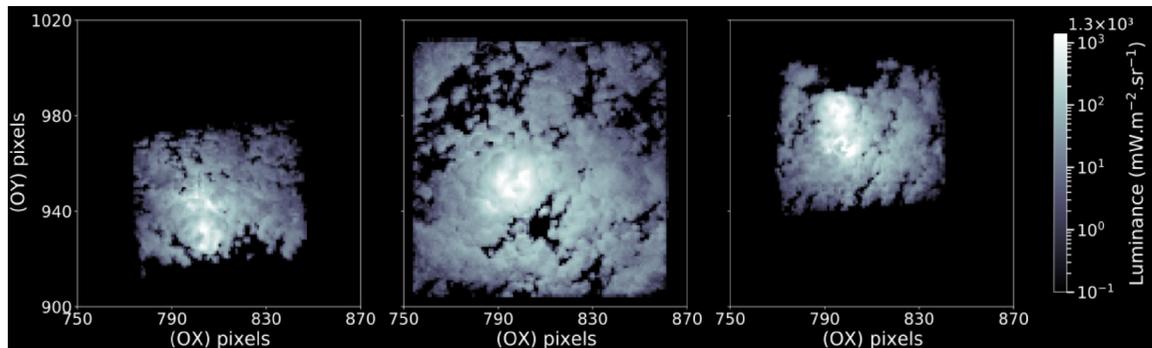


☐ Simulations d'observables réalistes (atmosphère 3D) – 3DMCPOL

Spécificités

- Solveur Monte-Carlo
- Absorption gazeuse (1D) (k-dist et L-dist)
- Aérosols / nuages (3D)
- Surface lambertienne
- Plusieurs modèles de capteurs (caméra, imageur)
- Source solaire, IR et éclair
- Prise en compte polarisation

Mode caméra source éclair à 777 nm (Instrument LOIP)



Mode caméra à 645.7 nm (Instrument CLOUD)

Applications

- Evaluation algorithmes de restitutions
- Compréhension interactions nuages / rayonnement

Codes de TR / Applications

☐ Simulations d'observables réalistes (surface 3D) - DART

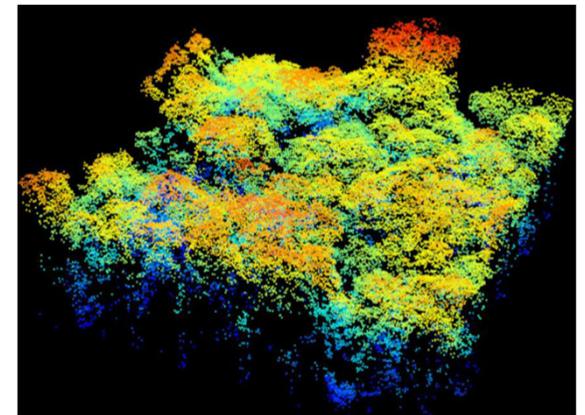
DART (3D model to simulate the radiative budget and remote sensing observations of urban / natural landscapes (<https://dart.omp.eu>)) has 3 modes to simulate the propagation of radiation:

- **DART-FT**: Flux tracking = adaptation of discrete ordinate method (DOM).
Standard mode to simulate radiometers and radiative budget (VIS to TIR)
- **DART-RC**: Ray Carlo = Forward Monte Carlo + Flux tracking.
Standard mode to simulate LiDAR
- **DART-Lux**: from LuxCoreRender.org: bi-directional Monte Carlo.
The new mode.

Voir tutoriel « DART »

DART-RC: measured and simulated
LiDAR cloud point of Paracou
(Guyana)

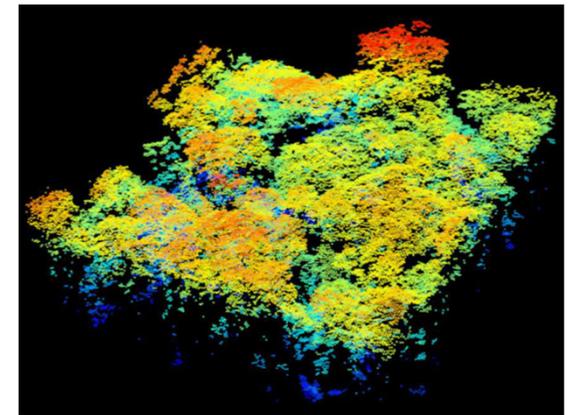
Airborne Riegl
LMS-Q780



DART-RC

3D architecture derived
from TLS and measured
leaf optical properties

(Durrieu *et al.* 2019)



Avancées/Nouveautés en TR...

□ Importance des inter-comparaisons

Importance de réaliser régulièrement des exercices d'inter-comparaisons

- ✓ Entre algorithmes
- ✓ Par rapport à de « vraies observations »

Pour cela, il faut :

- ✓ Des observations bien calibrées radiométriquement et spectralement
- ✓ Des données thermodynamiques précises
- ✓ Distances de co-localisation assez faibles (temps et en distance)
- ✓ Suffisamment des cas pour que statistiquement biais et écart-types soient réalistes

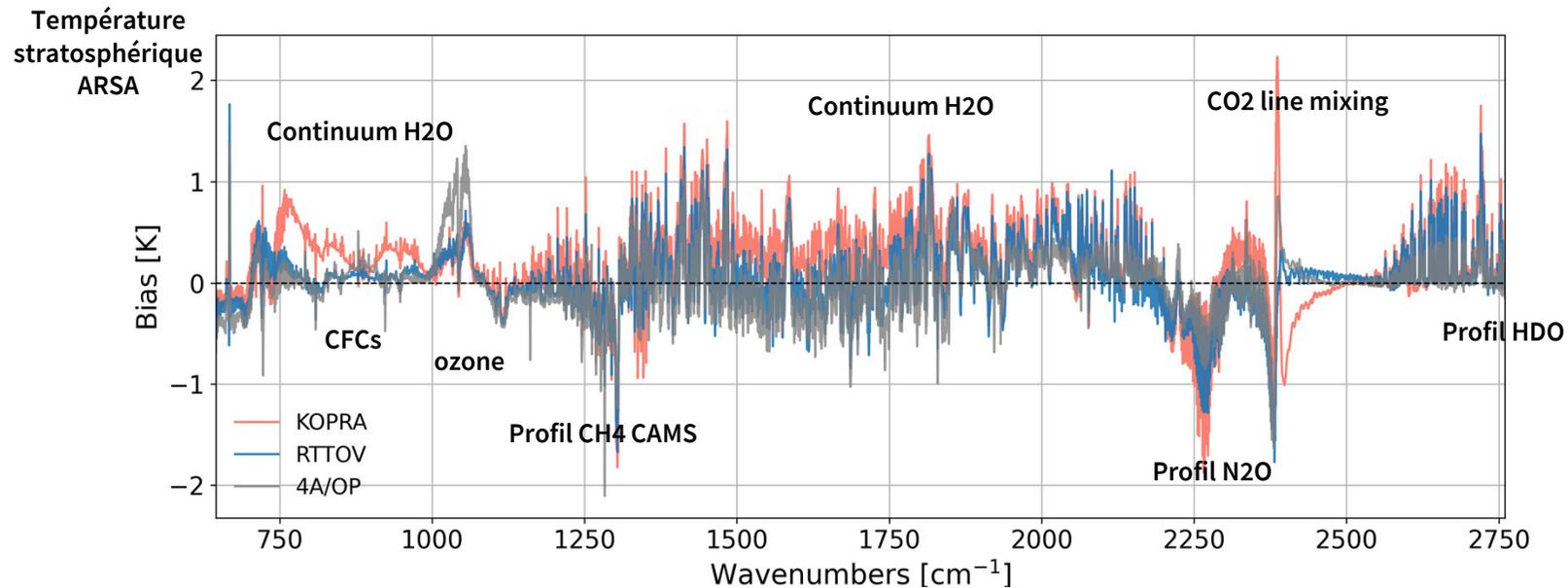
Exemple de l'exercice régulier entre RTTOV et 4A (premiers résultats à TRATTORIA 2020)

- ✓ Observations IASI
- ✓ Radiosondages de la base ARSA (2017)
- ✓ Profil de concentration GHG (CO₂, CH₄) de la réanalyse CAMS
- ✓ Situation sur mer (bonne caractérisation de l'émissivité)
- ✓ De nuit (estimation précise de la température de surface)

Avancées/Nouveautés en TR...

□ Importance des inter-comparaisons

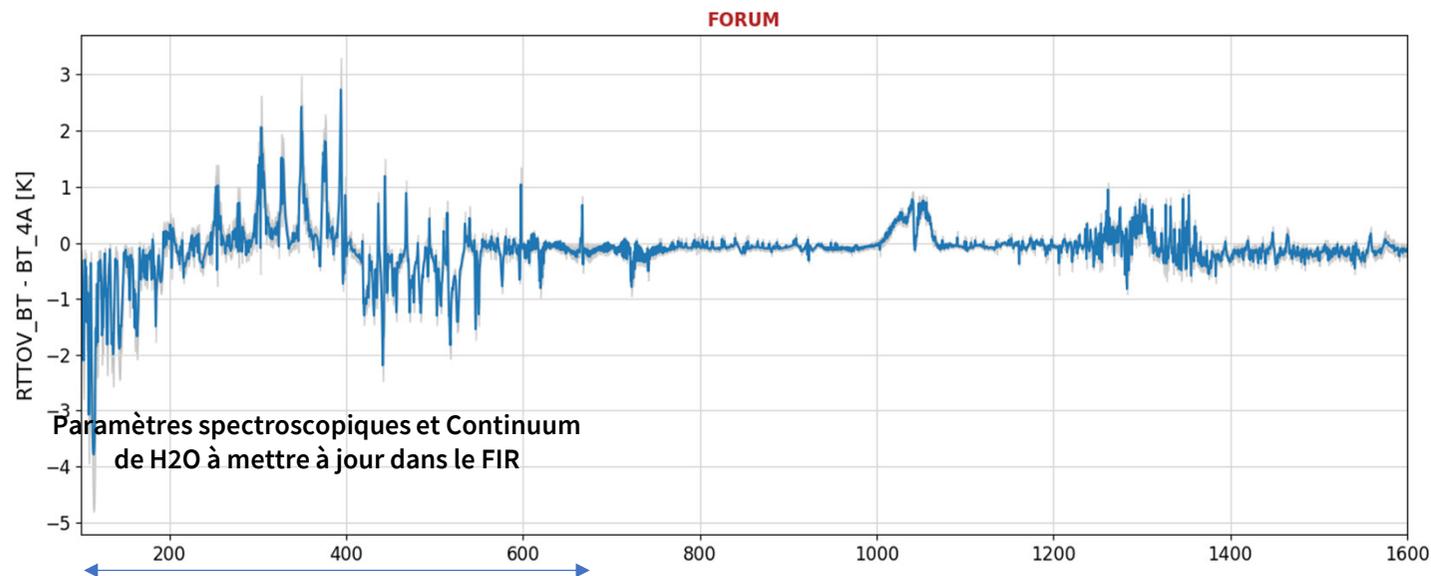
- 19706 co-localisations retenues divisées en 5 masses d'air (tropicale, tempérées été/hiver, polaires extrêmes/moyennes)
- Comparaisons aux observations IASI (validation de la spectroscopie) ou entre RT (préparation mission FORUM)
- Généralisation de l'exercice à d'autres RT : KOPRA (LISA), ARHAMIS (LOA), ...



Avancées/Nouveautés en TR...

□ Importance des inter-comparaisons

- 19706 co-localisations retenues divisées en 5 masses d'air (tropicale, tempérées été/hiver, polaires extrêmes/moyennes)
- Comparaisons aux observations IASI (validation de la spectroscopie) ou entre RT (préparation mission FORUM)
- Généralisation de l'exercice à d'autres RT : KOPRA (LISA), ARHAMIS (LOA), ...



Avancées/Nouveautés en TR...

❑ Nouvelles missions (nouveaux instruments)

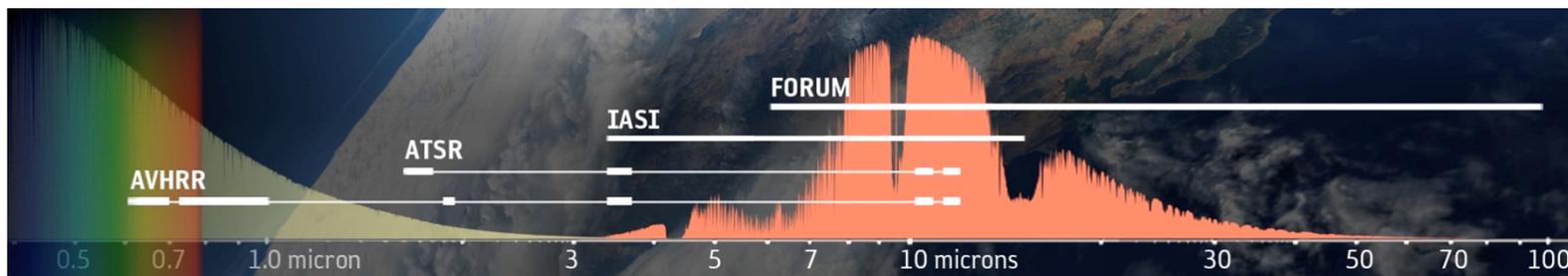
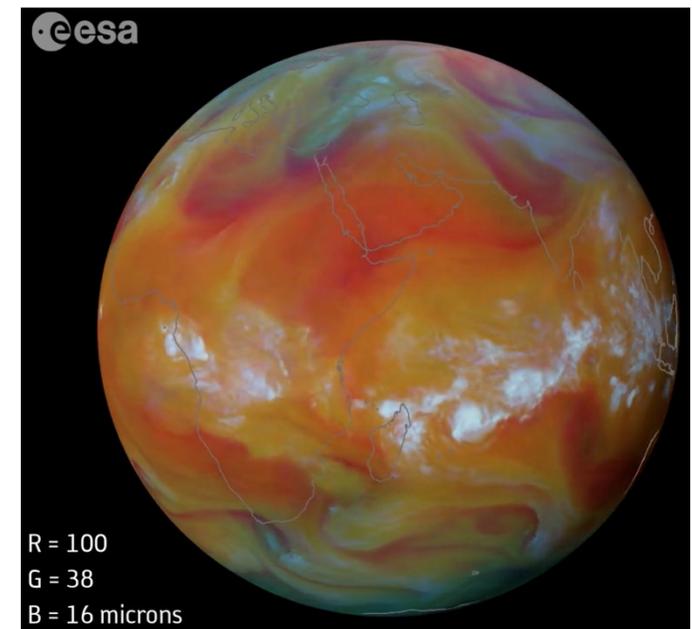
FORUM (Far infrared Outgoing Radiation Understanding and Monitoring)

Sélection : 2018 dans le cadre du programme Earth Explorer

Lancement : 2027

Objectifs :

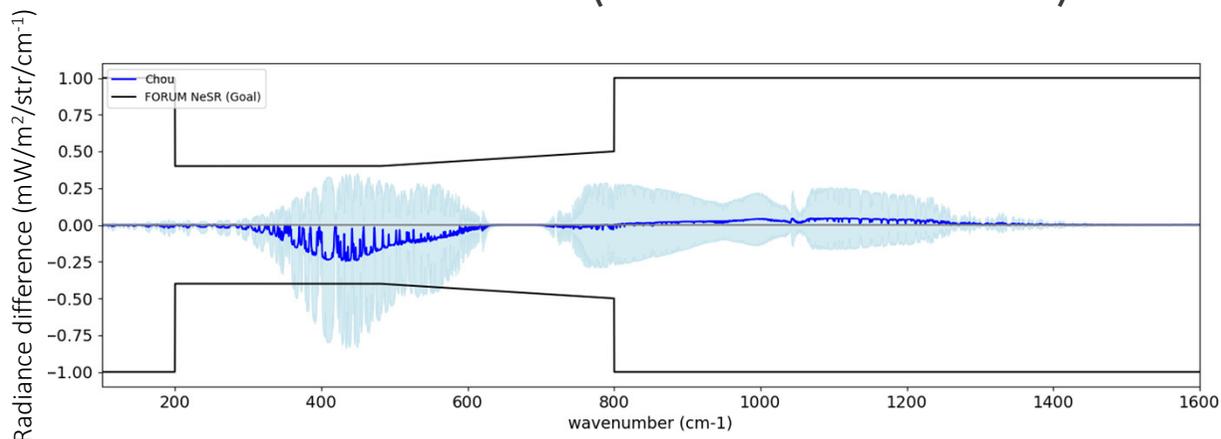
- fournir le premier spectre complet d'émission du système Terre-Atmosphère en vue d'améliorer notre compréhension du climat
- restitution de variables géophysiques essentielles pour le climat



Avancées/Nouveautés en TR...



☐ Nouvelles missions (nouveaux instruments)

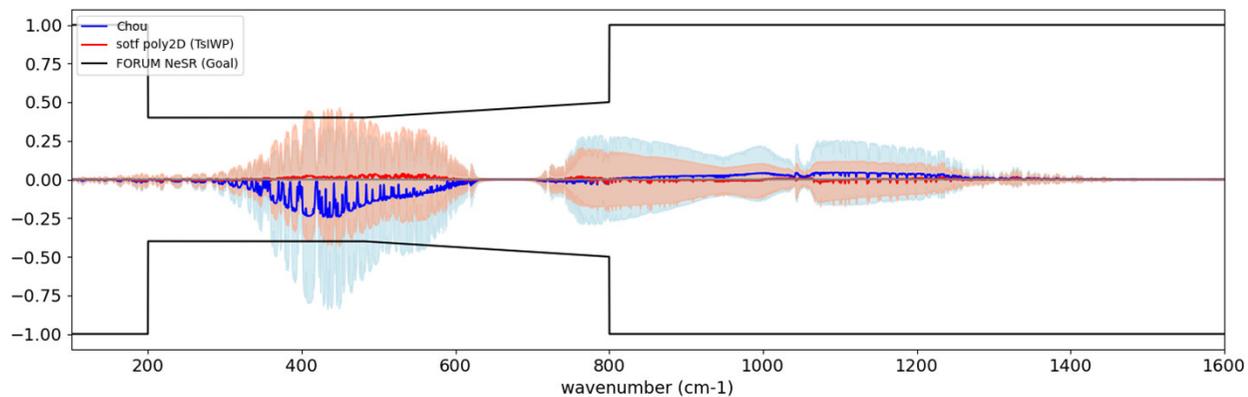


Simulation RTTOV

Nuages de glace

Approximation de la diffusion (Chou et al. 1999)

Correction de cette approximation (Tang et al. 2018;
C.-Labonnote et al. 2022)



Avancées/Nouveautés en TR...

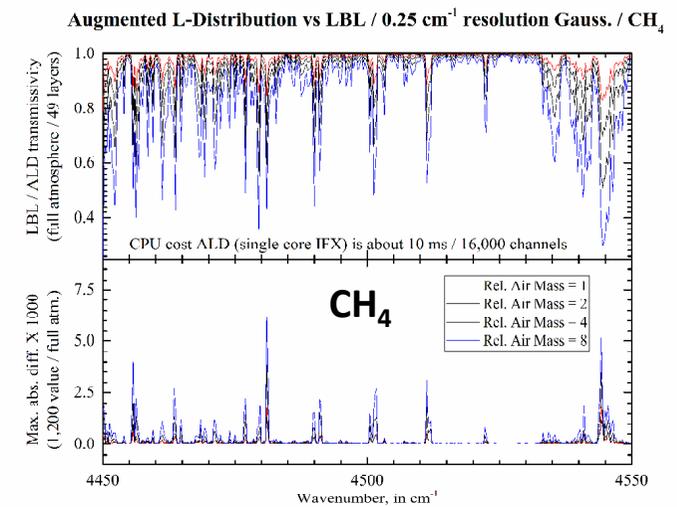
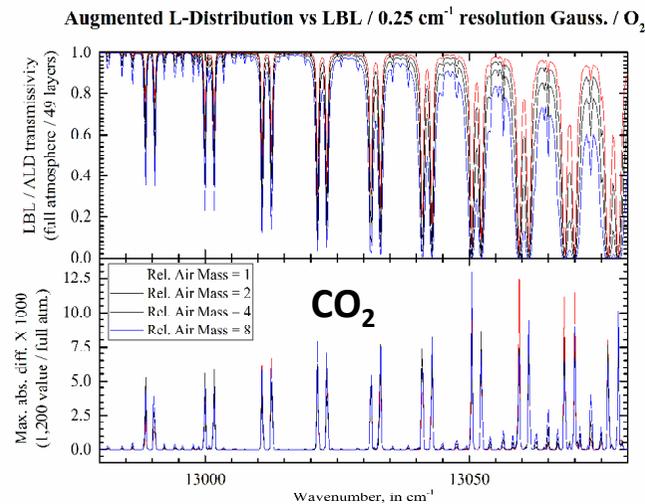
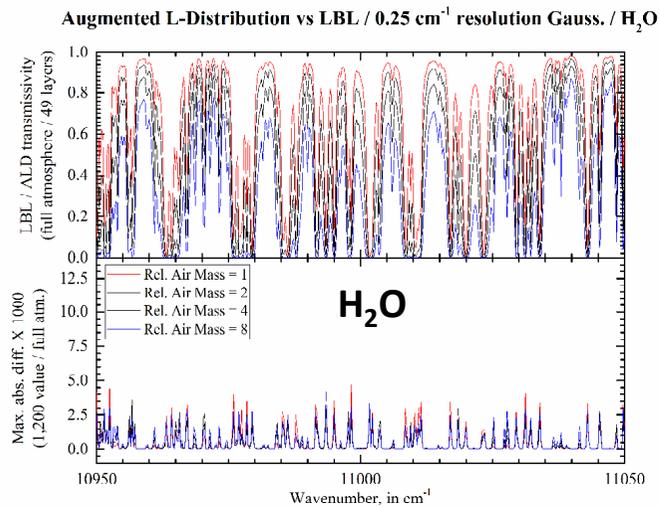
□ Développement nouvelles méthodes

Voir table ronde « Nouvelles méthodes pour accélérer les codes »

L-distribution augmentées pour la prise en compte de l'absorption gazeuse

Spécificités :

- **Combinaison** originale entre modélisation **physique / statistique / apprentissage**.
- Approche spécifiquement **dédiée aux cas non uniformes**
- **Très bonnes capacités de généralisation** (*hyperspectral / profils multiples*).
- **Haute précision** (<0.1% en apprentissage direct ; *général < 0.2%* hors hyperspectral) à **très faible coût** (de l'ordre de 10ms pour 16,000 canaux / 49 couches).

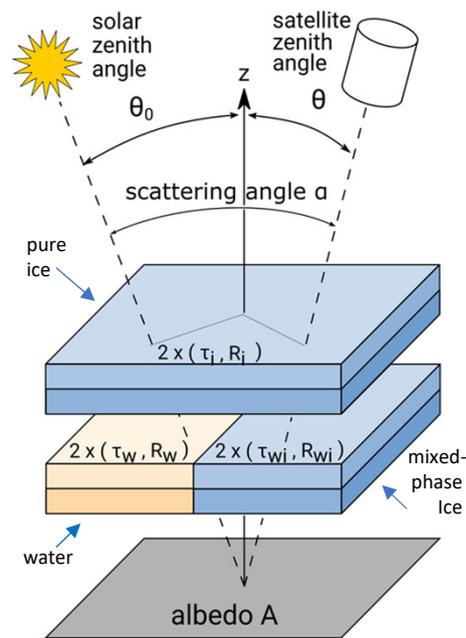


Avancées/Nouveautés en TR...

❑ Développement nouvelles méthodes

Voir présentation plénière « Accélération des codes »

Transfert Radiatif via réseaux de neurones

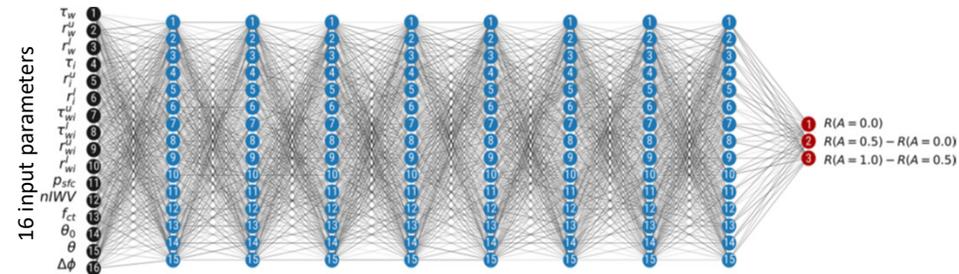


Idealised profile structure (defined by 16 parameters)

MFASIS-NN in RTTOV 14

(MFASIS = Method for FAsT Satellite Image Synthesis)

- Fast (<1μsec/profile) and accurate (reflectance errors < 0.01) approximation of discrete ordinate method (DOM) for solar channels between 0.4μm and 2.2μm (for which multiple scattering is important)
- NWP model profiles can be replaced by idealised profiles (defined by 16 parameters) without changing the reflectance significantly
- Reflectances for idealised profiles with random param. combinations are computed with DOM and used to train a small (→fast) deep feed forward neural network to generate reflectances from parameters



Network: 8 hidden layers, 2000-5000 weight parameters

Output values allow for computing reflectance for arbitrary albedo values

Avancées/Nouveautés en TR...

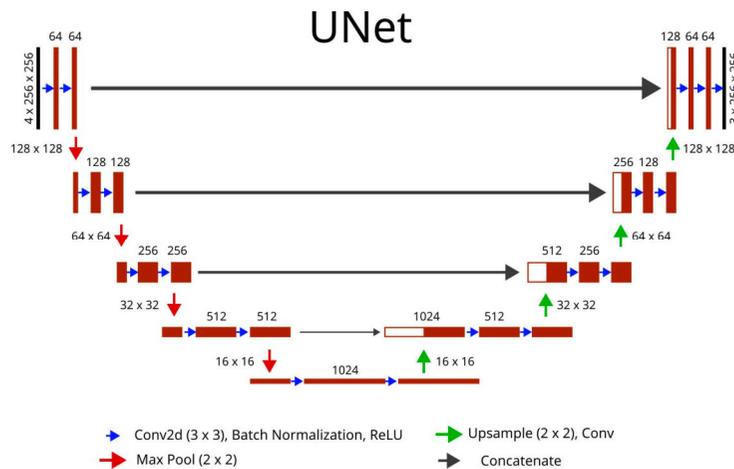
❑ Développement nouvelles méthodes

Transfert Radiatif via réseaux de neurones

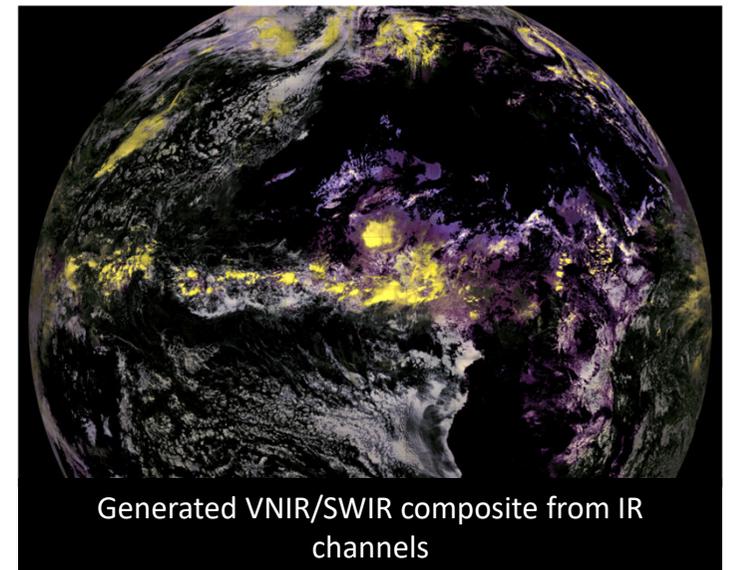
Development of a ML technique for the homogenization of day/night cloud products

Generation of VIS/NIR/SWIR reflectance channels from IR bands at night

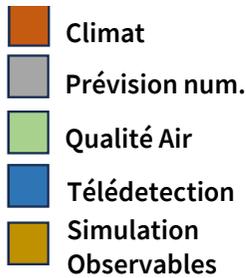
INPUTS :
4 SEVIRI
Thermal
IR bands



OUTPUTS :
3 SEVIRI VNIR/SWIR
bands 670, 865 &
1650 nm



Panorama non exhaustif ...



| Codes | Géométrie | Type | Spectre | Diffusion | Absorption | Polarisation | Couplage Océan/Atmos | Jacobien | Solveur | Applications |
|-------------------|-------------|------------|---------------|-----------|---------------|--------------|----------------------|----------|-----------|--|
| RRTM | 1D | Spectral | Vis-TIR | 2-flux | K-dist | Non | Non | Non | DOM | Climat |
| McRad | 1D/IPA | Spectral | Vis-TIR | 2-flux | K-dist | Non | Non | Non | DOM/MC | Climat |
| ecRad | 1D/~3D | Spectral | Vis-TIR | 2-flux | K-dist | Non | Non | Non | DOM | Climat |
| LBLRTM | 1D | Spectral | Vis-TIR | | LBL | Non | Non | Non | DOM | |
| RTTOV | 1D | Spectral | Vis-FIR-MWV | Param. | Param. | Non | Non | Oui | DOM + | Climat, Prév. num., Télédétection |
| 4A/OP | 1D | Spectral | Vis-FIR | | LBL | Non | Non | Non | DOM/LSI | Télédétection, Simulation |
| KOPRA | 1D | Spectral | Vis-FIR | | LBL | Non | Non | | | Télédétection |
| ARAHMIS | 1D | Spectral | Vis-FIR | simple | LBL | Non | Non | Oui | | Télédétection |
| LIDORT | 1D | MonoChrom. | | multiple | | Non | Non | Oui | DOM | |
| VLIDORT | 1D | MonoChrom. | | multiple | | Oui | Non | Oui | DOM | |
| ARTDECO | 1D | Spectral | Vis/TIR | multiple | K-dist | Oui | Non | Non | DOM/AD/MC | Télédétection, Simulation |
| OS-LOA / OS-GRASP | 1D | MonoChrom. | Vis / Vis-TIR | multiple | | Oui | Non | Non | OS | Télédétection / Télédétection, Qualité Air |
| OSOAA | 1D | MonoChrom. | Vis | multiple | | Oui | Oui | Non | OS | Télédétection |
| SMART-G | 1D/3D/Sphé. | Spectral | Vis | multiple | K-dist | Oui | Oui | Non | MC | Télédétection, Simulation |
| HTRDR | 3D | Spectral | Vis/TIR | multiple | K-dist | Non | Non | Non | MC | Simulation |
| 3DMCPOL | 3D | Spectral | Vis/TIR | multiple | K-dist/L-dist | Oui | Non | Non | MC | Simulation |