

TRATTORIA-2015
Lille, 25-27 Mars 2015

Spectroscopie atmosphérique et absorption gazeuse

Cyril Crevoisier

Laboratoire de Météorologie Dynamique

Remerciements :

LMD : R. Armante, V. Capelle, A. Chédin, A. Feofilov, N. Jacquinet, N. A. Scott

LATMOS : H. Brogniez

LiPhy : A. Campargue

LISA : J.-M. Hartmann, A. Perrin, H. Tran



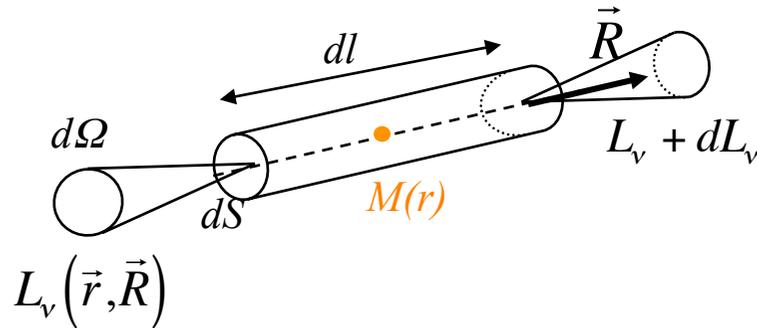
Evolution sur 2008-2015

- **Fort développement des recherches dans le SWIR** (contexte des missions gaz à effet de serre : GOSAT, MicroCarb, CarbonSat, Merlin)
 - **Des couplages entre différentes bandes spectrales :**
 - IR-MO : couplage classique (météo, thermodynamique, nuages)
 - IR-UV/Vis : étude de l'ozone et des aérosols (ex: IASI-GOME2)
 - IR-SWIR : développement en cours (gaz à effet de serre, aérosols).
 - **Des instruments de plus en plus performants (IASI, GOME-2, SAPHIR, TCCON, etc) :**
 - Détection/estimation de nouvelles espèces (ex : plus de 25 « vues » par IASI).
 - Retour sur la spectroscopie et le TR par **suivi des niveaux 1** et **évaluation des niveaux 2**.
 - **Des approches opérationnelles...** aussi pour la composition atmosphérique (contexte GMES/Copernicus).
- Ces recherches ont fait évoluer les besoins en spectroscopie et en modélisation du transfert radiatif sur les 7 dernières années.

Quelques rappels théoriques



L'équation de transfert radiatif



$$\frac{dL_v}{dl}(\vec{r}, \vec{R}) = -K_v(\vec{r}) \left[L_v(\vec{r}, \vec{R}) - J_v(\vec{r}, \vec{R}) \right]$$

Fonction source

K_λ : coefficient d'extinction
 = K_a : coefficient d'absorption si l'on néglige les phénomènes de diffusion.

L'absorption du rayonnement par les molécules atmosphériques est intimement liée à leurs caractéristiques énergétiques.

→ transfert d'énergie entre les niveaux énergétiques discrets associés à des états de rotation, de vibration ou de configuration électronique.

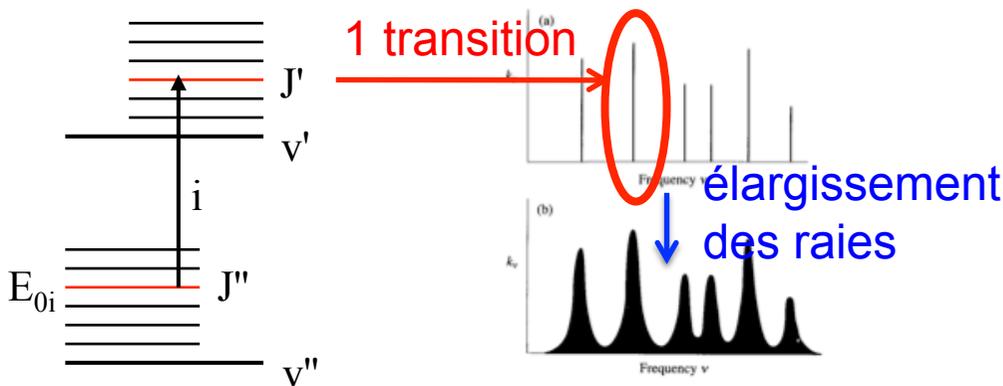


Fig. 3.5 Hypothetical line spectrum (a) before broadening, (b) after broadening.

Principaux effets d'élargissement:

- collisions.
- effet Doppler.

→ des formes de raie différentes.

Quelques rappels théoriques



L'équation de transfert radiatif

Pour une transition E1 → E2 donnée :

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

intensité intégrée forme de raie

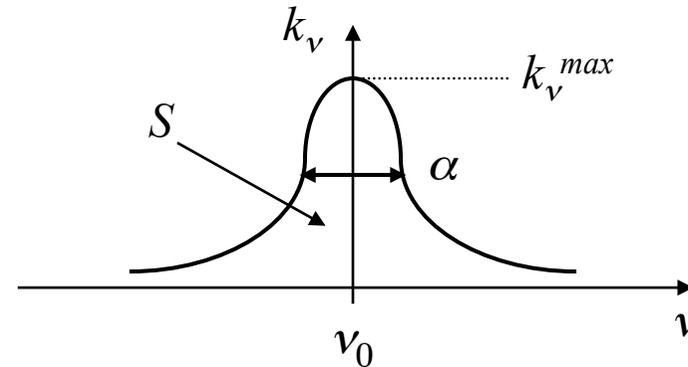
$$S = \int_0^{+\infty} K_\nu d\nu$$

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



$$S_{12}(T) = \frac{8\pi^3}{3hc} \frac{N}{Q_R(T)} \nu_{12} \mu^2 g_1 |\phi_{12}| \frac{1 - \exp\left[-\frac{h\nu_{12}}{kT}\right]}{\exp\left[\frac{E_1}{kT}\right]}$$

$$\frac{S_{12}(T)}{S_{12}(T_0)} = \frac{Q_R(T_0)}{Q_R(T)} \exp\left[-\frac{E_1}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \frac{1 - \exp\left[-\frac{h\nu_{12}}{kT}\right]}{1 - \exp\left[-\frac{h\nu_{12}}{kT_0}\right]}$$



Quelques rappels théoriques



L'équation de transfert radiatif

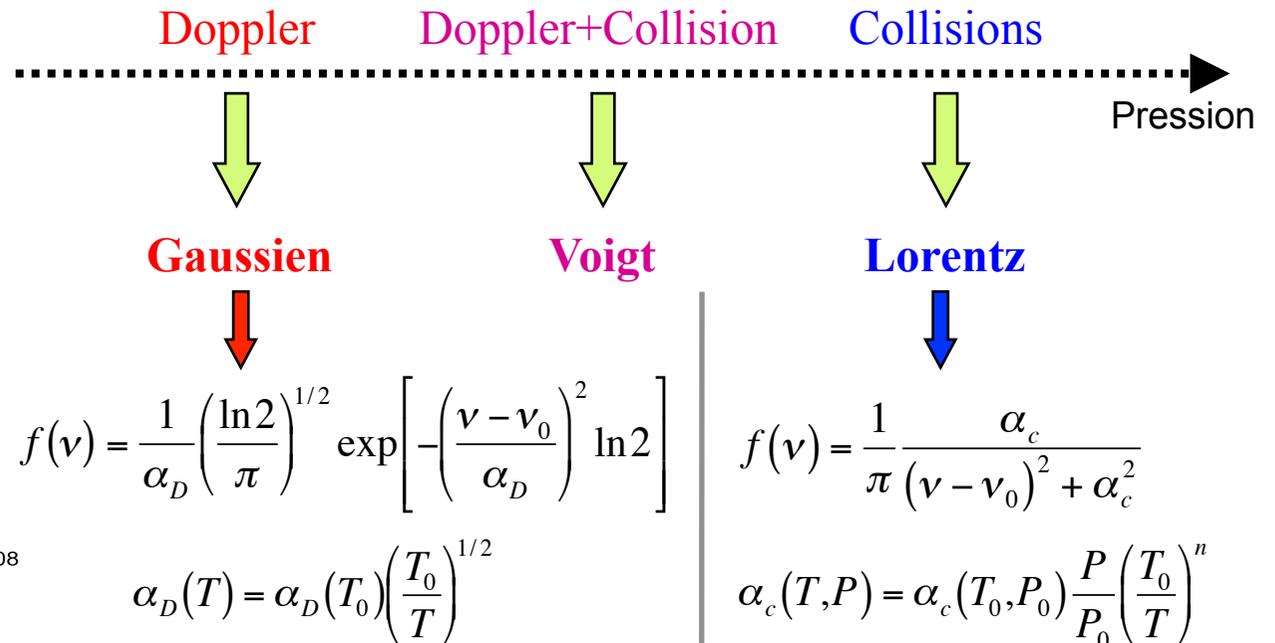
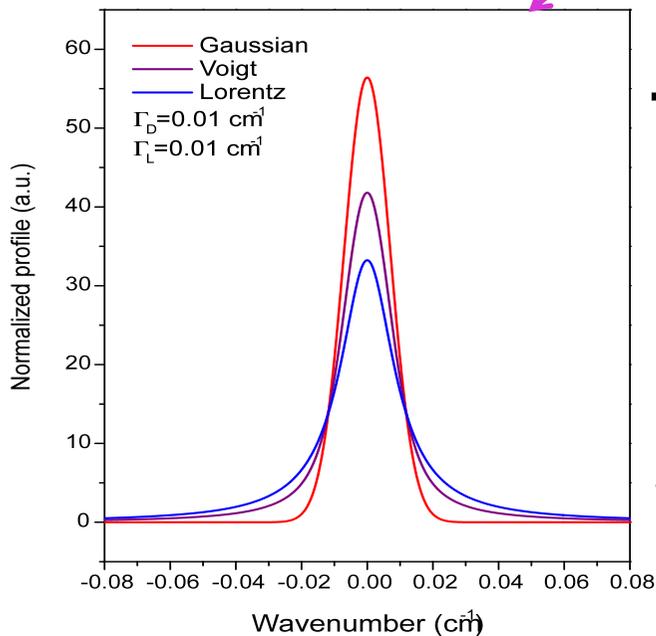
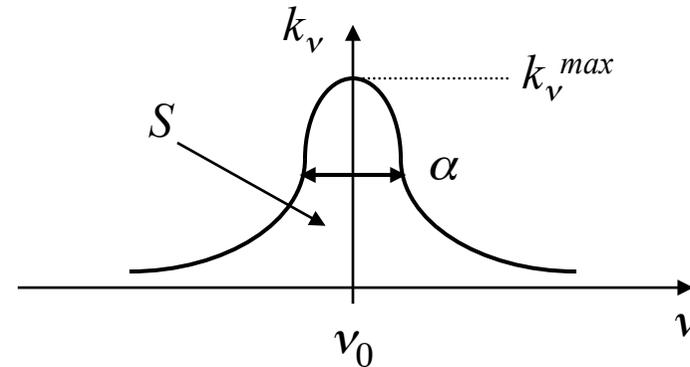
Pour une transition E1 → E2 donnée :

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

intensité intégrée **forme de raie**

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

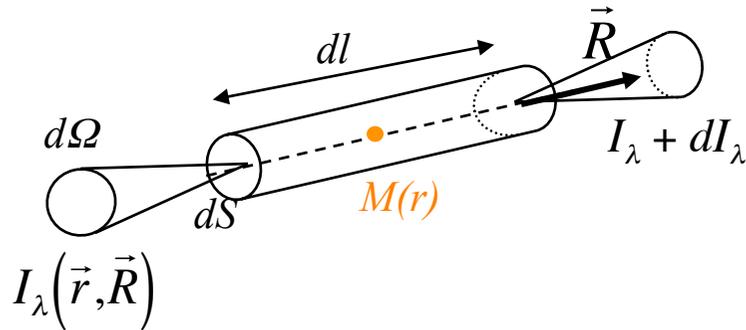
$$\int_0^{+\infty} f(\nu) d\nu = 1$$



Quelques rappels théoriques



Transmittance et équation de transfert radiatif intégrée



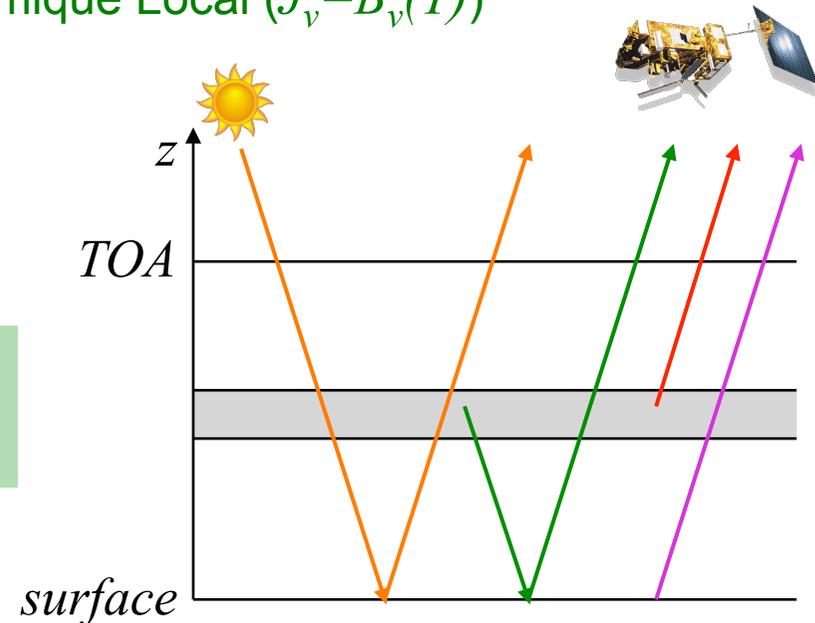
• **Transmittance spectrale :**

$$\mathcal{T}_\nu(s_2, s_1) = \exp \left[- \int_{s_1}^{s_2} K_\nu(s) \rho_a(s) ds \right]$$

$$\text{avec } K_\nu(s) = \sum_{j=1}^N S_j(\nu, s) f_j(\nu, s)$$

• **Résolution de l'ETR avec les hypothèses :** milieu non diffusif, atmosphère plan parallèle homogène et **Equilibre Thermodynamique Local** ($J_\nu = B_\nu(T)$)

$$L_\nu^{sat}(s) = \epsilon_\nu^{surf} B_\nu(T_{surf}) T_\nu(s, 0) + \int_0^s B_\nu(T(s')) \frac{\partial T_\nu(s, s')}{\partial s'} ds' + (1 - \epsilon_\nu) T_\nu(s, 0) \left[\int_\infty^0 B_\nu(T(s')) \frac{\partial T_\nu(\infty, s')}{\partial s'} ds' \right] + J_\nu(\odot) t_\nu(\infty, 0) (1 - \epsilon_\nu) t_\nu(s, 0)$$



Problématiques physiques à considérer



Questions	TRATTORIA 2008	TRATTORIA 2015
1. Paramètres spectroscopiques des raies d'absorption	✓	
Gestion des bases de données.	✓	
Nouveaux paramètres à considérer ?	✓	
Quelle précision ?	✓	
2. Modélisation des raies d'absorption	✓	
Limitation du profil de Voigt	✓	
Profils non-Voigt	✓	
Interférences entre raies (line-mixing)	✓	
Effet Zeeman	✓	
3. Effet bandes larges	✓	
Continuum O ₂ , N ₂	✓	
Continuum H ₂ O	✓	
Sections efficaces d'absorption	✓	
4. Rupture de l'Equilibre Thermodynamique Local	✓	

Problématiques physiques à considérer

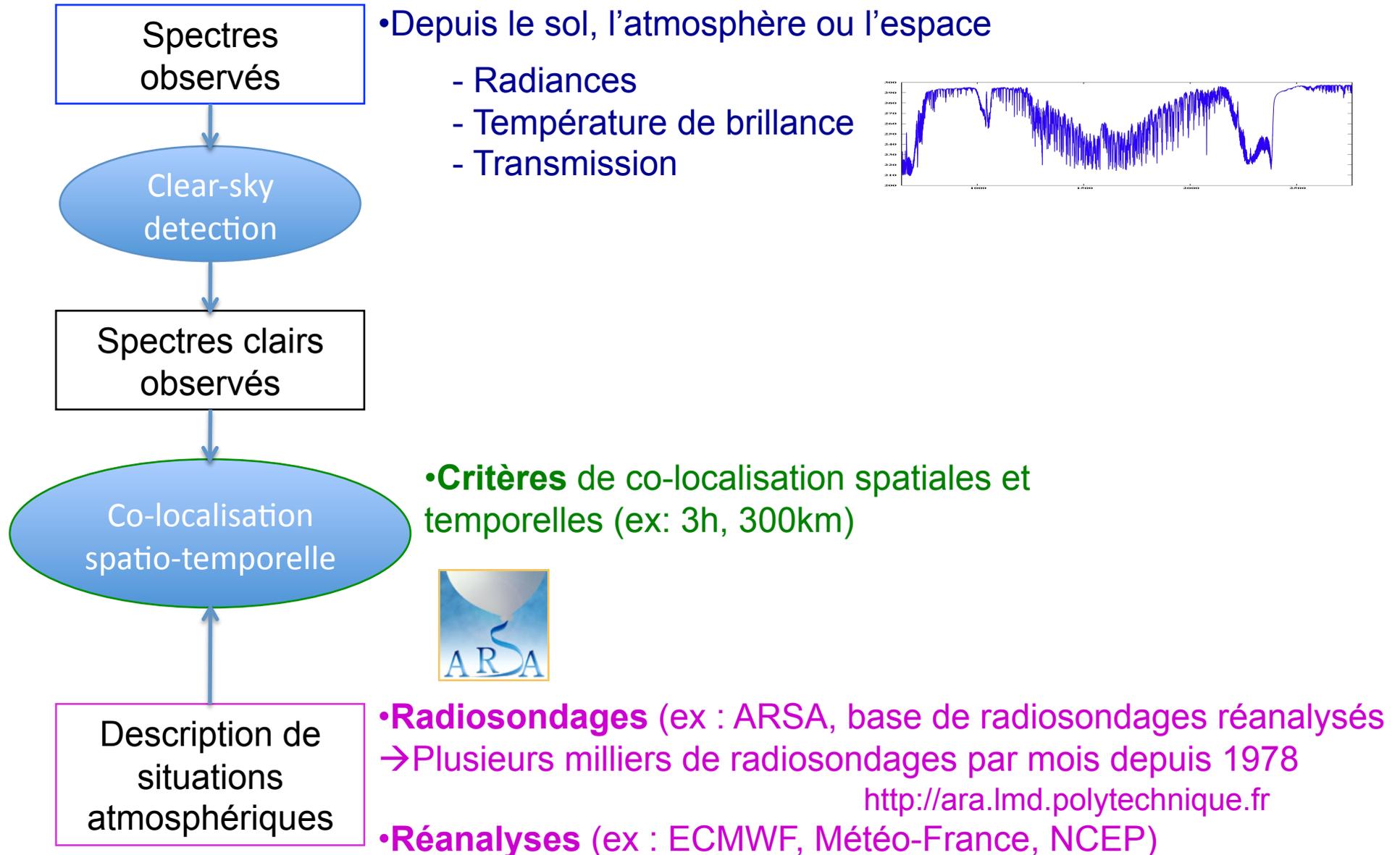


Questions	TRATTORIA 2008	TRATTORIA 2015
1. Paramètres spectroscopiques des raies d'absorption	✓	✓
Gestion des bases de données.	✓	✓
Nouveaux paramètres à considérer ?	✓	✓
Quelle précision ?	✓	✓
2. Modélisation des raies d'absorption	✓	✓
Limitation du profil de Voigt	✓	✓
Profils non-Voigt	✓	✓
Interférences entre raies (line-mixing)	✓	✓
Effet Zeeman	✓	✓
3. Effet bandes larges	✓	✓
Continuum O ₂ , N ₂	✓	✓
Continuum H ₂ O	✓	✓
Sections efficaces d'absorption	✓	✓
4. Rupture de l'Equilibre Thermodynamique Local	✓	✓

Méthodologie d'évaluation du TR/spectro



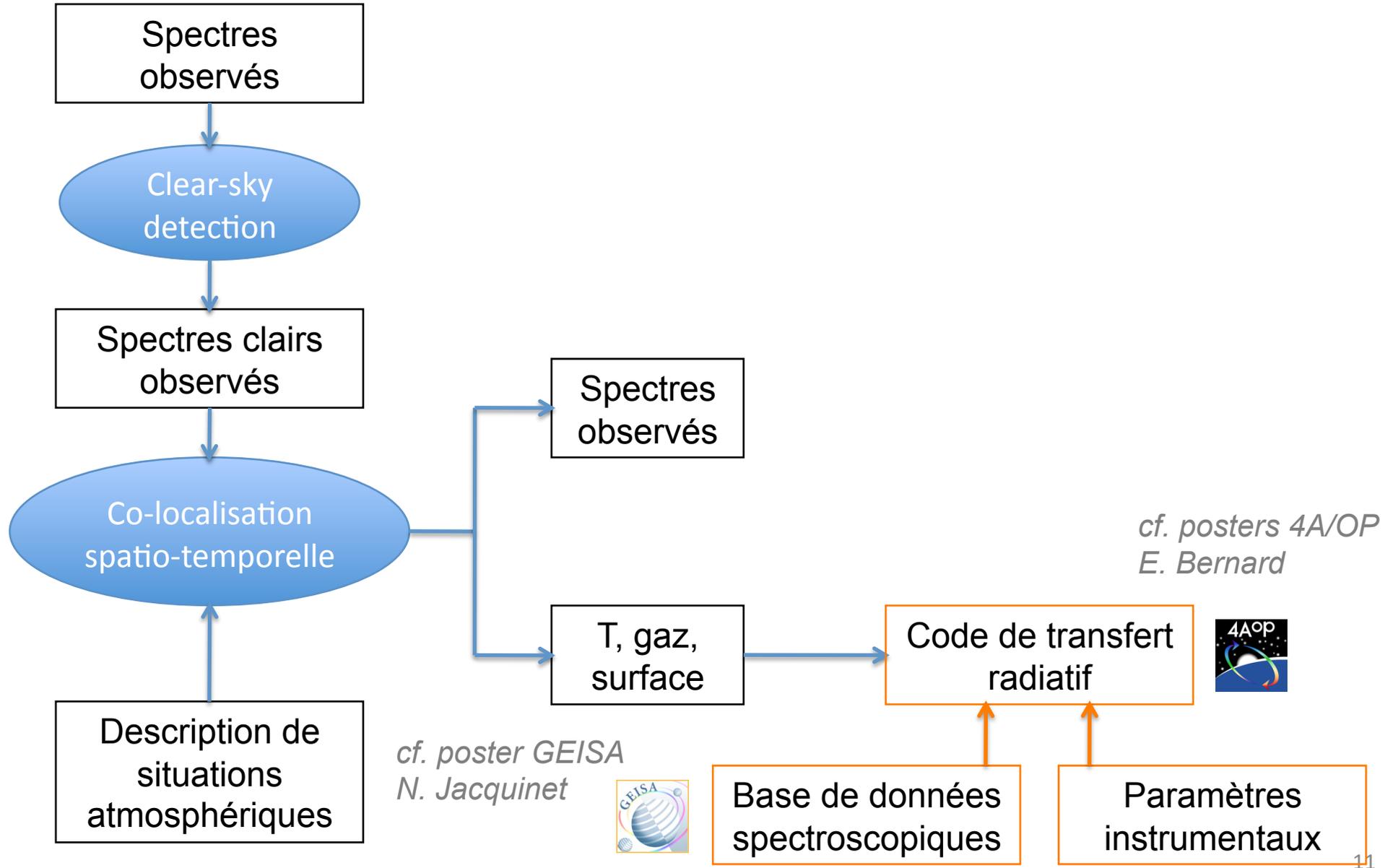
Utilisation de la chaîne de cal/val du LMD



Méthodologie d'évaluation du TR/spectro



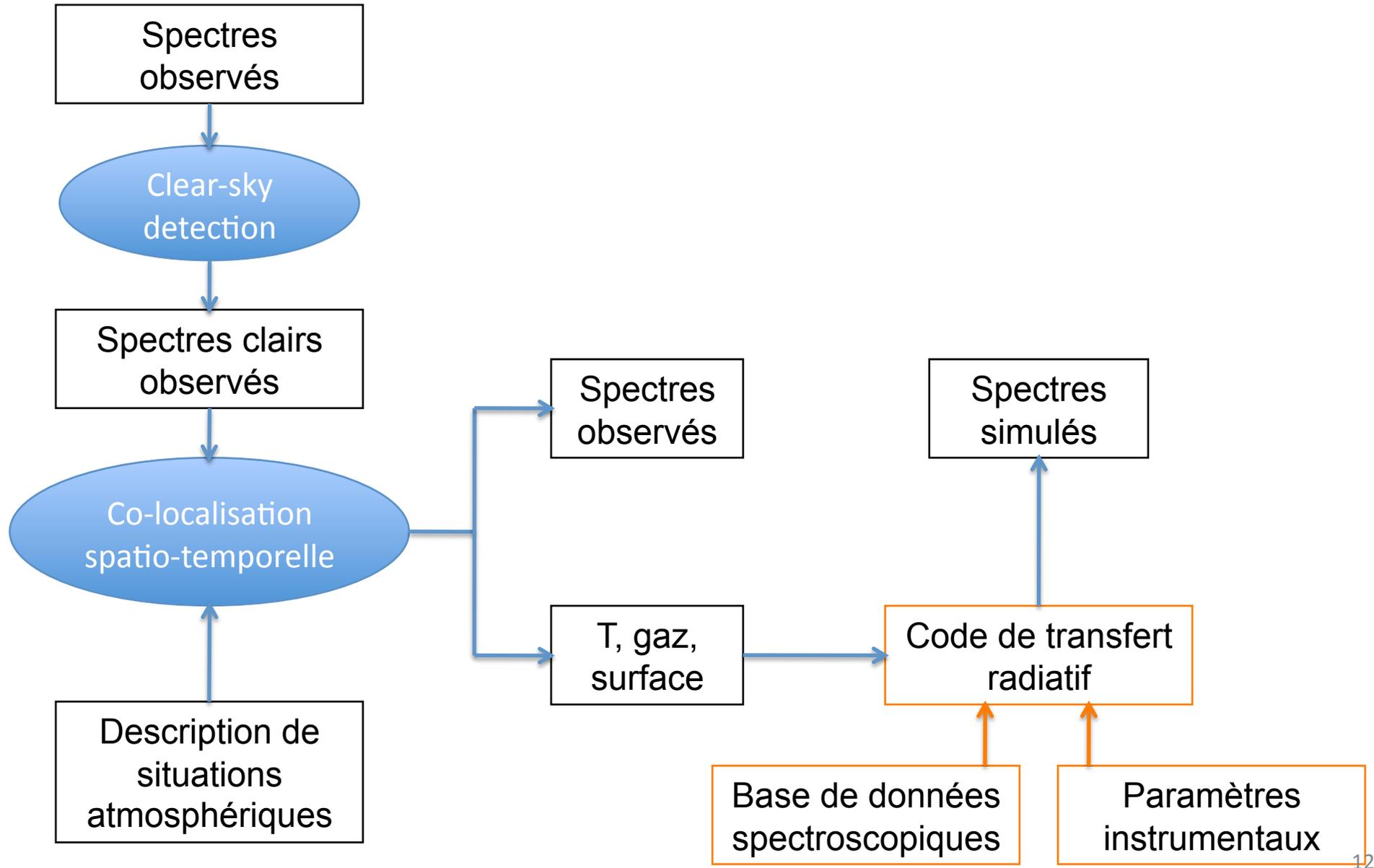
Utilisation de la chaîne de cal/val du LMD



Méthodologie d'évaluation du TR/spectro



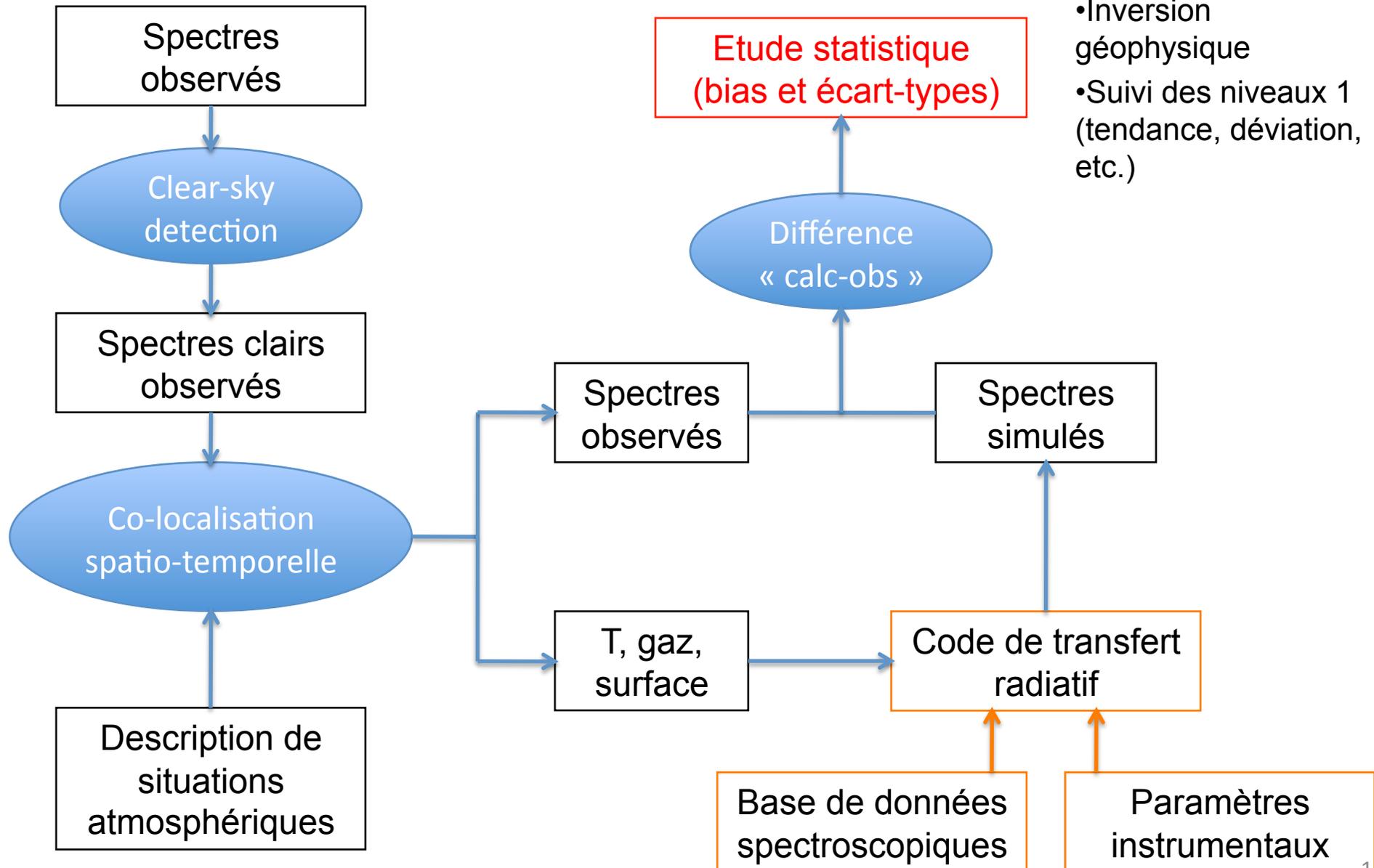
Utilisation de la chaîne de cal/val du LMD



Méthodologie d'évaluation du TR/spectro



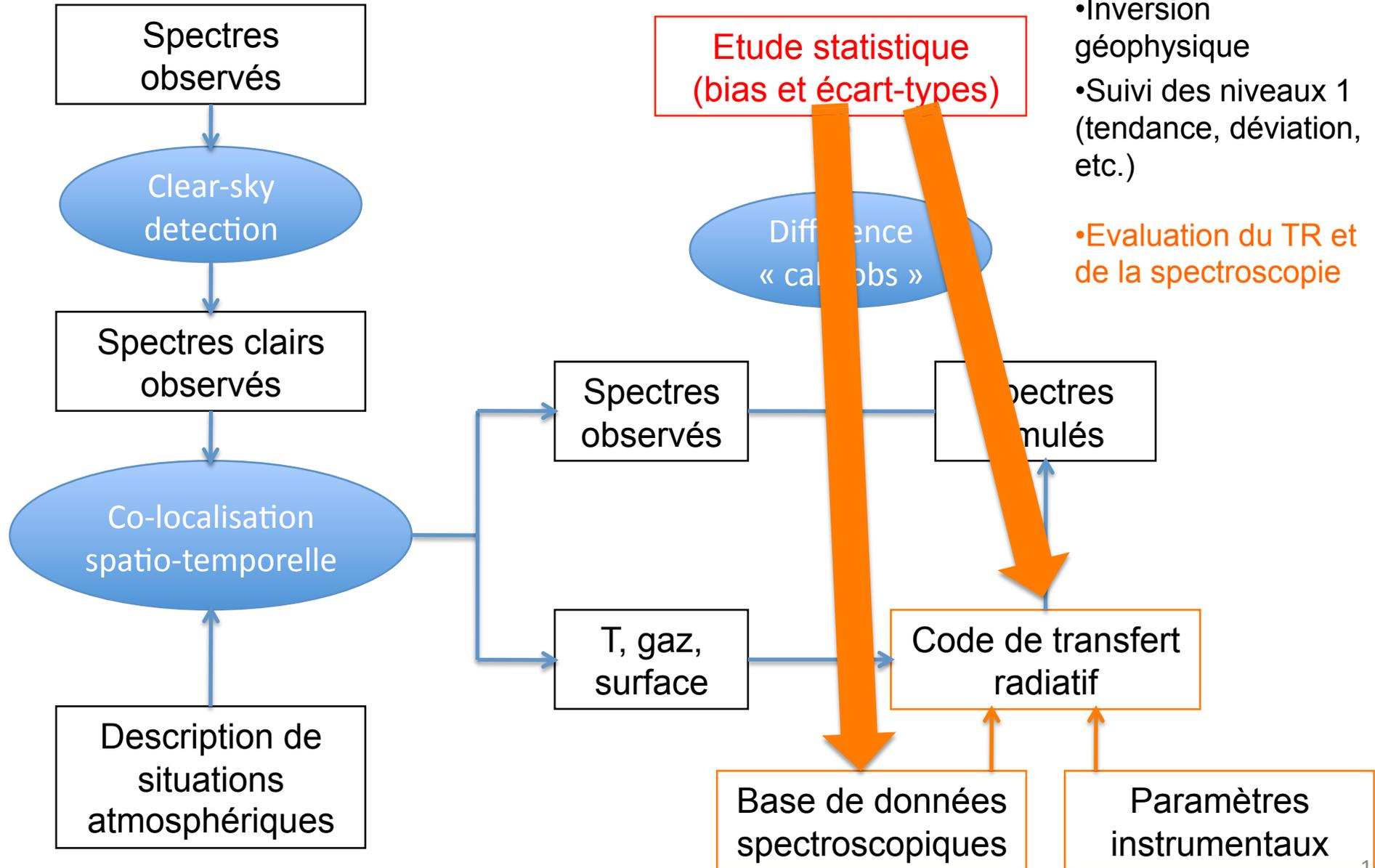
Utilisation de la chaîne de cal/val du LMD



Méthodologie d'évaluation du TR/spectro



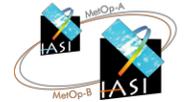
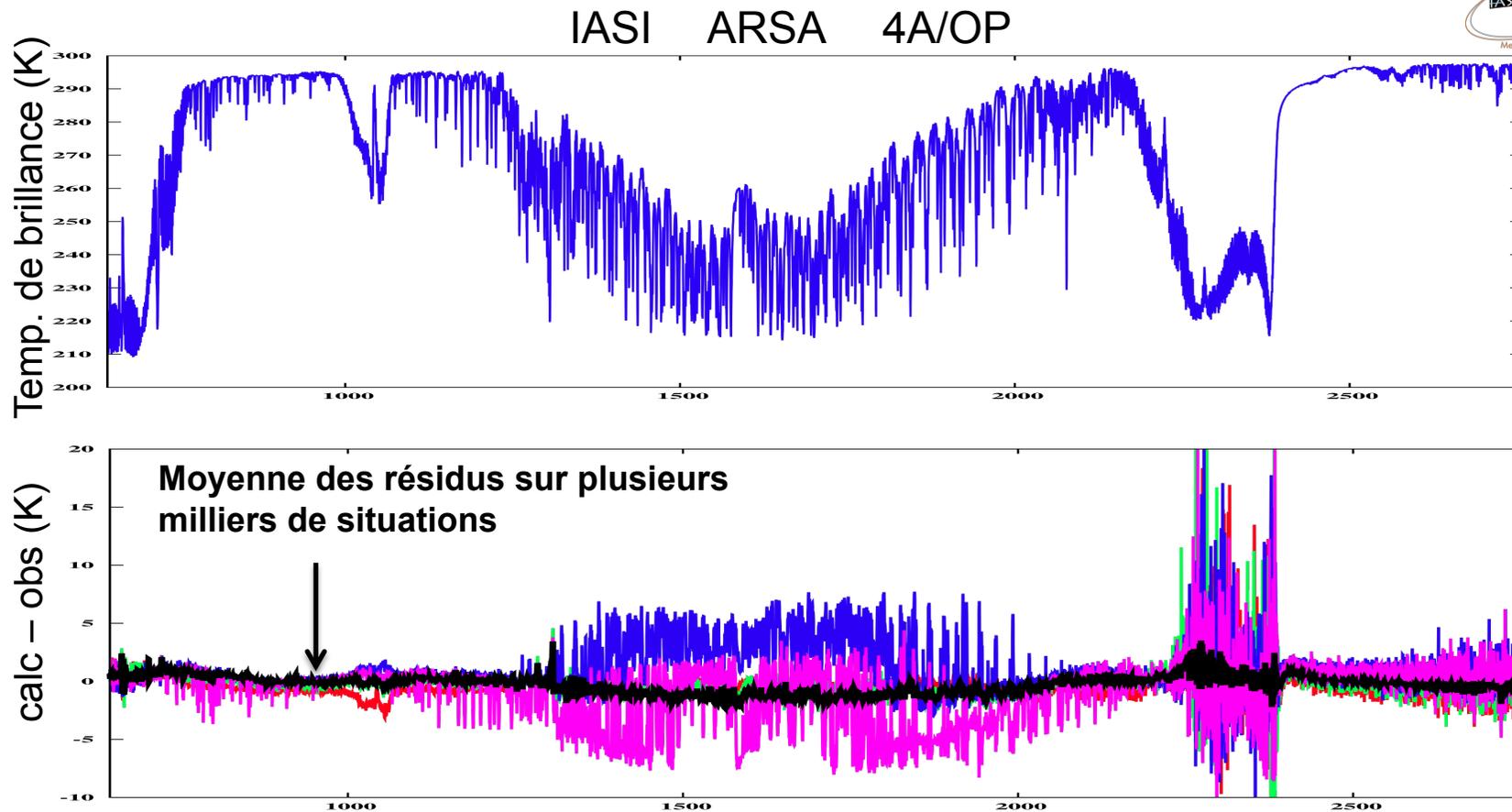
Utilisation de la chaîne de cal/val du LMD



Méthodologie d'évaluation du TR/spectro



Analyse statistique des résidus « calc - obs »

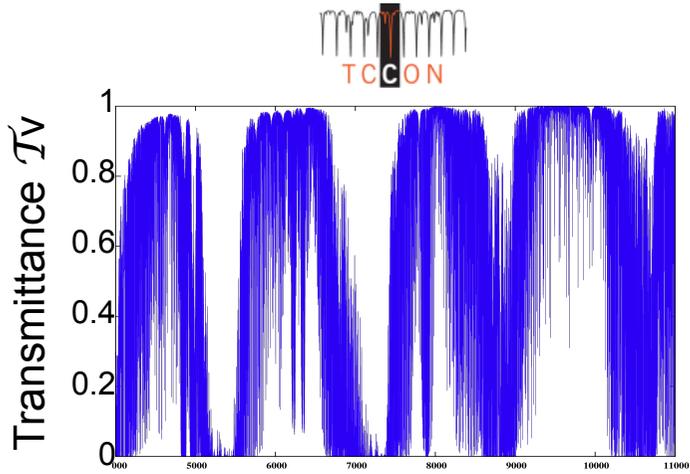


Les statistiques sur plusieurs milliers de colocations radiosondages/satellites permettent de s'affranchir des bruits (instruments, géo-localisation) et de faire ressortir des signatures spectrales très fines.

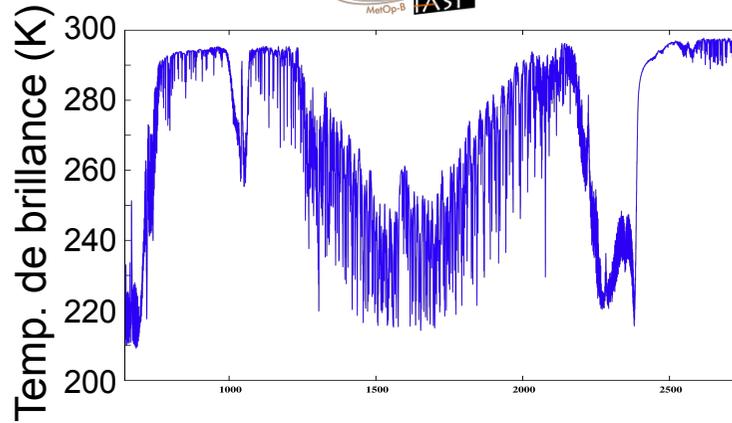
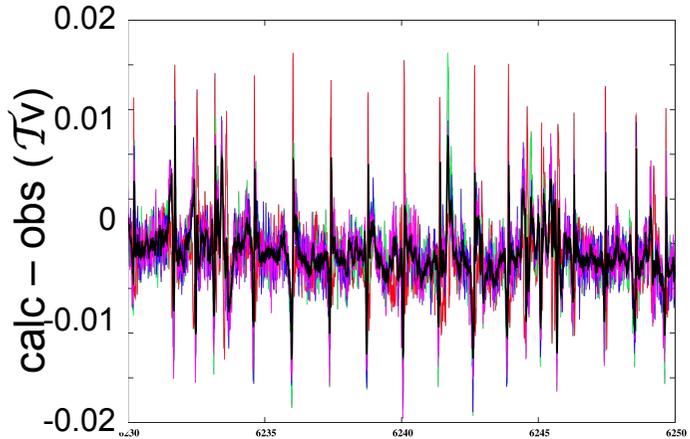
Méthodologie d'évaluation du TR/spectro



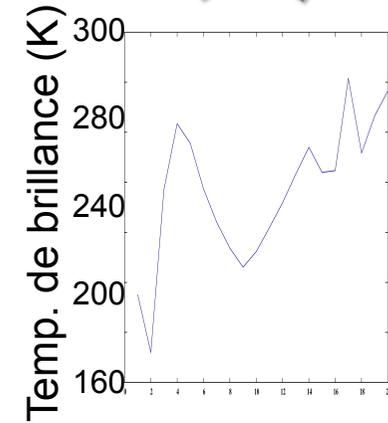
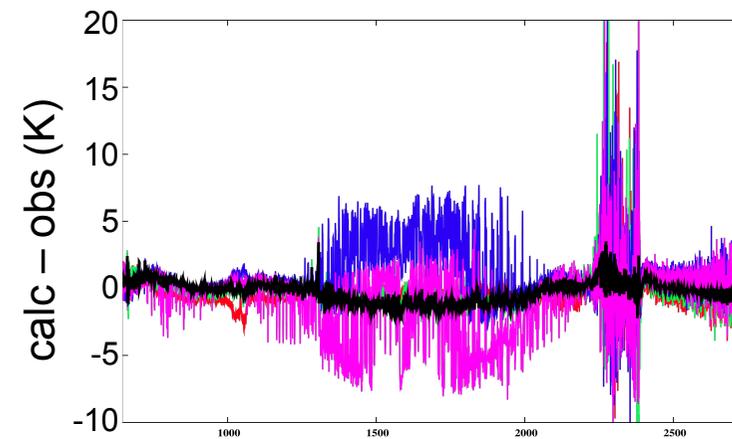
Analyse statistique des résidus « calc - obs » du SWIR aux MO



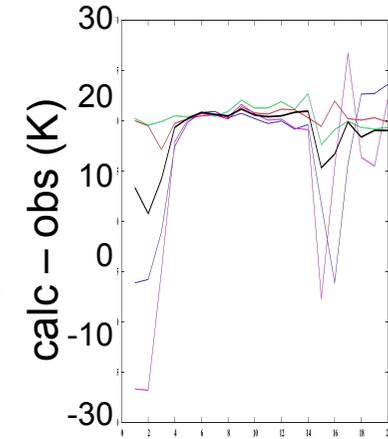
TCCON (Park Falls)
NCEP + 4A/OP-SWIR



IASI
ARSA + 4A/OP



AMSU/MHS
ARSA + STRANSAC



1. Les paramètres spectroscopiques des raies d'absorption

1.1. Les bases de données

1.2. Les mises à jour

1.3. Les isotopologues

1.4. Précision des paramètres

Les paramètres spectroscopiques

Les deux principales bases de données spectroscopiques utilisées en Observation de la Terre



HITRAN 2012	GEISA 2014
https://www.cfa.harvard.edu/hitran/	http://www.pole-ether.fr/geisa/
Paramètres spectroscopiques	Paramètres spectroscopiques
Sections efficaces d'absorption	Sections efficaces d'absorption
-	Caractéristiques des aérosols
HITEMP (haute température)	-

Les paramètres spectroscopiques



Contenu des bases de données spectroscopiques

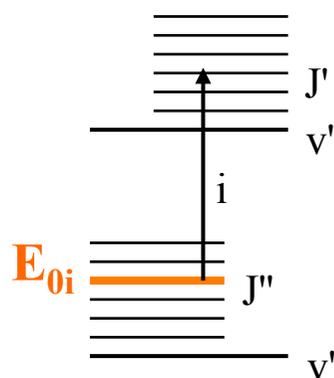
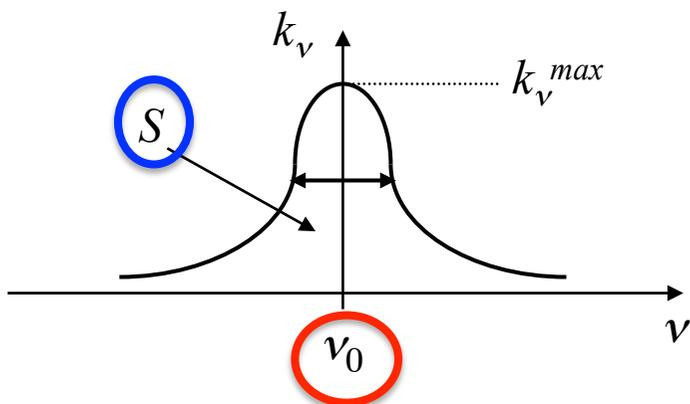
6029.107870	1.4250D-23	0.0600	62.9000	0.85	311	6 AC3	-0.012058
6029.082800	1.1090D-23	0.0655	62.8798	0.85	311	6 L08	-0.011060
6029.107870	1.4250D-23	0.0657	62.8811	0.73	311	6 H12	-0.012100

Les paramètres spectroscopiques



Contenu des bases de données spectroscopiques

Fréquence centrale	Intensité	Largeur mi-hauteur	Energie niveau de base	n	isotopes	Origines des données	P shift
6029.107870	1.4250D-23	0.0600	62.9000	0.85 311	CH ₄	6 AC3	-0.012058
6029.082800	1.1090D-23	0.0655	62.8798	0.85 311		6 L08	-0.011060
6029.107870	1.4250D-23	0.0657	62.8811	0.73 311		6 H12	-0.012100



$$f(\nu) = \frac{1}{\pi} \frac{\alpha_c}{\Delta\nu^2 + \alpha_c^2}$$

$$\Delta\nu = \nu - \left(\nu_0 - \delta_0 \frac{P(s')}{P_0} \right)$$

$$\alpha_c(T, P) = \alpha_c(T_0, P_0) \frac{P}{P_0} \left(\frac{T_0}{T} \right)^n$$

Mises à jour récurrentes des bases de données

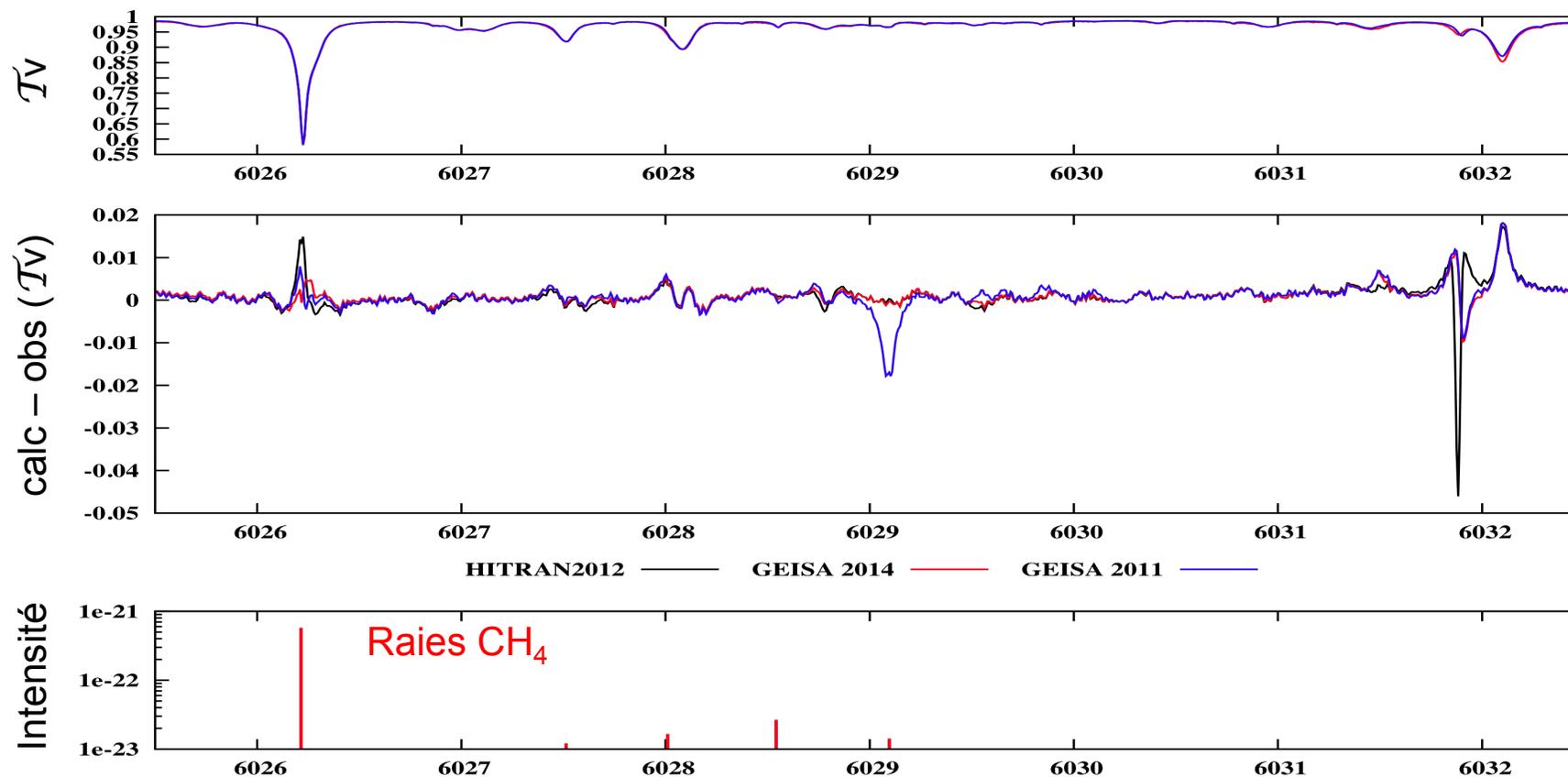
→ Quel choix pour les paramètres ?

Les paramètres spectroscopiques



Impact de mises à jour et comparaison des bases

Absorption du CH₄ et de H₂O dans le SWIR (1.65 μm)



Comparaison des résidus obtenus avec **GEISA2011**, **GEISA2014** et **HITRAN2012**.

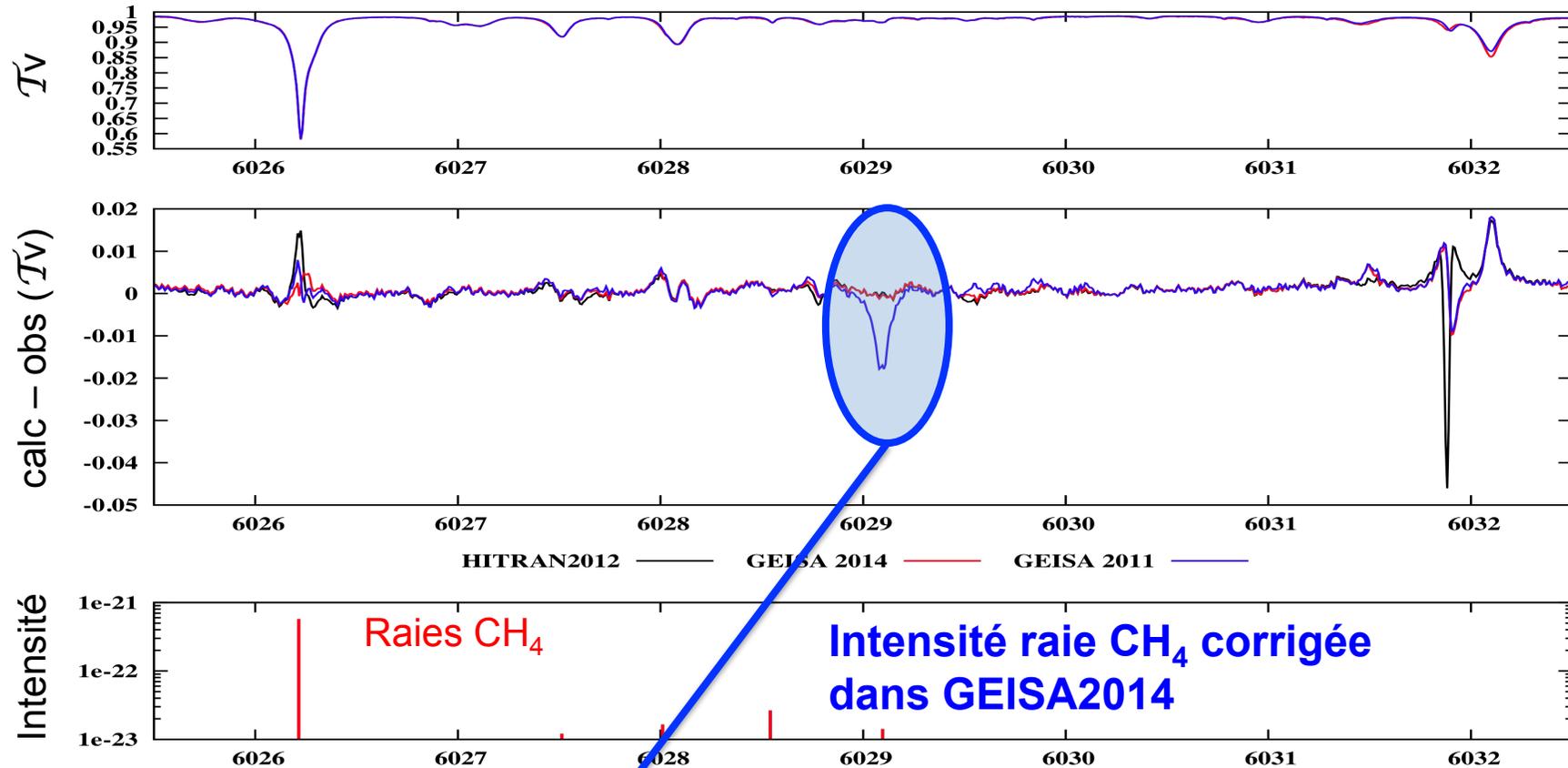
→ Identification des paramètres responsables des résidus élevés.

Les paramètres spectroscopiques



Impact de mises à jour et comparaison des bases

Absorption du CH₄ et de H₂O dans le SWIR (1.65 μm)



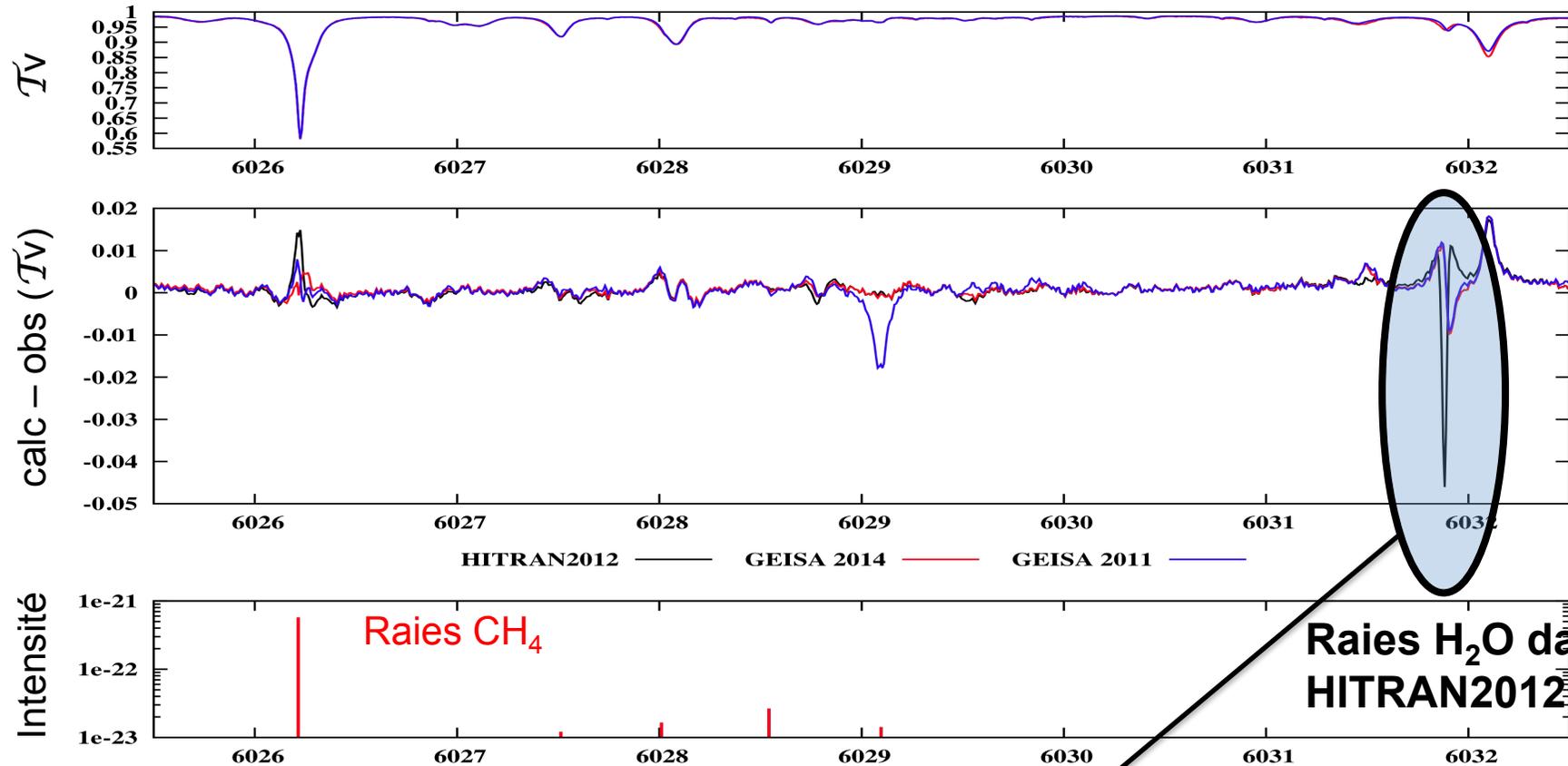
	Position	Intensité	Largeur	E0	n				P shift
GEISA2011	6029.082800	1.1090D-23	0.0655	62.8798	0.85	311	6	L08	-0.011060
GEISA2014	6029.107870	1.4250D-23	0.0600	62.9000	0.85	311	6	AC3	-0.012058
HITRAN2012	6029.107870	1.4250D-23	0.0657	62.8811	0.73	311	6	H12	-0.012100

Les paramètres spectroscopiques



Impact de mises à jour et comparaison des bases

Absorption du CH₄ et de H₂O dans le SWIR (1.65 μm)



Raies H₂O dans HITRAN2012

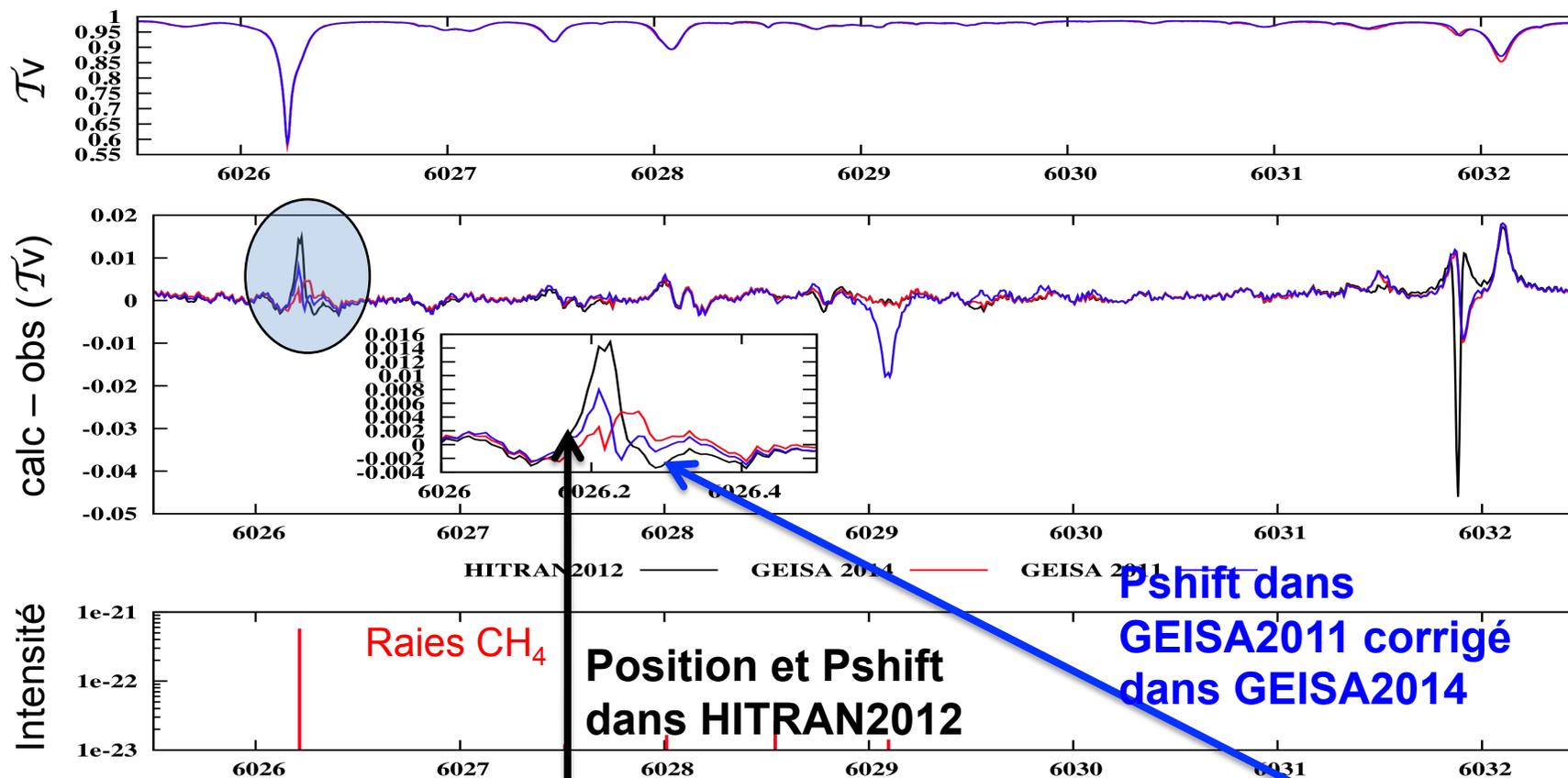
	Position	Intensité	Largeur	E0	n				P shift
GEISA2011	6031.899390	7.3020D-26	0.0300	2042.31	0.36	161	1	T03	-0.000000
GEISA2014	6031.899400	7.1300D-26	0.0380	2042.31	0.41	161	1	L13	-0.011060
HITRAN2012	6031.899390	7.3020D-26	0.0078	2042.31	0.36	161	1	H12	-0.022000

Les paramètres spectroscopiques



Impact de mises à jour et comparaison des bases

Absorption du CH₄ et de H₂O dans le SWIR (1.65 μm)



Position et Pshift dans HITRAN2012

Pshift dans GEISA2011 corrigé dans GEISA2014

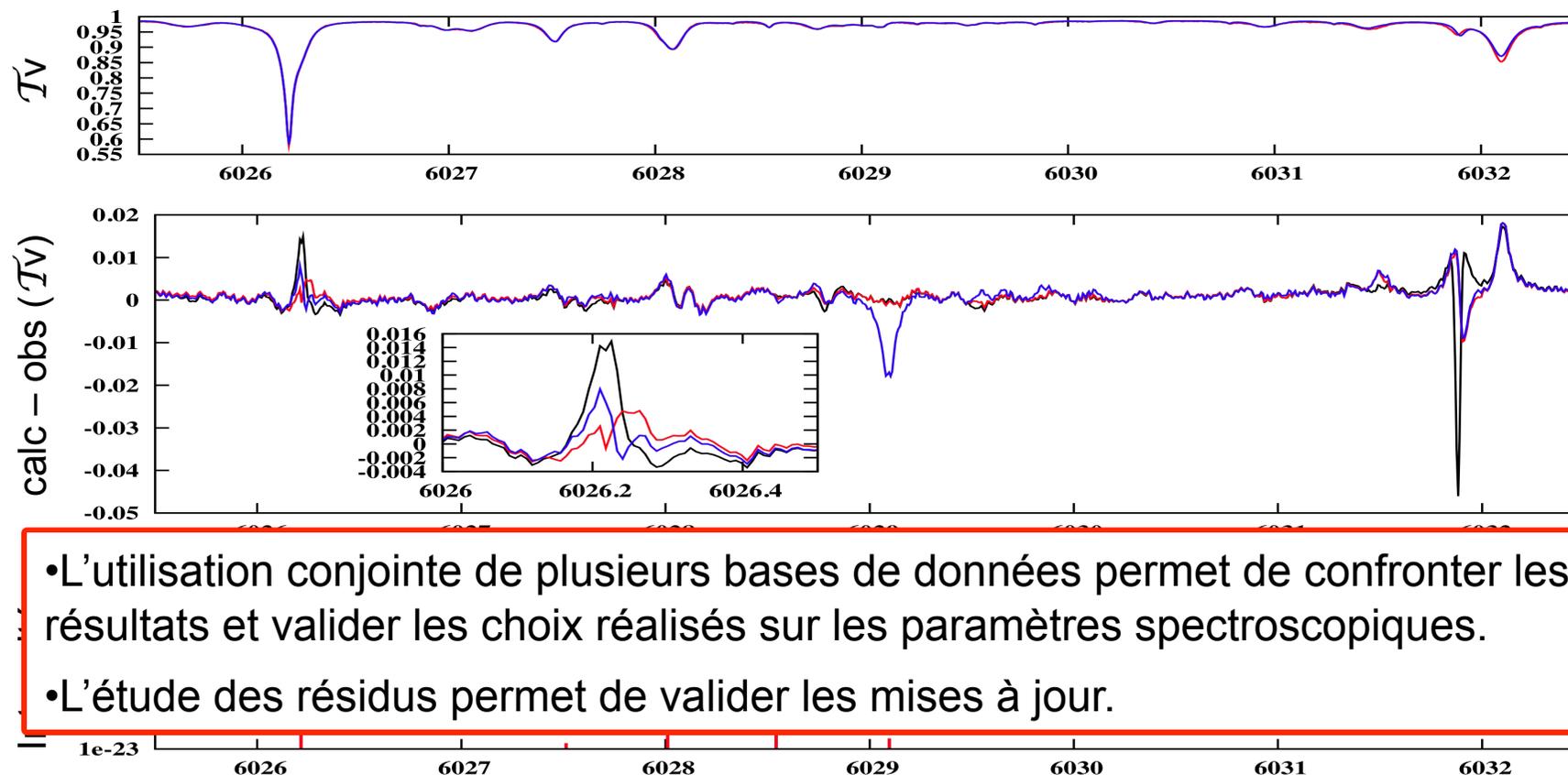
	Position	Intensité	Largeur	E0	n				P shift
GEISA2011	6026.227400	5.7210D-22	0.0634	10.4816	0.85	211	6	L08	-0.01113
GEISA2014	6026.227100	5.7680D-22	0.0650	10.4817	0.68	211	6	AC3	-0.012052
HITRAN2012	6026.226861	5.7680D-22	0.0682	10.4817	0.85	211	6	H12	-0.008500

Les paramètres spectroscopiques



Impact de mises à jour et comparaison des bases

Absorption du CH₄ et de H₂O dans le SWIR (1.65 μm)



Les paramètres spectroscopiques

Une spectroscopie « bien connue » : exemple des micro-ondes

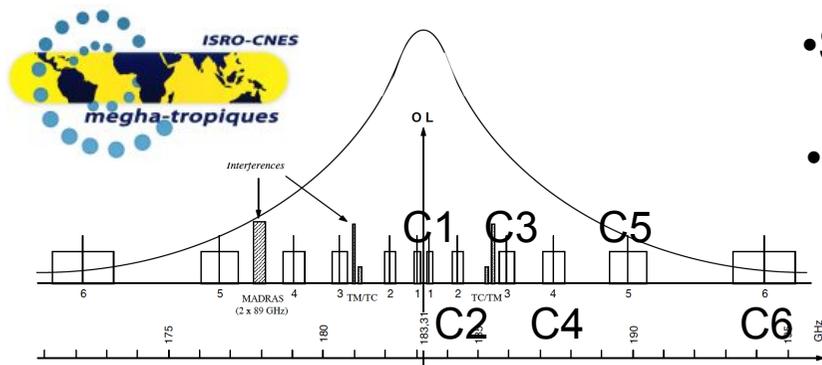


Figure 3.2-1: Repartition of water vapour channels

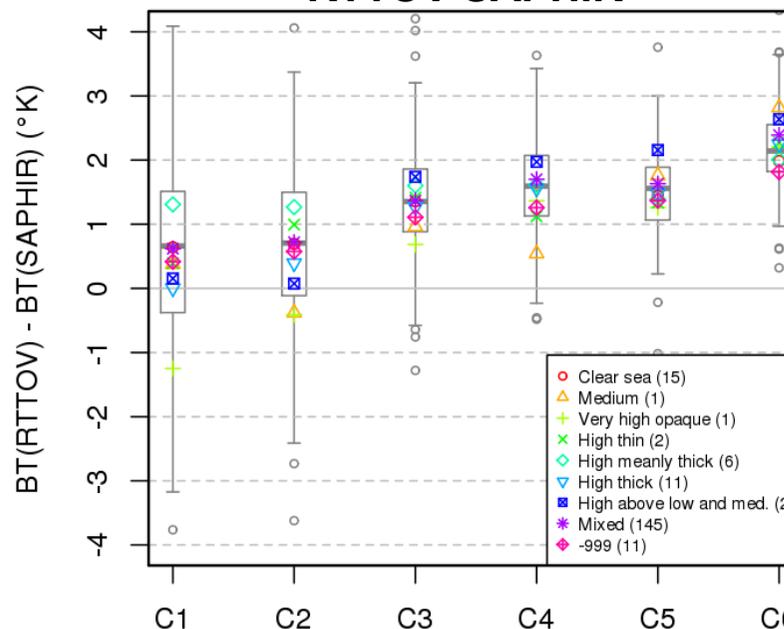
- Spectroscopie MO basée sur Liebe-93
- SAPHIR: 6 canaux sur la raie H₂O à 183,31 GHz

Mise en évidence d'un biais (calc-obs) présent sur tous les sondeurs MO (AMSU-B, MHS, ATMS).

Origine : paramètres spectro (largeur à mi-hauteur, intensité, continuum)?

Tests en cours au JPL, UK MetOffice, LATMOS et LMD

CINDY/DYNAMO Campaign RTTOV SAPHIR

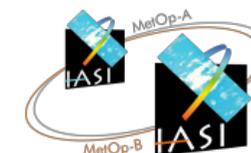
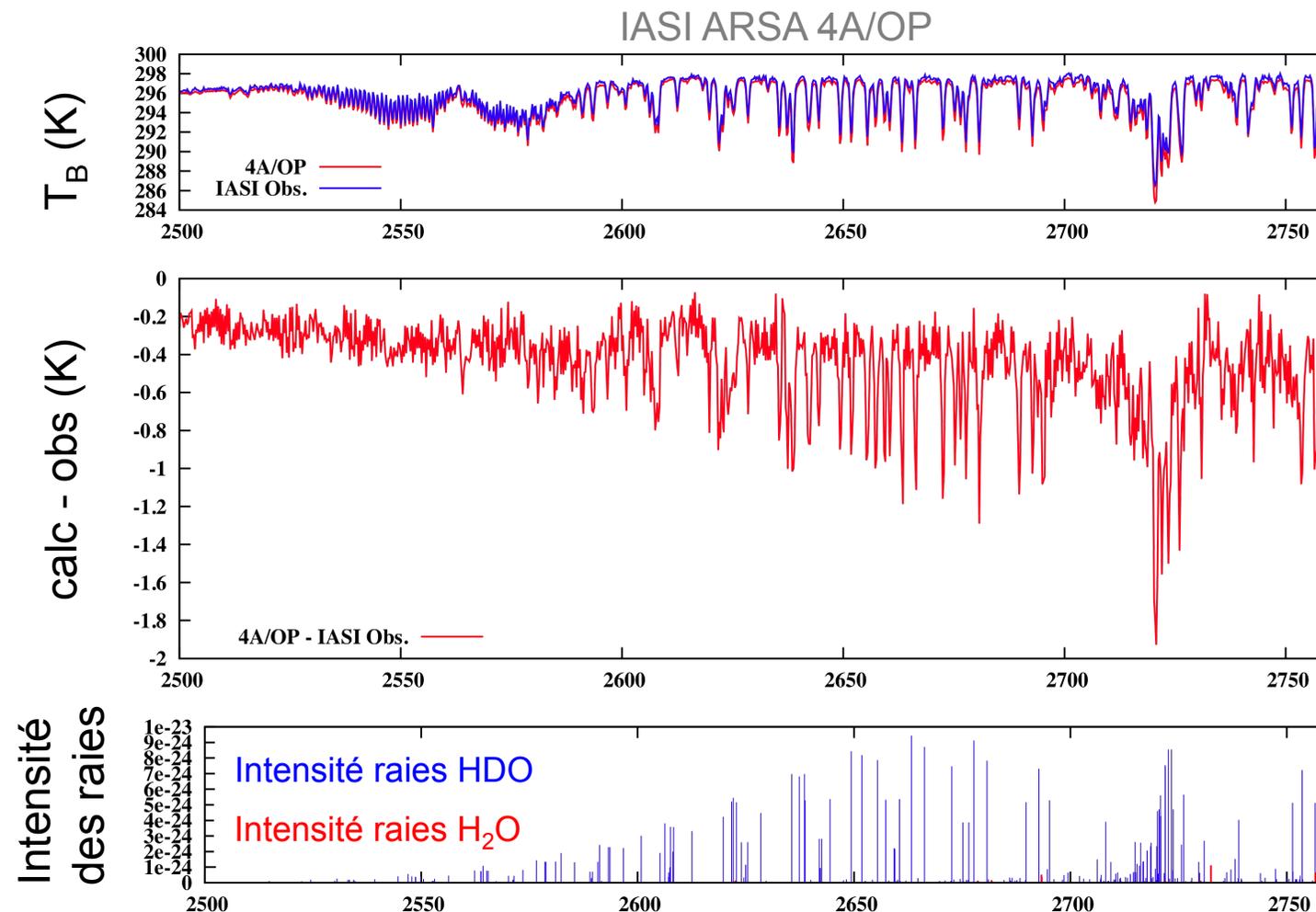


SAPHIR Channels *Clain et al. (2015)*

Les paramètres spectroscopiques



Les isotopologues : H₂O vs. HDO à 4 μm



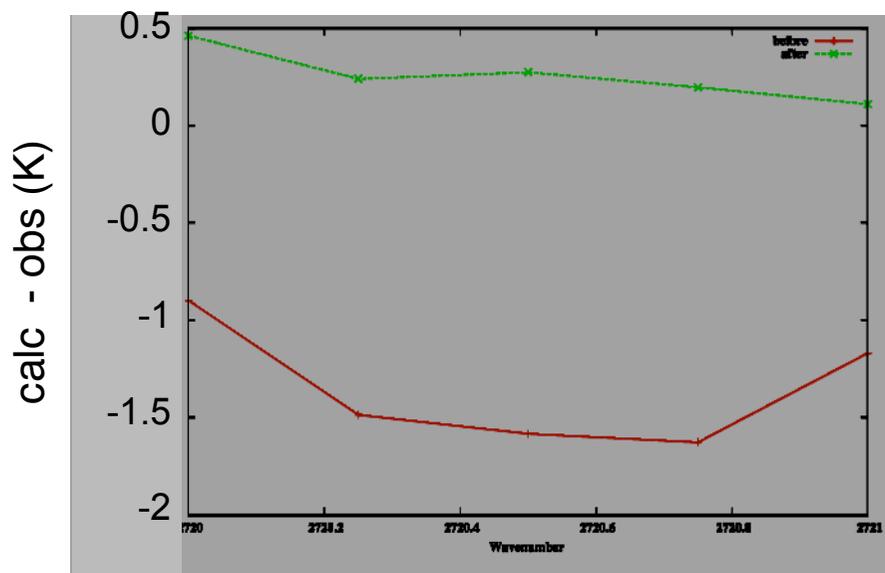
- H₂O et HDO sont désormais différenciés dans GEISA.
- Pas encore dans 4A/OP (en cours)

Les paramètres spectroscopiques



Les isotopologues : H₂O vs. HDO à 4 μm

Substitution du profil de H₂O
par le profil HDO
en entrée de 4A/OP

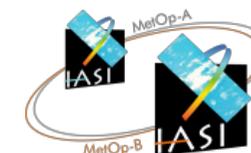
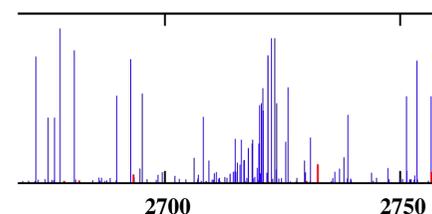
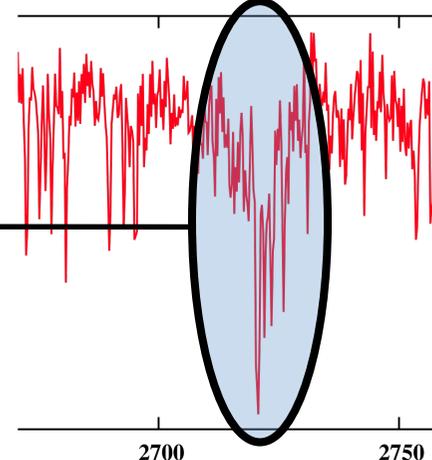
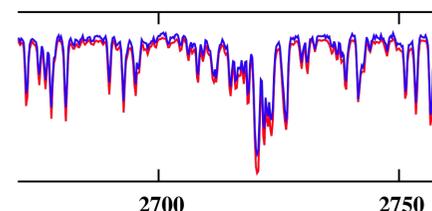


→ « Correction » du résidu

$$\delta D = 1000 \times ([HD^{(16)}O]/[H_2^{(16)}O] / SMOW - 1)$$

with Standard Mean Ocean Water = 3.1152×10^{-4}

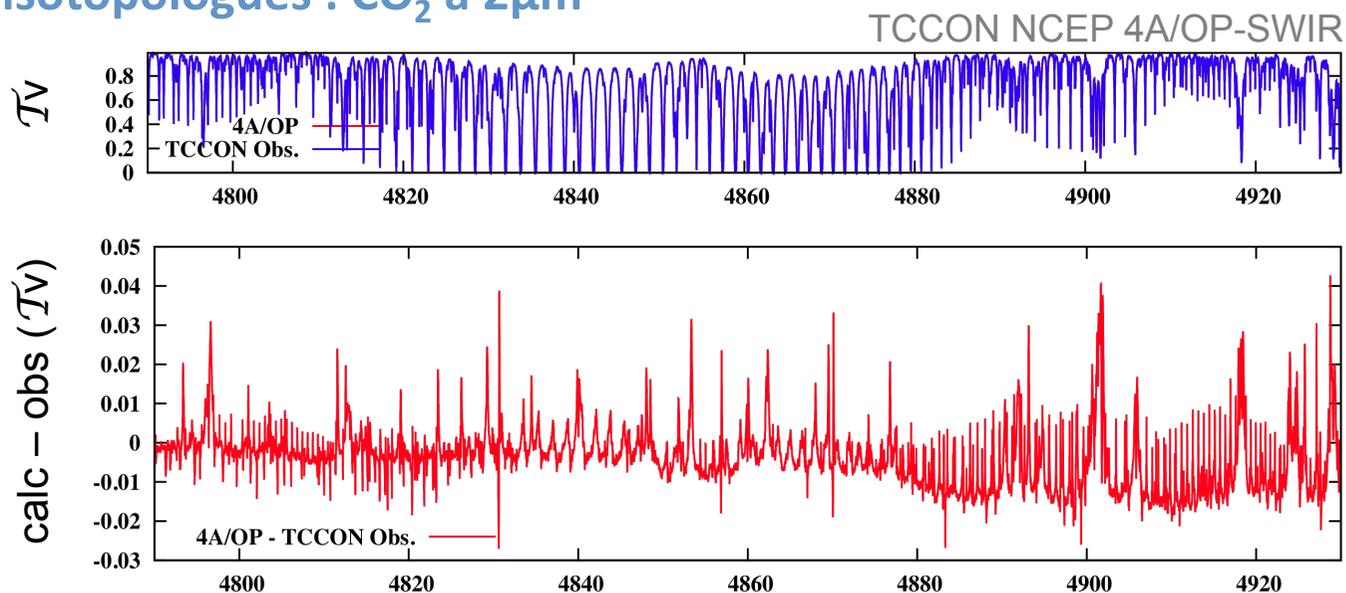
Scott et al., ITSC, 2012



Les paramètres spectroscopiques



Les isotopologues : CO₂ à 2μm



Pics: signatures de raies H₂O.

Des variations non reliées à H₂O apparaissent vers 4810 et 4900 cm^{-1}

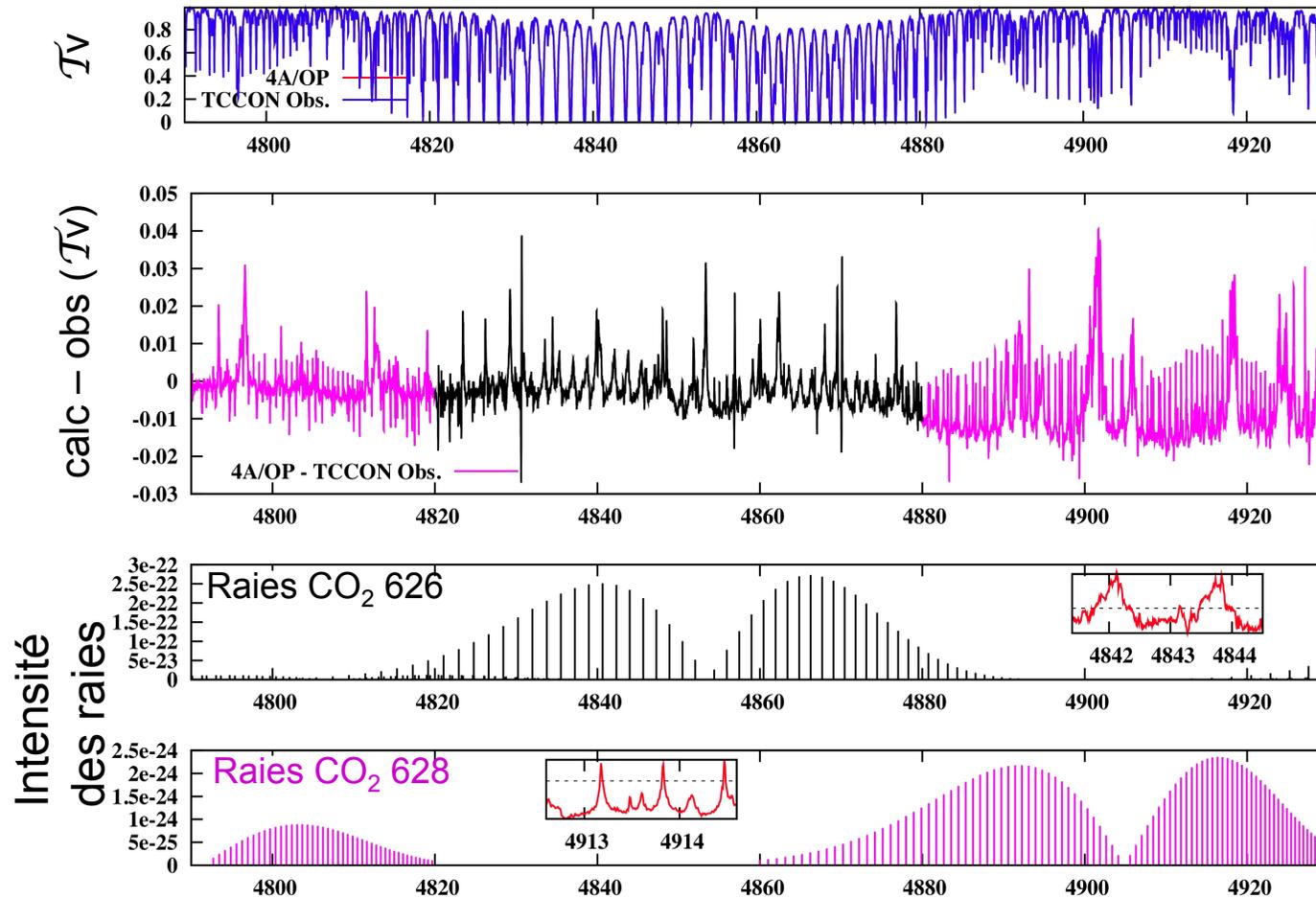
→ Signature des isotopologues de CO₂ ?

Les paramètres spectroscopiques



Les isotopologues : CO₂ à 2 μm

TCCON NCEP 4A/OP-SWIR



→ Correlation entre les résidus et les isotopologues du CO₂ à 2 μm.

- (i) Nécessité de différencier les isotopologues du CO₂ ?
- (ii) Etude des résidus à mener dans le TIR pour vérifier la corrélation résidus/isotopologues du CO₂.

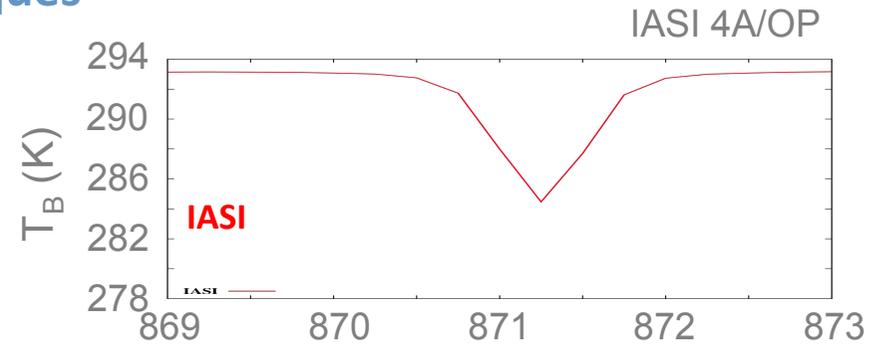
Les paramètres spectroscopiques



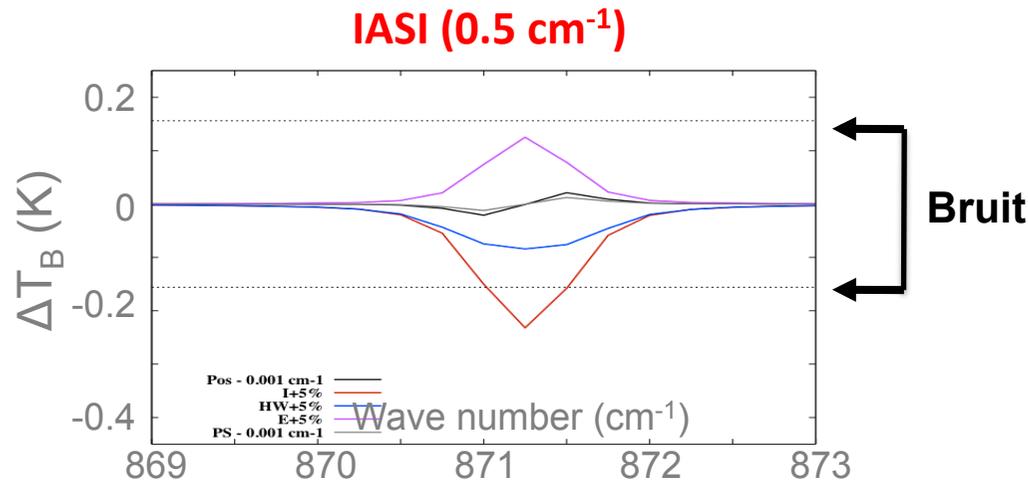
Précision des paramètres spectroscopiques

Cas d'une raie isolée de vapeur d'eau

→ Etude de sensibilité aux paramètres spectroscopiques (GEISA) par perturbation de 5 paramètres :



+5% intensité | **+5% E0** | **+5% largeur mi-hauteur** | **+0.001 cm⁻¹ P shift** | **+0.001 cm⁻¹ position**



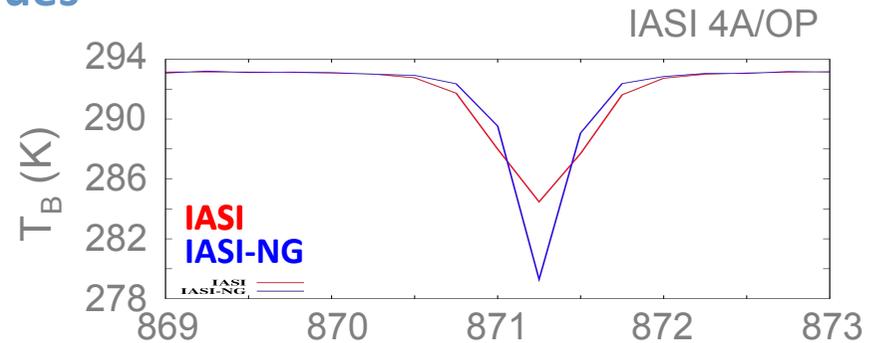
Les paramètres spectroscopiques



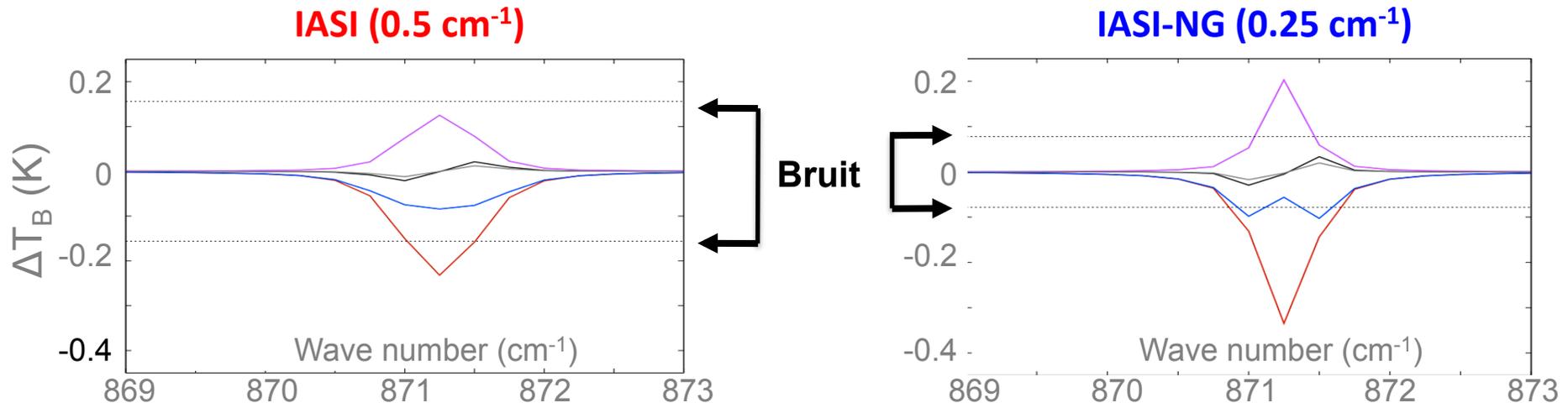
Précision des paramètres spectroscopiques

Cas d'une raie isolée de vapeur d'eau

→ Etude de sensibilité aux paramètres spectroscopiques (GEISA) par perturbation de 5 paramètres :



+5% intensité | **+5% E0** | **+5% largeur mi-hauteur** | **+0.001 cm⁻¹ P shift** | **+0.001 cm⁻¹ position**



- Le besoin en précision augmente avec l'amélioration des caractéristiques spectrales et radiométriques des instruments.
- Identification des paramètres à mieux connaître pour satisfaire les besoins mission.

Les paramètres spectroscopiques



Des besoins différents suivant les communautés

Au-delà des grandes bases de données GEISA et HITRAN, d'autres bases de données existent :

- Lien avec un instrument.
- Besoin de très grandes précisions sur peu de paramètres.

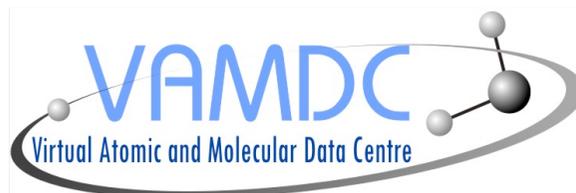
ex : intensité, position et identification des raies pour l'astronomie.

→ Consortium VAMDC : <http://www.vamdc.org/>



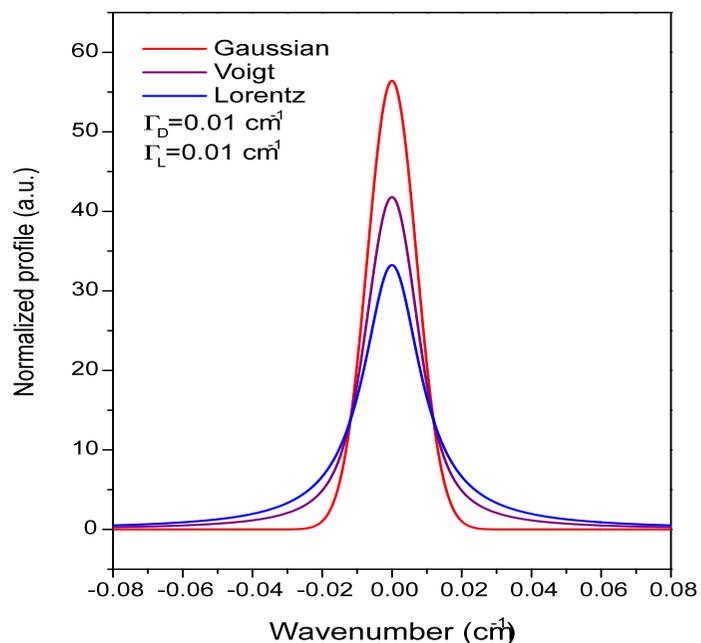
24 partenaires internationaux
33 bases de données.

→ possibilité d'extraire une sélection de données issues de plusieurs bases.



2. Modélisation des raies

To use Voigt or not to use Voigt, that is the question...



2.1. Raies isolées

2.2. Raies non isolées

2.3. Effet Zeeman

Gaussien

Voigt

Lorentz



Doppler

Doppler+Collision

Collisions

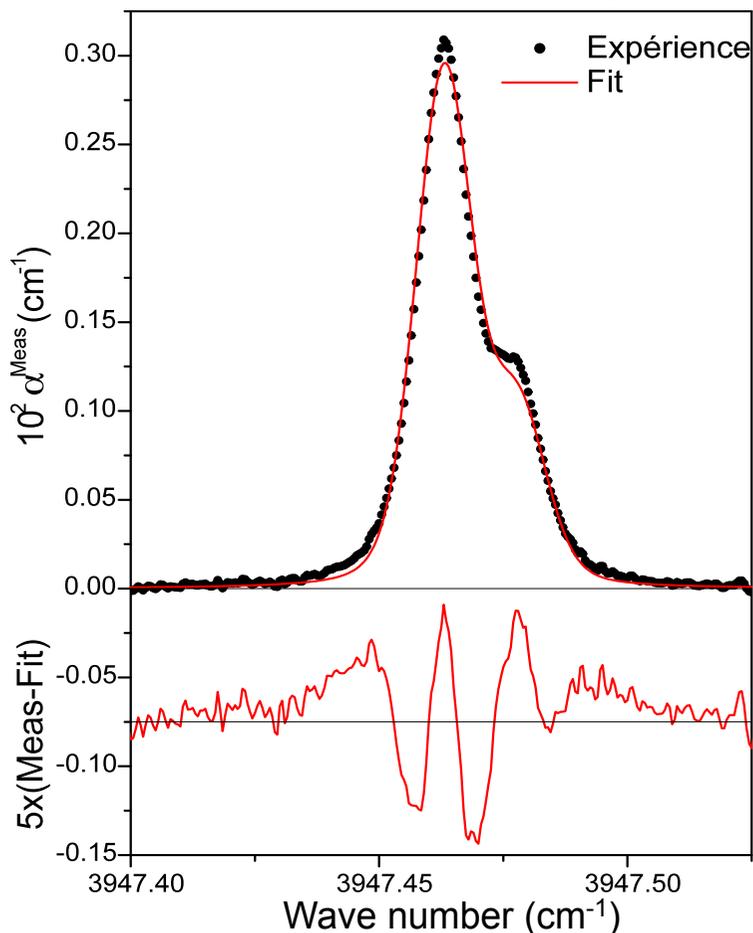
→ Pression

Modélisation des raies : raies isolées

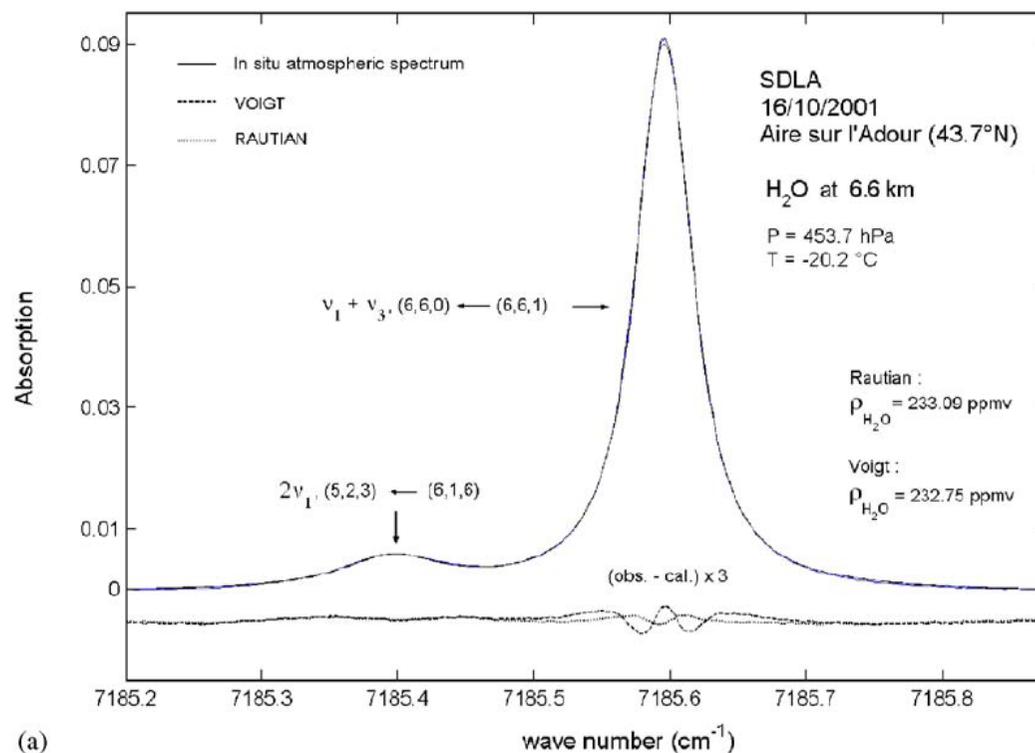


Limitation du profil de Voigt pour les raies isolées

Spectre mesuré et ajusté a un profil de Voigt pour une raie de H₂O



Spectre d'absorption in situ de H₂O troposphérique mesuré par diode laser sous ballon et ajustement avec un profil de Voigt



Durry et al, JQSRT 94, 387,2005

H₂O/N₂, ν_3 band, $11_{1,11} \leftarrow 10_{1,10}$ and $11_{0,11} \leftarrow 10_{0,10}$
 P=0.0973 atm, T=296 K

Résidu de l'ordre de 1%



Limitation du profil de Voigt pour les raies isolées

•Le profil de Voigt néglige :

- ✧ les changements de vitesse dus aux collisions entre molécules.
 - Réduction de l'élargissement Doppler → **effet Dicke** de rétrécissement
- ✧ la dépendance en vitesse de la largeur de la raie et de son déplacement spectral.
 - **Effet Speed-dependent**

•Développement de différents modèles non-Voigt :

- ✧ Pour les changements de vitesse :
 - Galatry (soft collisions) profile.
 - Rautian or Nelkin-Ghatak (hard collisions) profile.
 - introduit un taux de changement de la vitesse relié au coef. de diffusion.
- ✧ Pour les speed-dépendances : **speed-dependent Voigt profile**

Recommandation Octobre 2013

IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry)

Etant donnée la précision désormais atteinte avec ce type de profils, utiliser ces nouveaux profils pour les raies isolées

- Réflexion en cours dans les BDD pour inclure ces nouveaux paramètres.
- A terme, changement de la modélisation de la forme des raies dans les codes de TR.

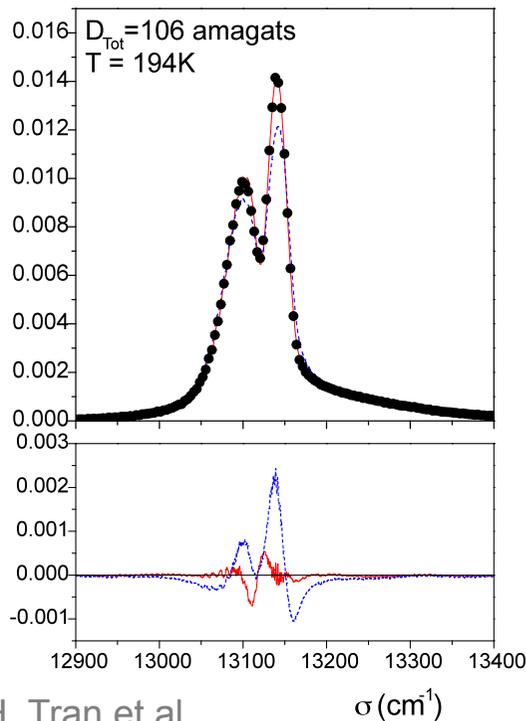
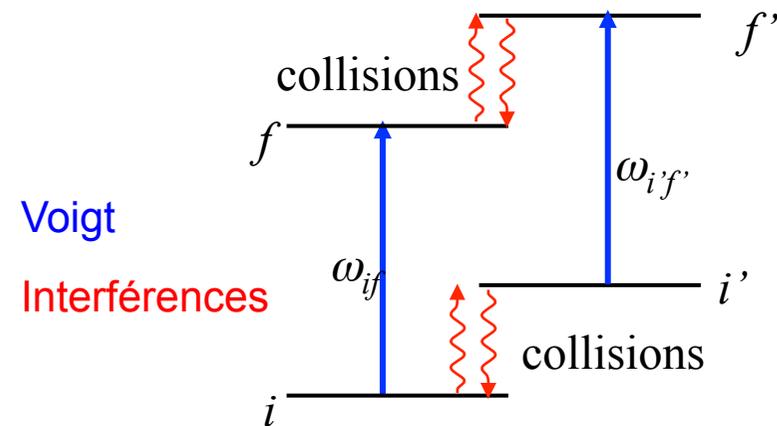
Modélisation des raies : raies non isolées



Limitation du profil de Voigt pour les raies non isolées

Line-mixing (interférences entre raies):

Lorsque plusieurs raies se juxtaposent, les collisions induisent des transferts de population entre les niveaux qui conduisent à des transferts d'énergie entre les raies



• Mesures en laboratoire O₂/N₂ A band à 0,76 μm :

→ Spectre à faible résolution spectrale sur toute la bande de O₂ regroupant plusieurs centaines de raies.

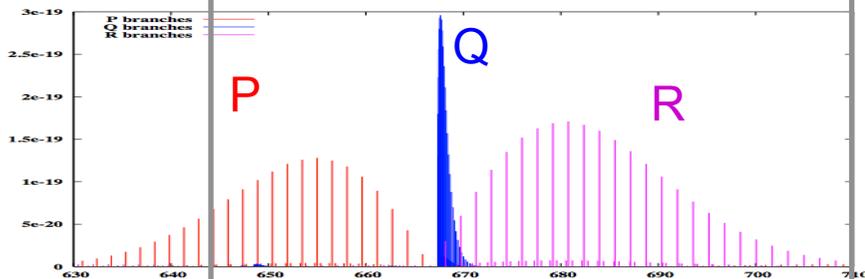
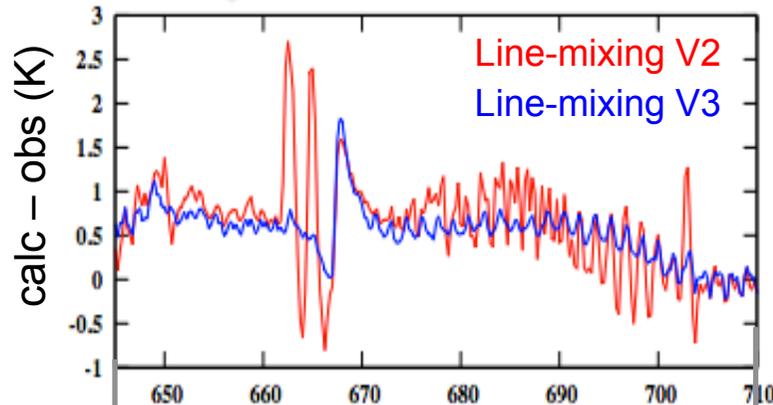
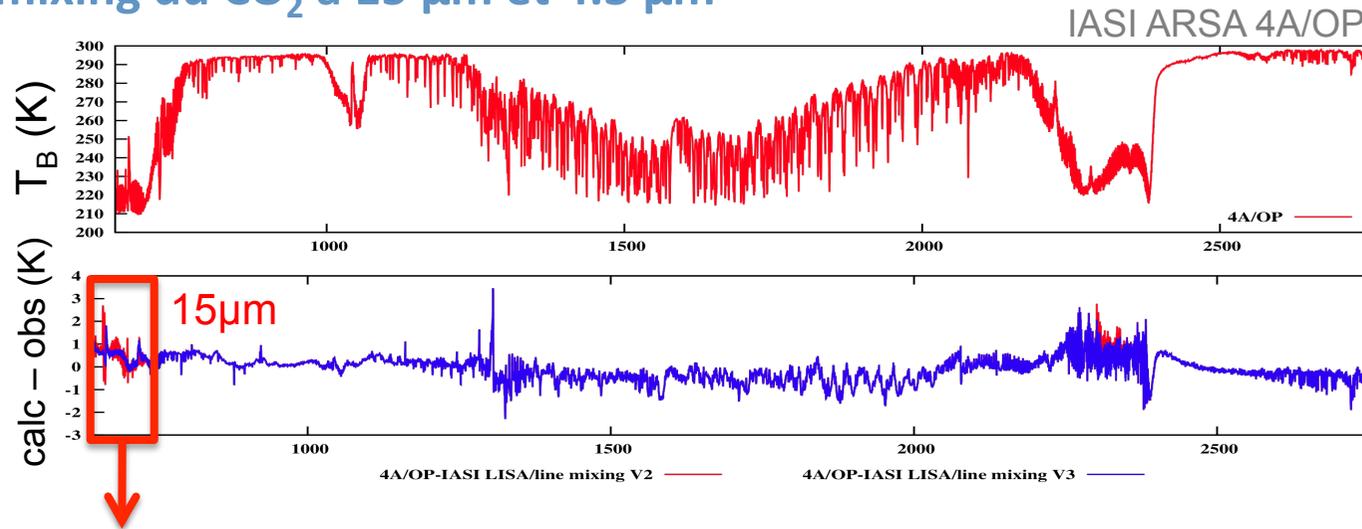
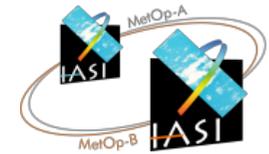
→ Le profil de Voigt n'est plus adapté.

→ Amélioration du résidu en prenant en compte le line-mixing.

Modélisation des raies : raies non isolées



Line-mixing du CO₂ à 15 μm et 4.3 μm



Prise en compte du line-mixing du CO₂ à 15 μm :

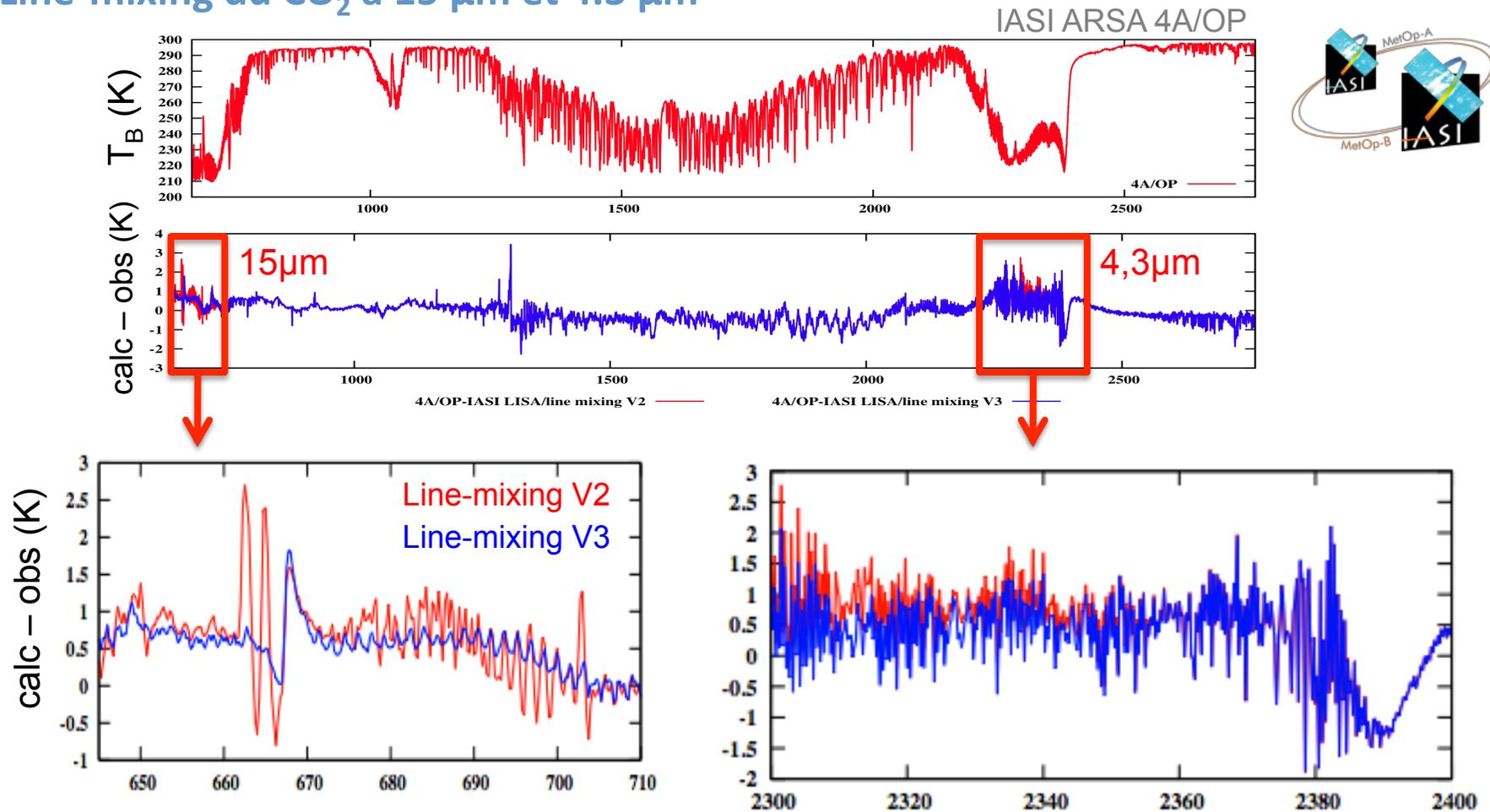
- V2 issue de Rodrigues et al, 1998.; Niro et al. 2004
- V3 Lamouroux et Hartmann, comm. pers.

→ Amélioration des branches P et R.
 → Résidu de la branche Q en cours d'étude.

Modélisation des raies : raies non isolées



Line-mixing du CO₂ à 15 μm et 4.3 μm

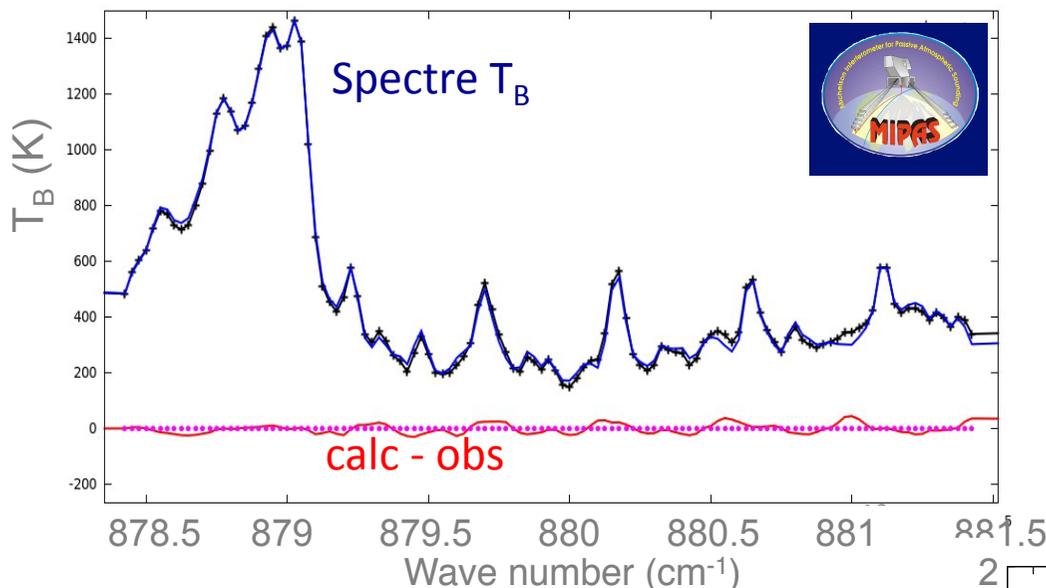


A 4,3 μm : utilisation des paramètres de 15 μm.
Corrige en partie mais nécessité de calculer des paramètres spécifiques.

Modélisation des raies : raies non isolées



Le HNO₃ à 11,3 μm : évaluation des paramètres spectro. obtenus au LISA



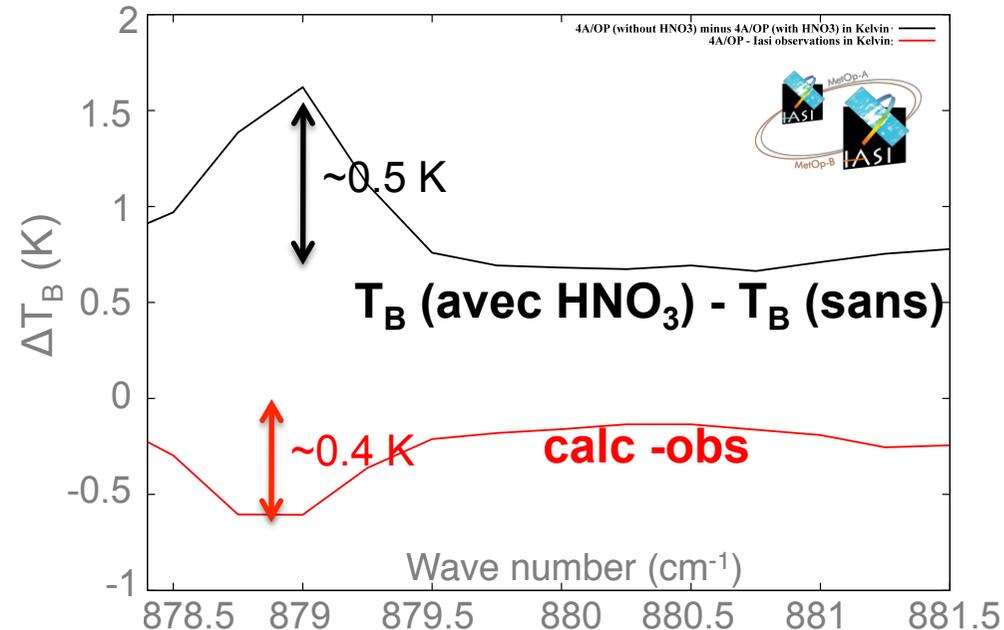
• **Validation avec MIPAS** 
(A. Perrin)

Spectres d'émission à 20 km.
calc – obs proche de 0 K.
→ Paramètres validés.

... **MAIS...**

• Application à IASI

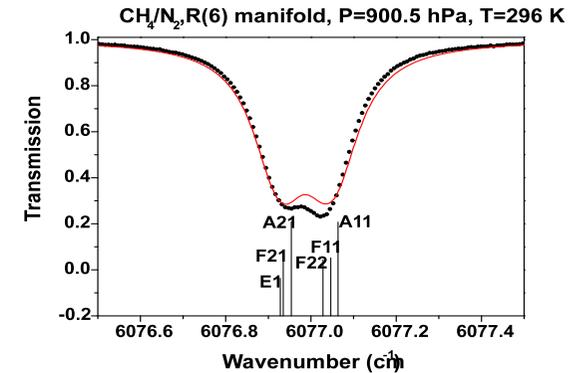
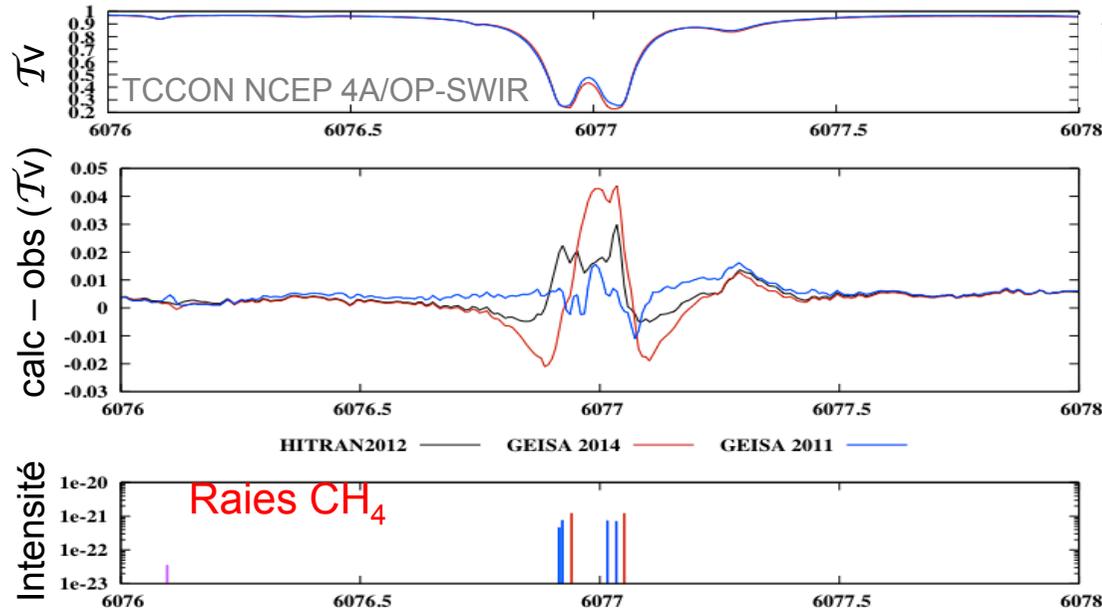
- Forte signature à 879 cm⁻¹.
- **line mixing (branche Q)** : non détectable avec les spectres d'émission mesurés au limbe (atténuation).
- Prise en compte du line-mixing en cours au LISA (A. Perrin, H. Tran)



Modélisation des raies : raies non isolées



Multiplet (6 raies) du CH₄ « Merlin » à 1.65 μm



H. Tran, T. Delahaye, et al.

- Résidu plus élevé avec GEISA 2014... malgré des paramètres spectroscopiques up-to-date.

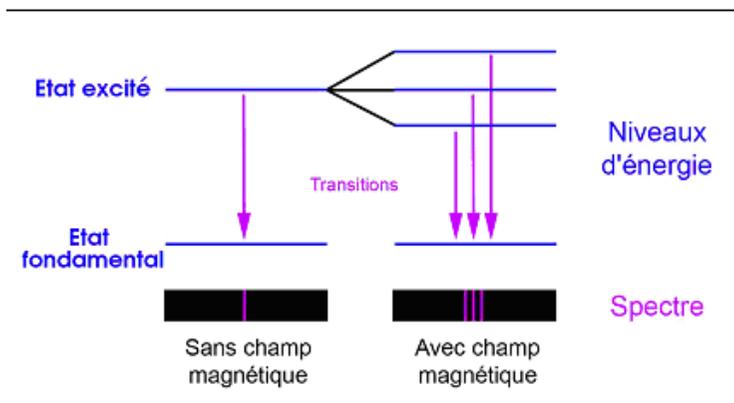
→ Nécessité de prendre en compte le **line-mixing des 6 raies CH₄**.

- Or, la précision requise pour Merlin est de... 0.1 % !!

→ **Ajustement simultané** de l'ensemble des paramètres (en cours au LISA)

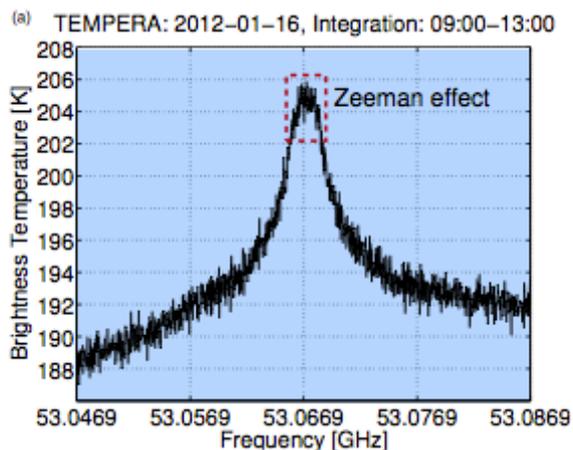
Lorentz Doppler Dicke Speed-dependent Line-mixing

Effet Zeeman dans les micro-ondes

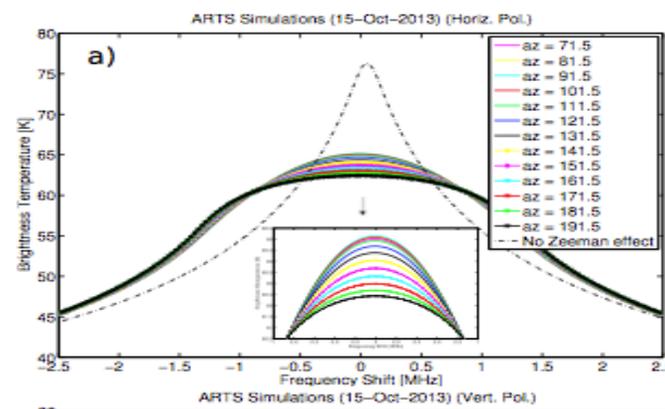


L'effet Zeeman a pour origine la subdivision des niveaux d'énergie des atomes ou des molécules plongés dans un champ magnétique. Selon les conditions, les raies spectrales se divisent en un nombre impair dit « normal » ou bien en un nombre pair dit « anormal »

Effet Zeeman sur l'O₂ dans la stratosphère mesuré par le radiomètre MO TEMPERA au sol



Simulation de l'effet Zeeman par le code *Atmospheric Radiative Transfer Simulator* (ARTS) Buehler et al. (2005), version 2.2 by Larsson et al. (2014).



3. Les effets bandes larges

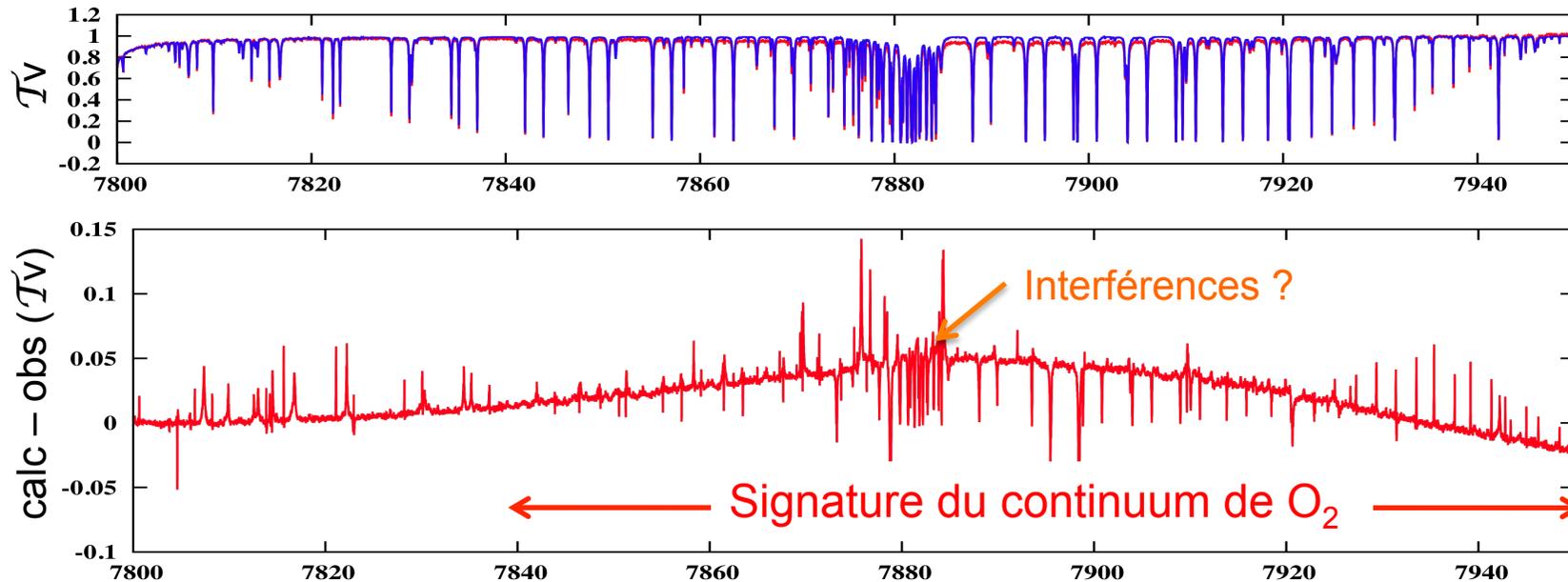
3.1. Les continua

3.2. Les sections efficaces

Les continua

- **CIA O₂, N₂ (Collisional Induced Absorption): raies très élargies par effet collisionnel**

→ assez bien connu mais à améliorer dans certaines régions spectrales



- **Ailes de raies mal modélisées :**

→ pas de profils de raie adaptés à ce jour (ex: effet sub-Lorentzien pour H₂O)

- **Coupures des ailes de raies dans les codes de TR :**

→ choix dans le code de TR.

→ exemple du continuum de vapeur d'eau.

Effets bandes larges

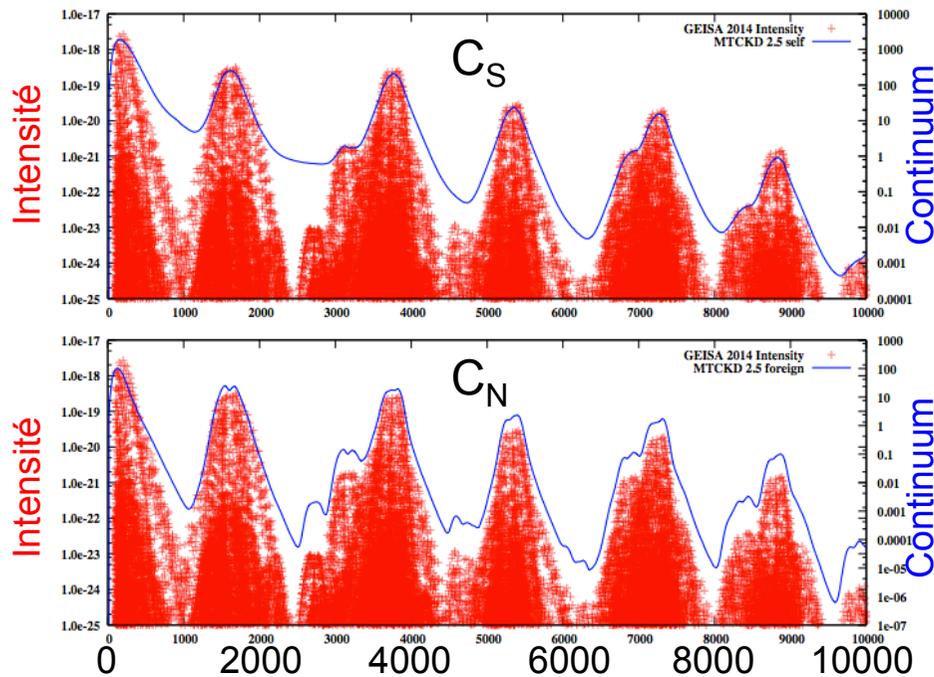
Continuum de vapeur d'eau

Coefficient d'absorption du continuum de vapeur d'eau :

$$\alpha_{WC}(\nu, T) = C_s(\nu, T)P_{h_2o} + C_N(\nu, T)(P_T - P_{h_2o})$$

self continuum

foreign continuum



+ Intensité des raies d'absorption de H₂O (GEISA 2014)

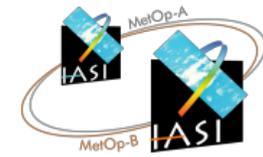
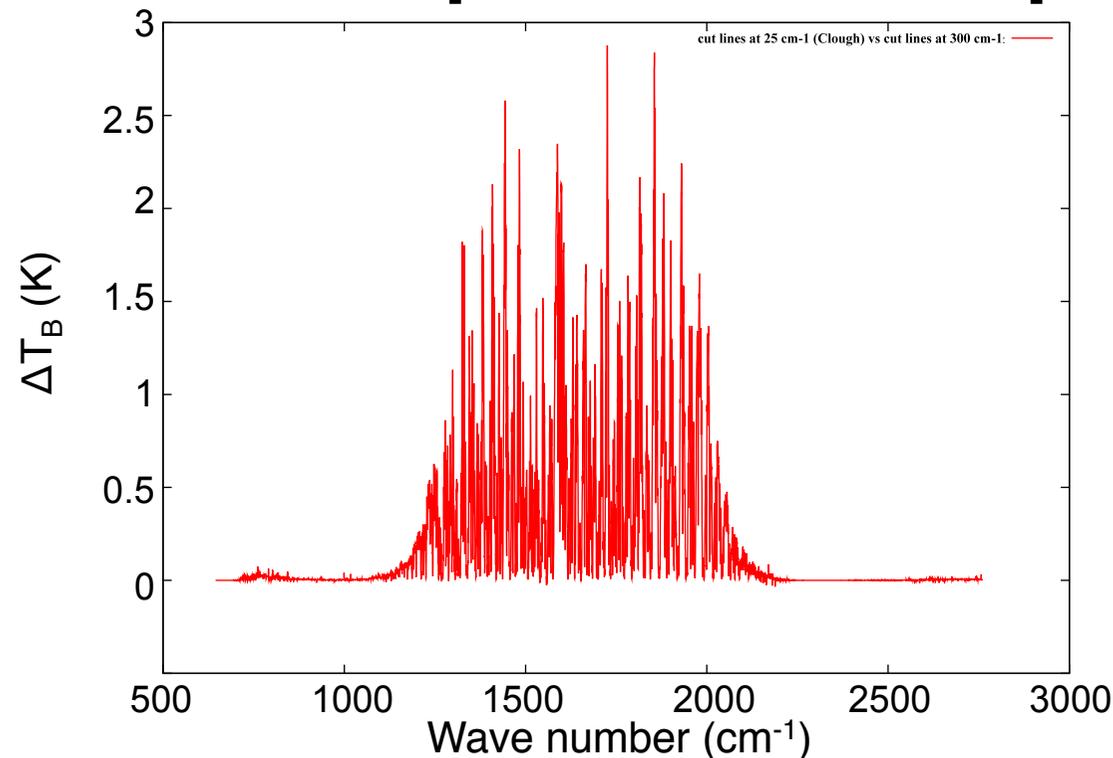
- Continuum MTCKD 2.5 (Clough)

Le continuum MTCKD de Clough a été calculé avec la **coupure des ailes de raies à 25 cm⁻¹** utilisée dans LBLRTM

Impact de la coupure des ailes de raies sur la prise en compte du continuum

- Augmentation de la zone d'exploration des ailes de raies pour mieux prendre en compte les variations en T et P de l'absorption.

Simulations IASI 4A/OP Différence [cut 25 cm⁻¹ - cut 300 cm⁻¹]

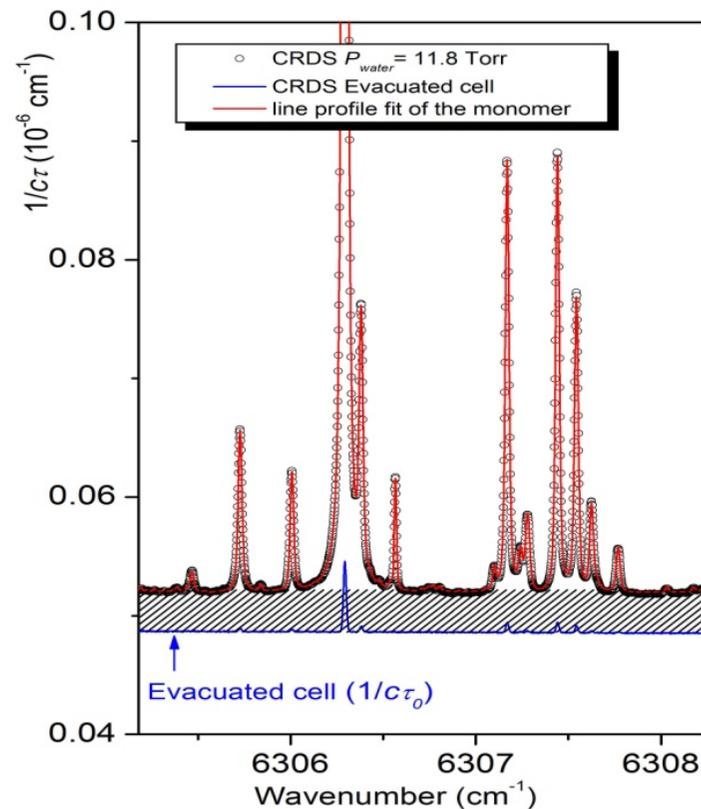


→ Nécessité de **réajuster le continuum de Clough en fonction de la coupure** des ailes de raies utilisée dans le code de TR.

Effets bandes larges

Continuum de vapeur d'eau : études en cours

- Un nouveau continuum de vapeur d'eau : CAVIAR [Ptashnik et al.]
- De nouvelles mesures en laboratoire :



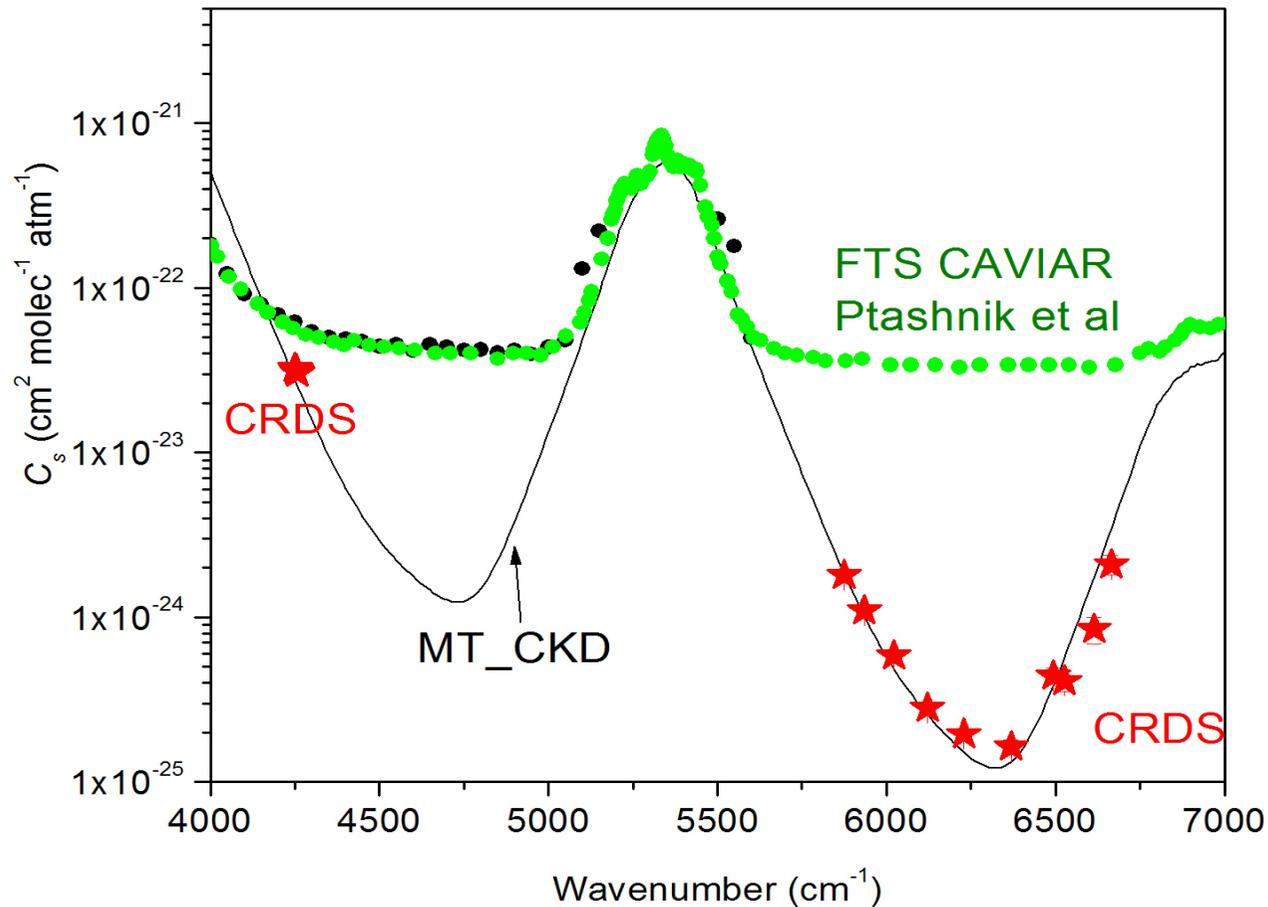
Mesures par CRDS du continuum de vapeur d'eau dans les fenêtres transparentes à 1.6 et 2.3 μm

$$C_s(\nu, T)$$

self-continuum cross section

Effets bandes larges

Continuum de vapeur d'eau : études en cours



Les mesures par CRDS sont en fort désaccord avec le continuum CAVIAR mais en bon accord avec le continuum MTCKD de Clough.

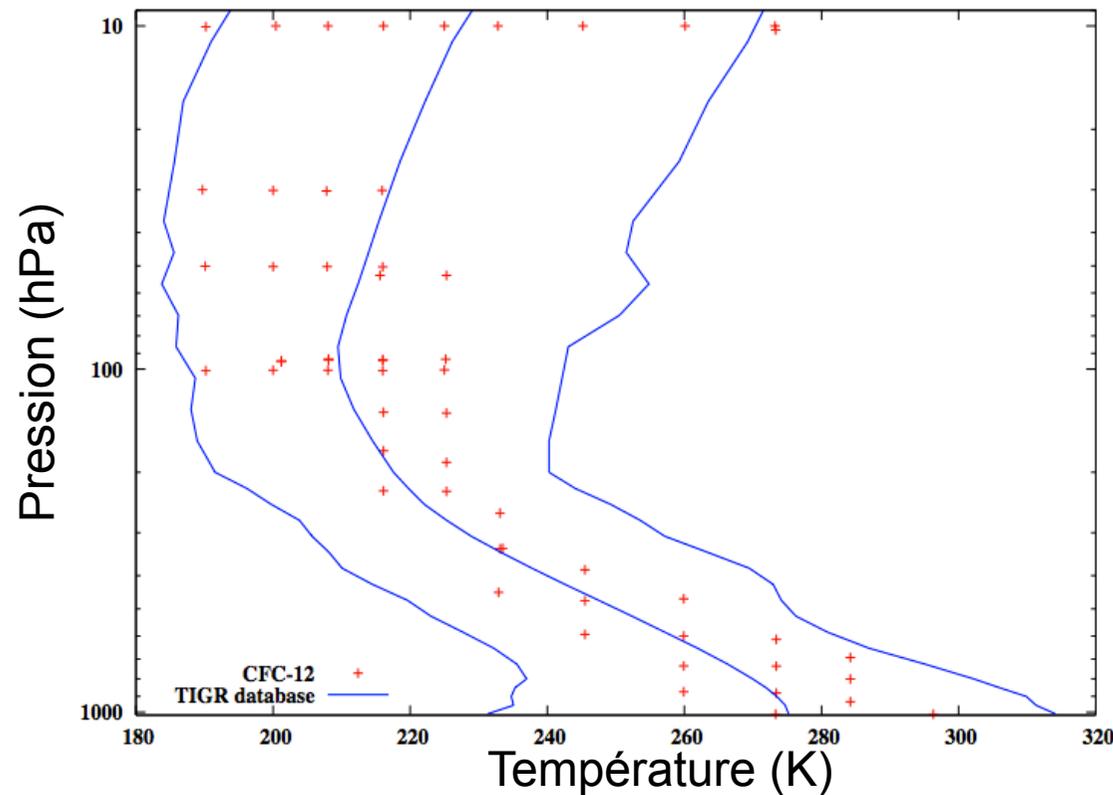
Effets bandes larges



Les CFCs

Elargissement des raies trop important pour pouvoir déterminer les paramètres spectro → utilisation des sections efficaces d'absorption

• **Première étape** : interpolation des mesures en labos (+) effectuée pour des couples (P,T) donnés.



Sous-BDD
section
efficace

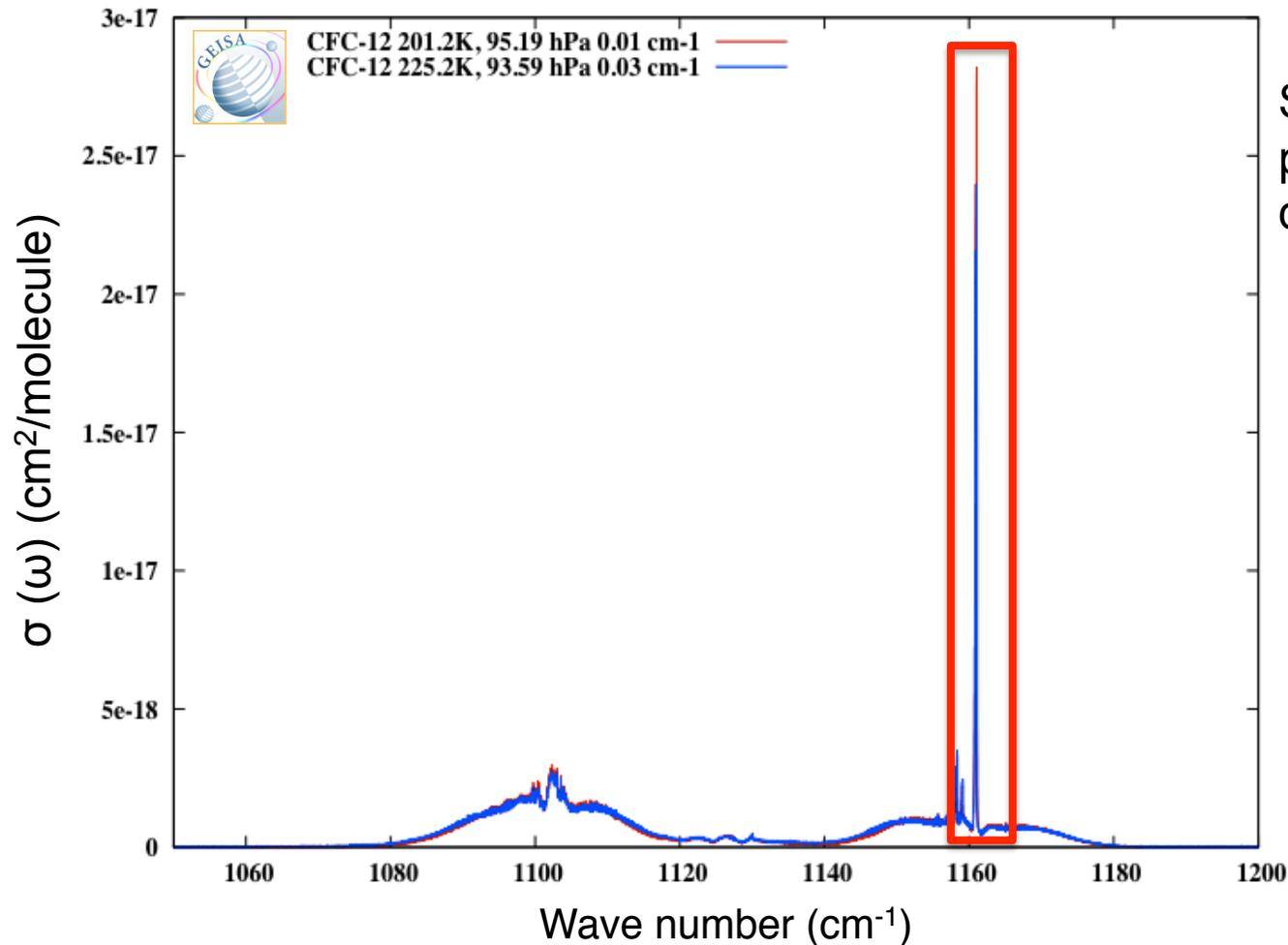
→ De nombreuses régions (P,T) restent à explorer...

Effets bandes larges



Les CFCs

- **Deuxième étape** : prise en compte de la variation spectrale des sections efficaces
→ Influence de la résolution spectrale des mesures en labo



Sections efficaces CFC-12 pour un couple (P,T) donné mesurées à

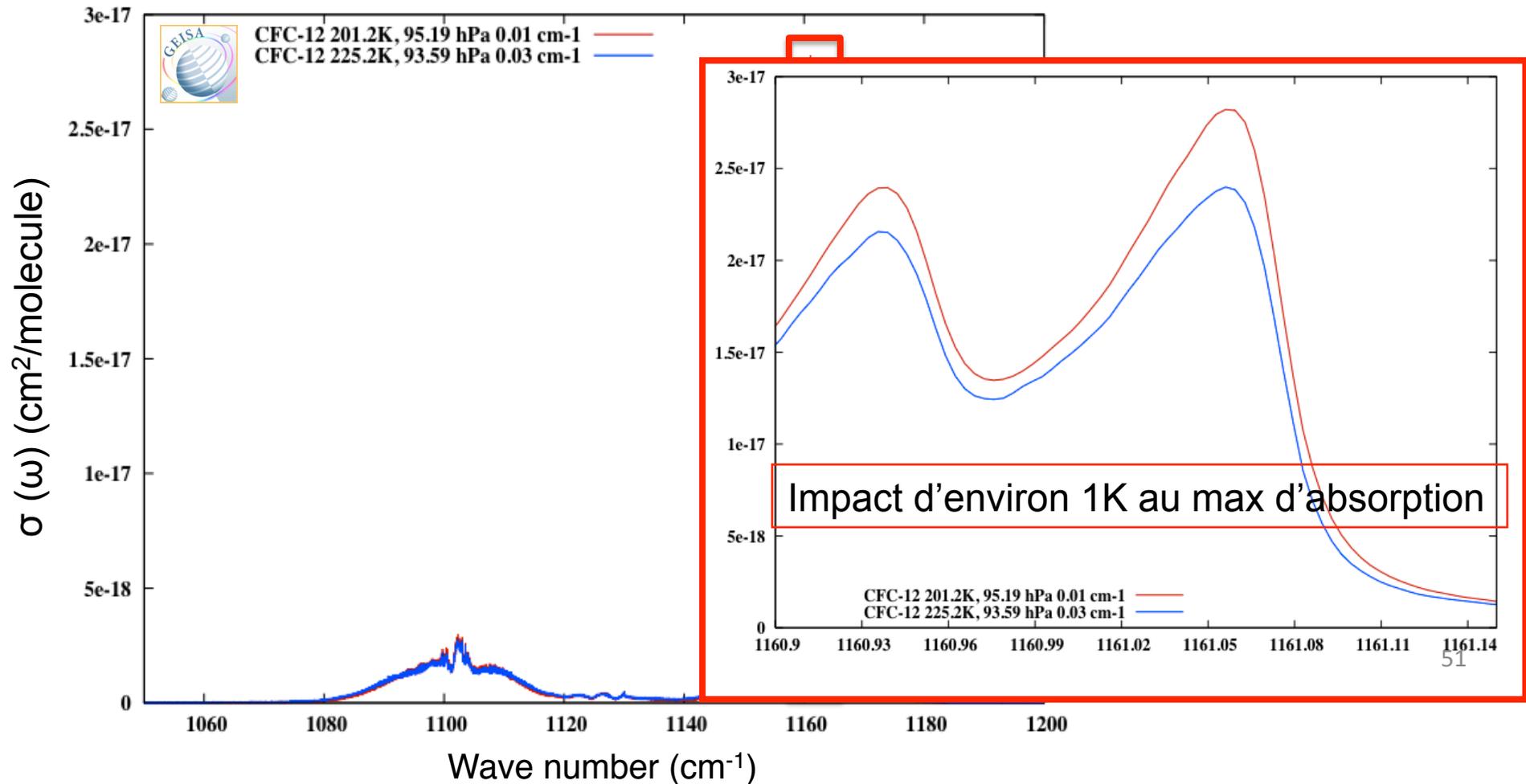
0.01 cm^{-1}

0.03 cm^{-1}

Effets bandes larges

Les CFCs

- **Deuxième étape** : prise en compte de la variation spectrale des sections efficaces
→ Influence de la résolution spectrale des mesures en labo



4. La rupture de l'Equilibre Thermodynamique Local (LTE)

- **Basse atmosphère :**

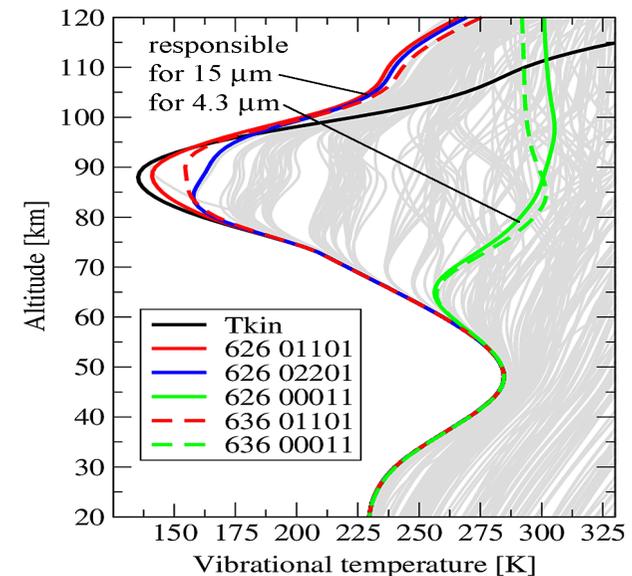
Les populations des niveaux d'énergie sont déterminées par les collisions moléculaires, suivant la loi de Boltzman.

- **Milieu et haute atmosphère :**

Des facteurs non-locaux (rayonnement) modifient les populations des niveaux d'énergie.

→ Rupture de l'ETL

La hauteur de la rupture dépend de l'interaction entre les termes collisionnels et radiatifs (pompage solaire, rayonnement des basses couches, photochimie)



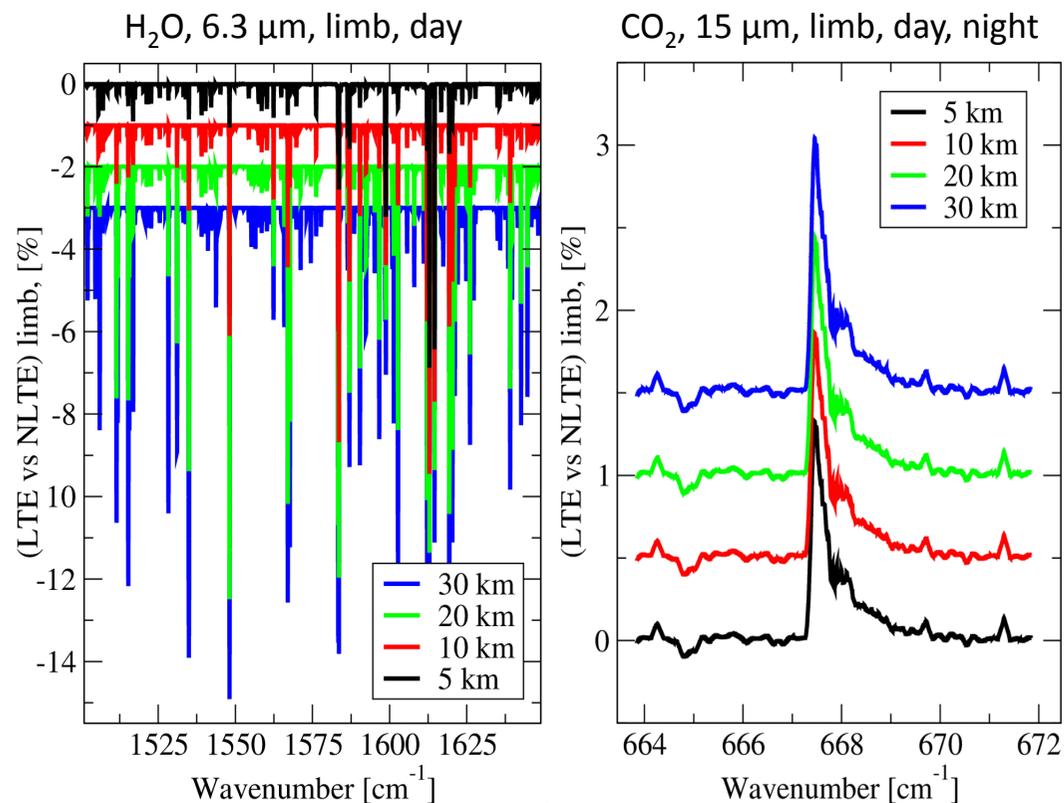
Rupture de l'Equilibre Thermodynamique Local



Impact des effets non-ETL au limbe

Effets non-LTE principalement pris en compte pour les mesures au limbe et pour l'étude des atmosphères d'autres planètes.

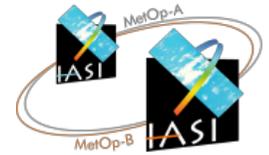
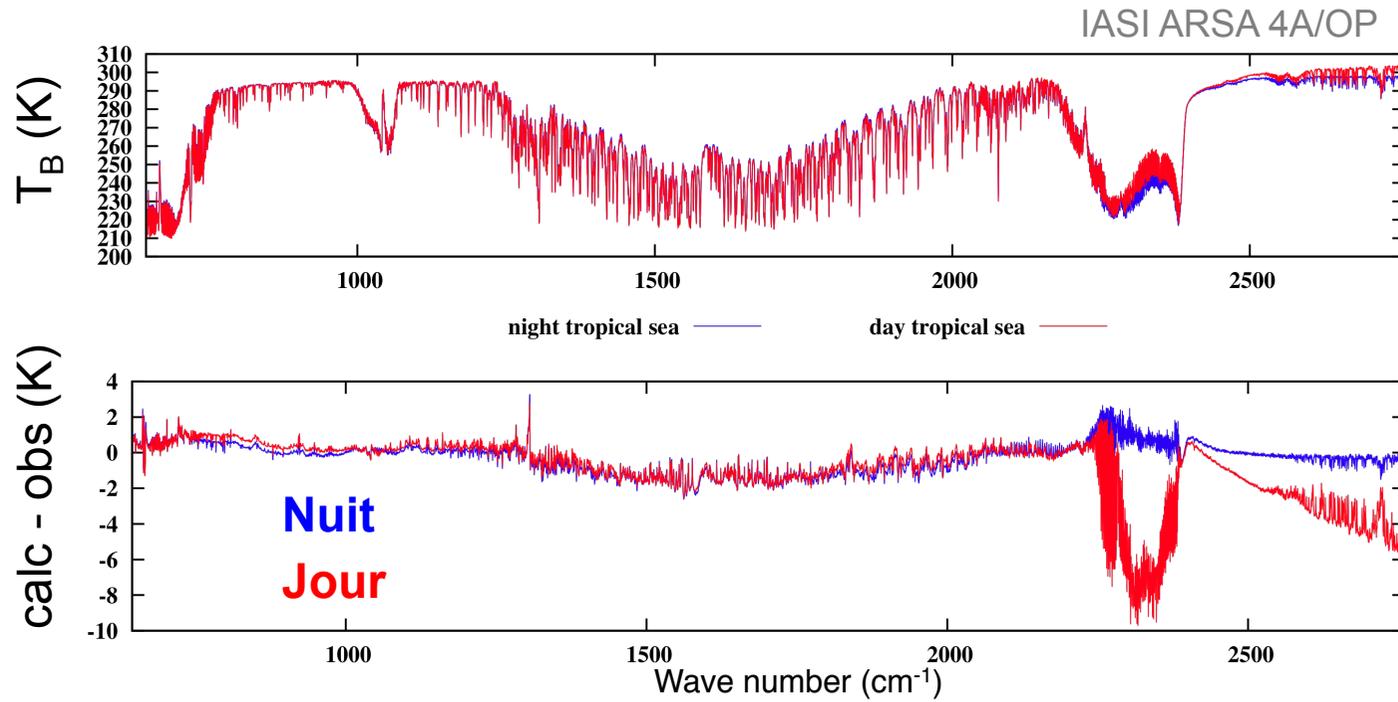
Simulations à l'aide du "code non-LTE" ALI-ARMS (utilisé pour les atmosphères de la Terre, Mars, Titan, Saturne).



Effets non-ETL



Impact sur les mesures au nadir

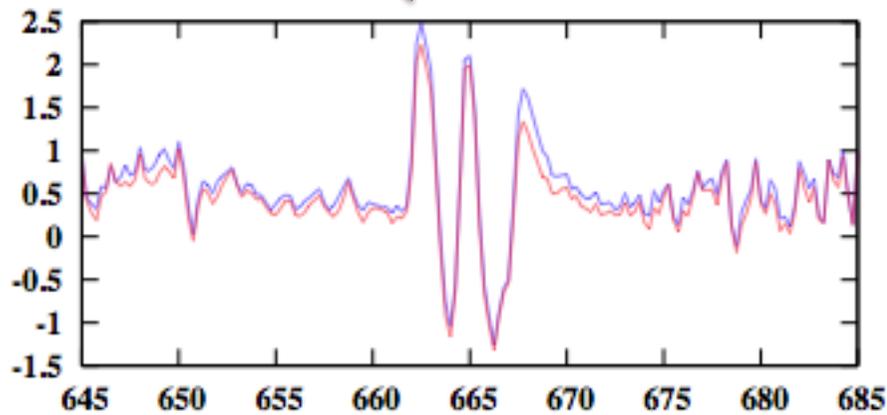
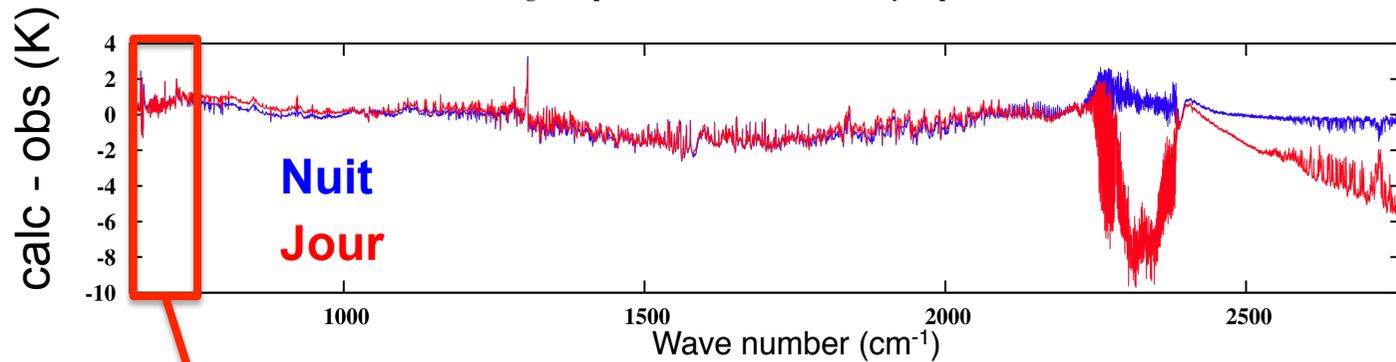
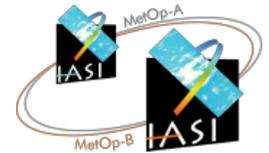
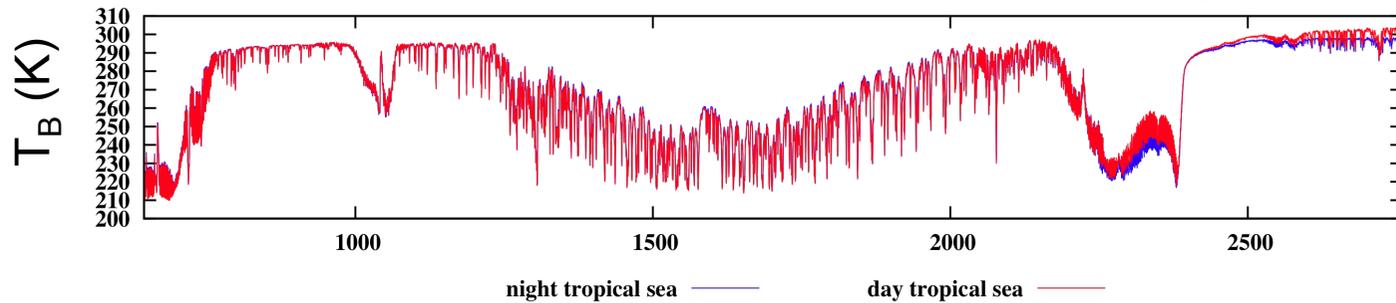


Effets non-ETL



Impact sur les mesures au nadir

IASI ARSA 4A/OP

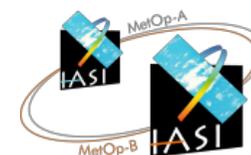
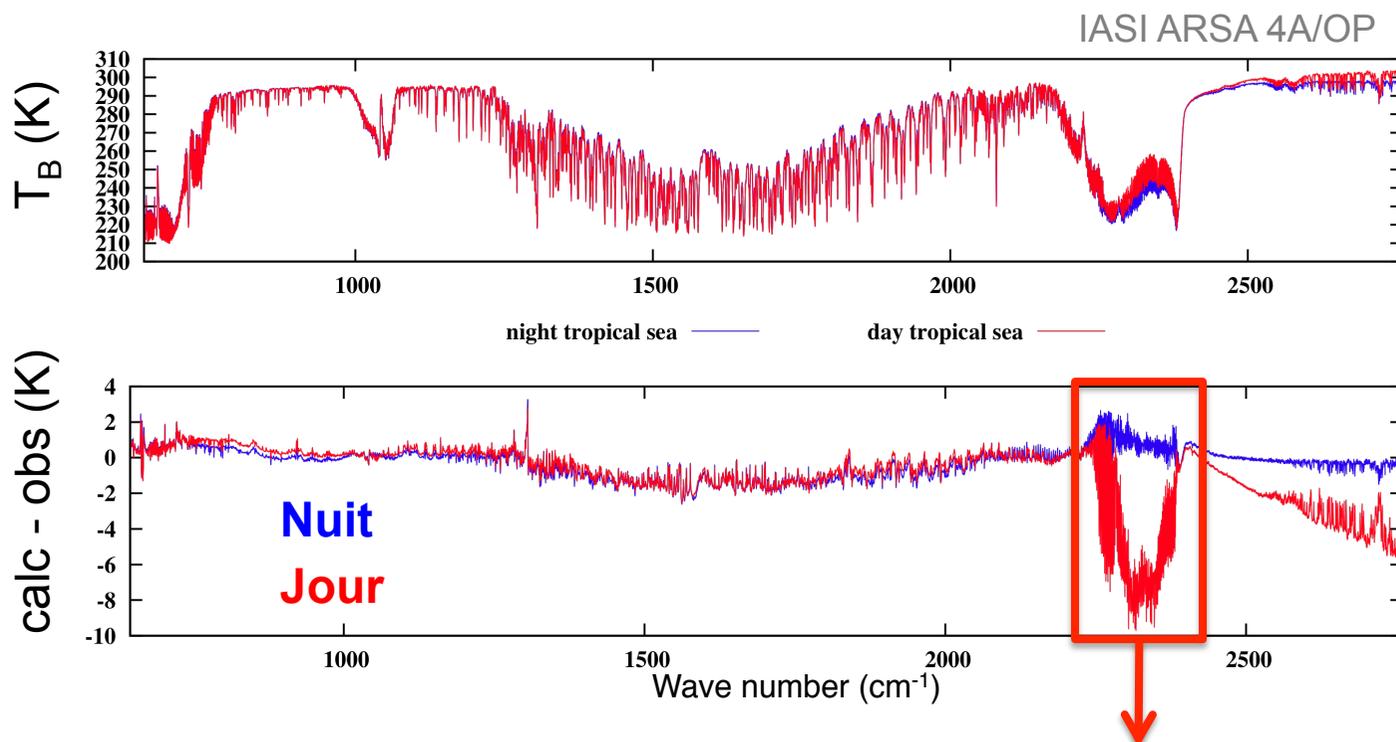


Pas d'impact visible avec IASI à 15 μ m
(bande v2 : ETL valable jusqu'à ~80km)

Effets non-ETL



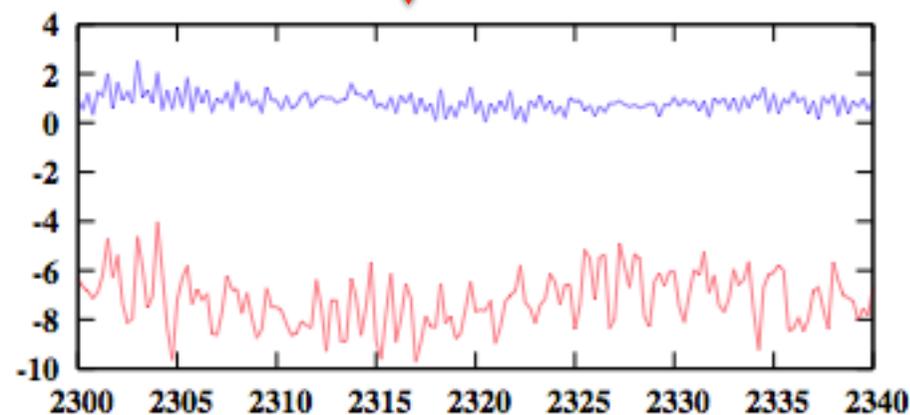
Impact sur les mesures au nadir



Impact très visible avec IASI à $4,3\mu\text{m}$
(bande v3 : ETL valable jusqu'à $\sim 60\text{km}$)

De jour : rupture de l'ETL du au
pompage solaire

→ Biais de $\sim 10\text{K}$!



Prise en compte du non-ETL dans les codes de TR

- **Correction a posteriori :**

LUT de corrections à appliquer à chaque canal après calcul du TR en conditions ETL.

→ LUT calculées par codes non-ETL.

→ Pas de modification du code de TR

→ Mais LUT à refaire pour chaque instrument, canal, etc.

(ex: DeSouza-Machado et al., 2007)

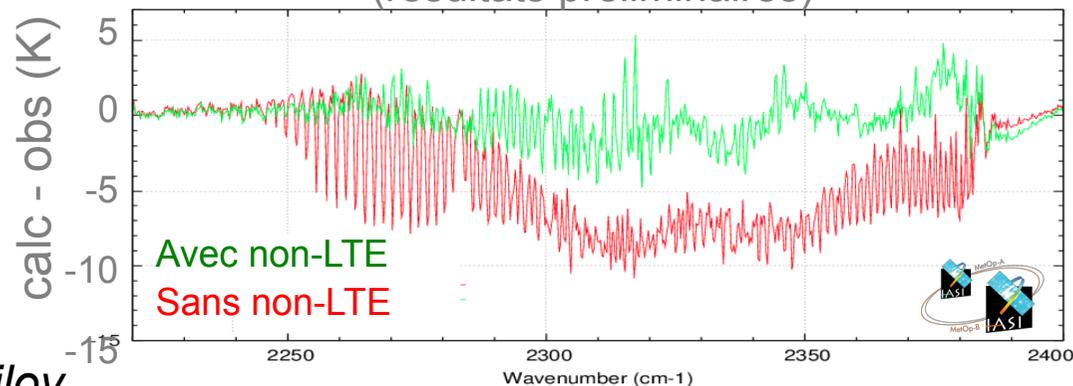
- **Approche physique :**

Remplacer la partie ETL par une partie non-ETL en modifiant l'émission par prise en compte de T_{vib} à la place de T_{kin} .

→ Approche universelle ("vrai TR")

→ Mais calcul de T_{vib} à réaliser pour toutes les transitions de chaque molécule.

Prise en compte du non-ETL dans 4A
(résultats préliminaires)

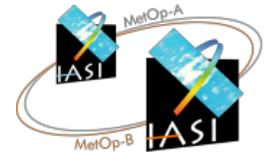
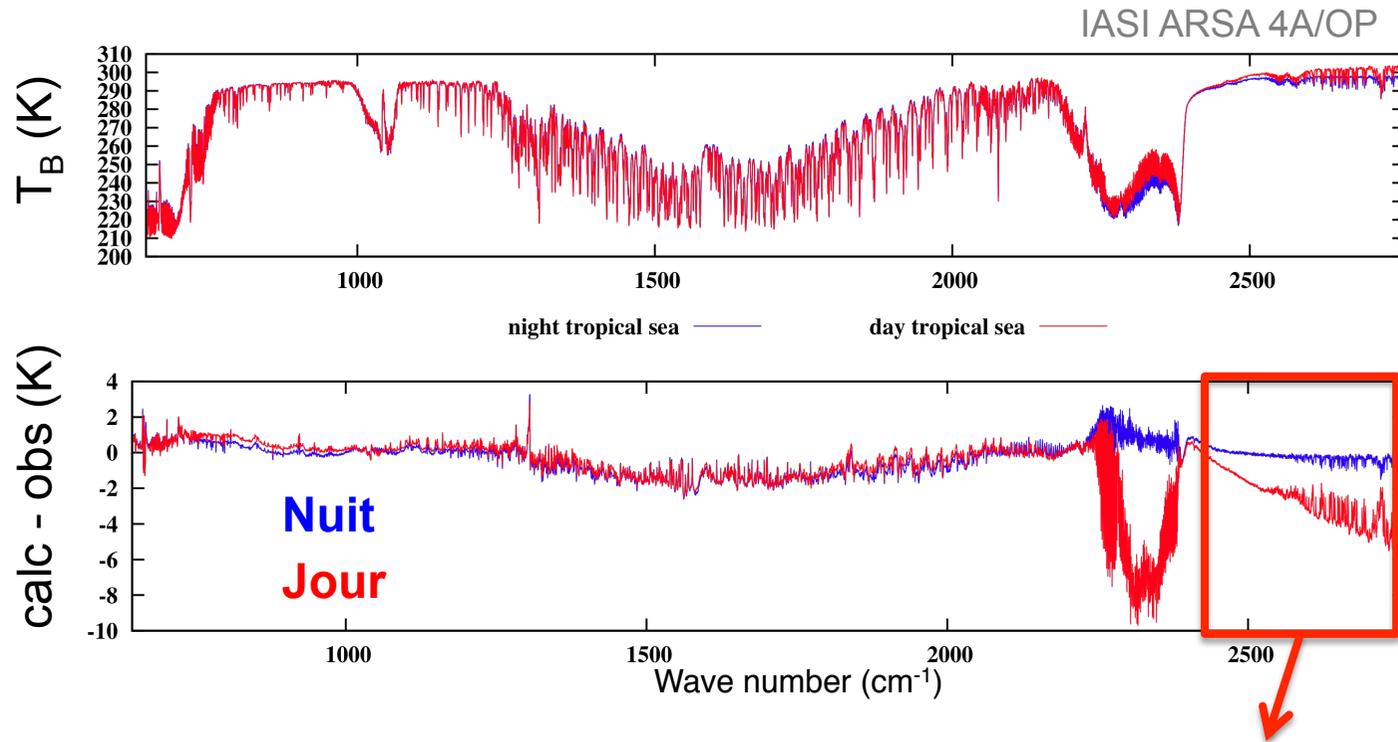


Cf. poster A. Feofilov

Effets non-ETL



Le rayonnement solaire



- Effet du rayonnement solaire (de jour...)
- Influence de la surface
- vers une prise en compte des BRDF ?

Conclusion



- De nombreuses avancées sur les 4 grands thèmes :
 - Paramètres spectroscopiques des raies d'absorption.
 - Modélisation des formes de raies d'absorption.
 - Effets bandes larges.
 - Rupture de l'équilibre thermodynamique local.
- Les **performances atteintes conjointement** par les instruments, notamment spatiaux, les codes de transfert radiatif, les bases de données spectroscopiques et les bases de données auxiliaires permettent désormais une évaluation fine des avancées et des problèmes existants.

• Mise en place d'une **boucle complète de mise à jour et d'évaluation** de la modélisation du TR et des données spectroscopiques.

• **Retour vers les agences spatiales** pour les besoins de préparation de nouvelles missions.

Exemple d'interactions sur le CH₄

