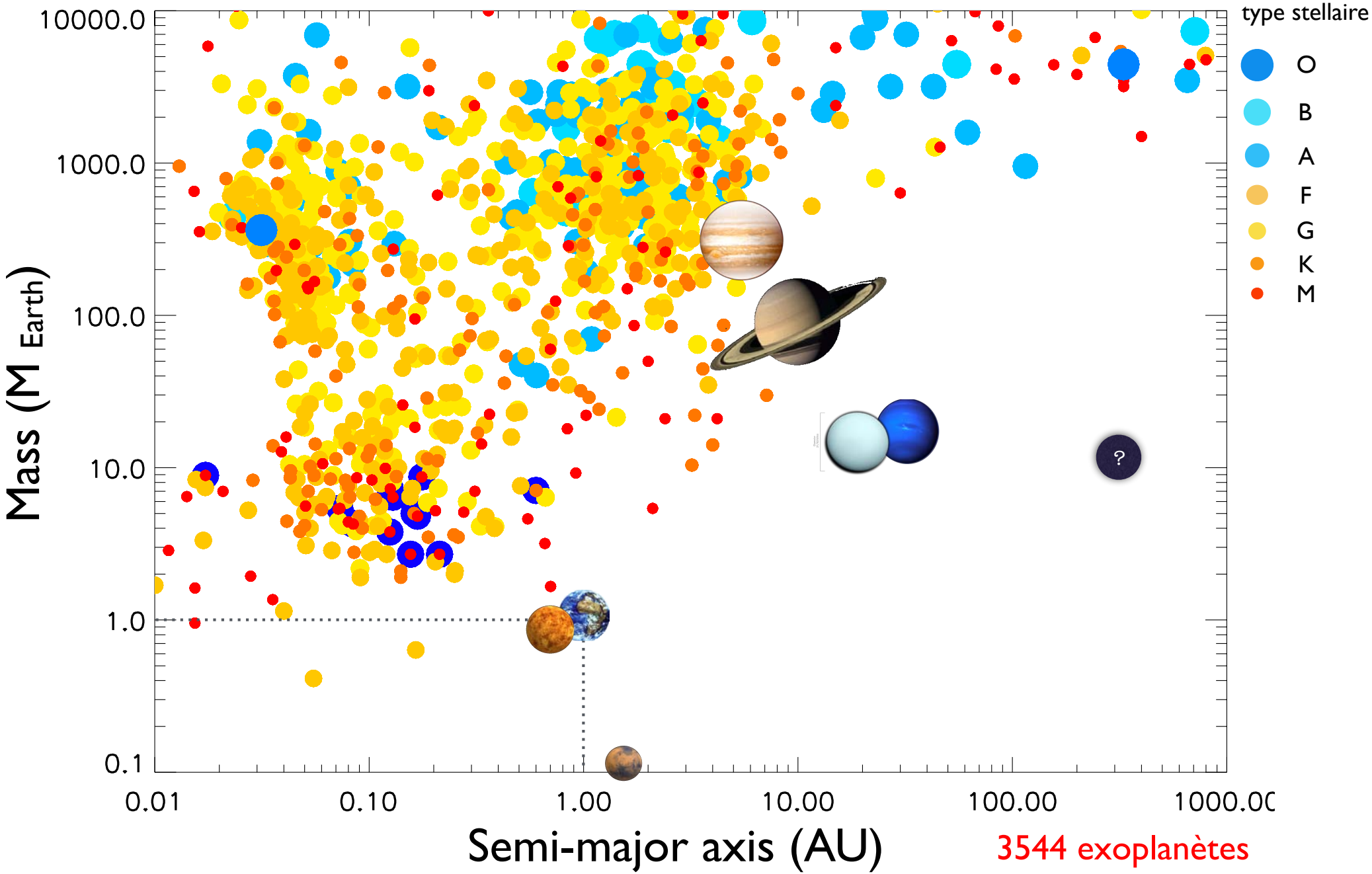
Atmosphères d'exoplanètes chaudes: modèles et expériences

Olivia VENOT
olivia.venot@lisa.u-pec.fr

Les mondes planétaires



3544 exoplanètes
+ 8 (9?) dans Système Solaire

source : exoplanet.eu (28 Novembre 2016)

Quelques questions scientifiques

Quelle est leur histoire ?
Comment elles ont pu se former ?

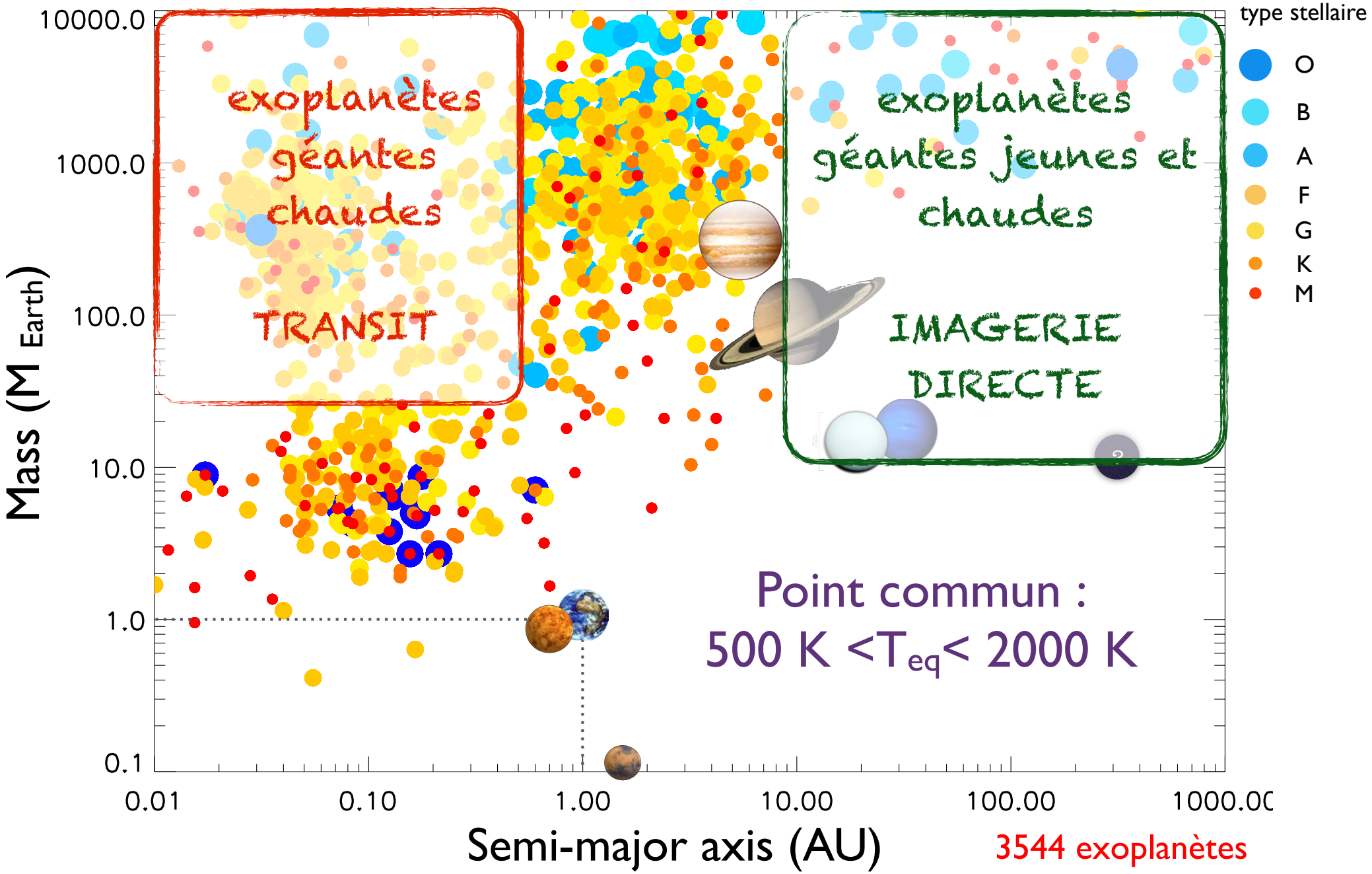
➡ Quelle est la composition de leur atmosphère ?

➡ Quels sont les abondances élémentaires ? Sont-elles similaires à celles de l'étoile mère?

Scénario(s) de formation planétaire commun avec le Système Solaire

jwst

Les mondes planétaires

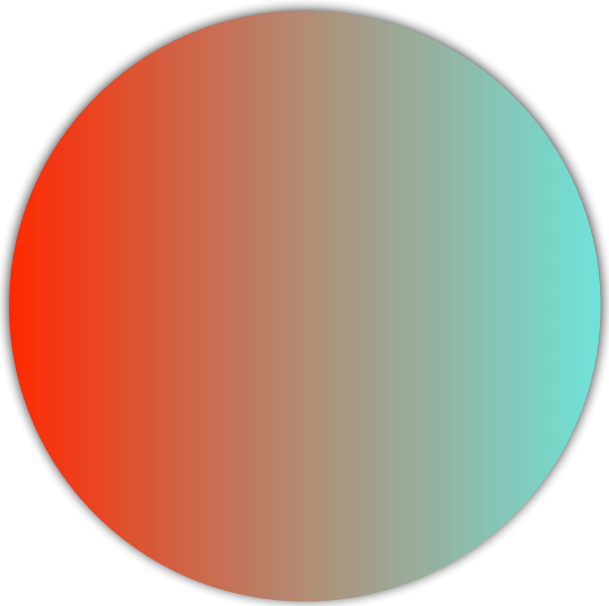


3544 exoplanètes
+ 8 (9?) dans Système Solaire

source : exoplanet.eu (28 Novembre 2016)

Processus hors-équilibre

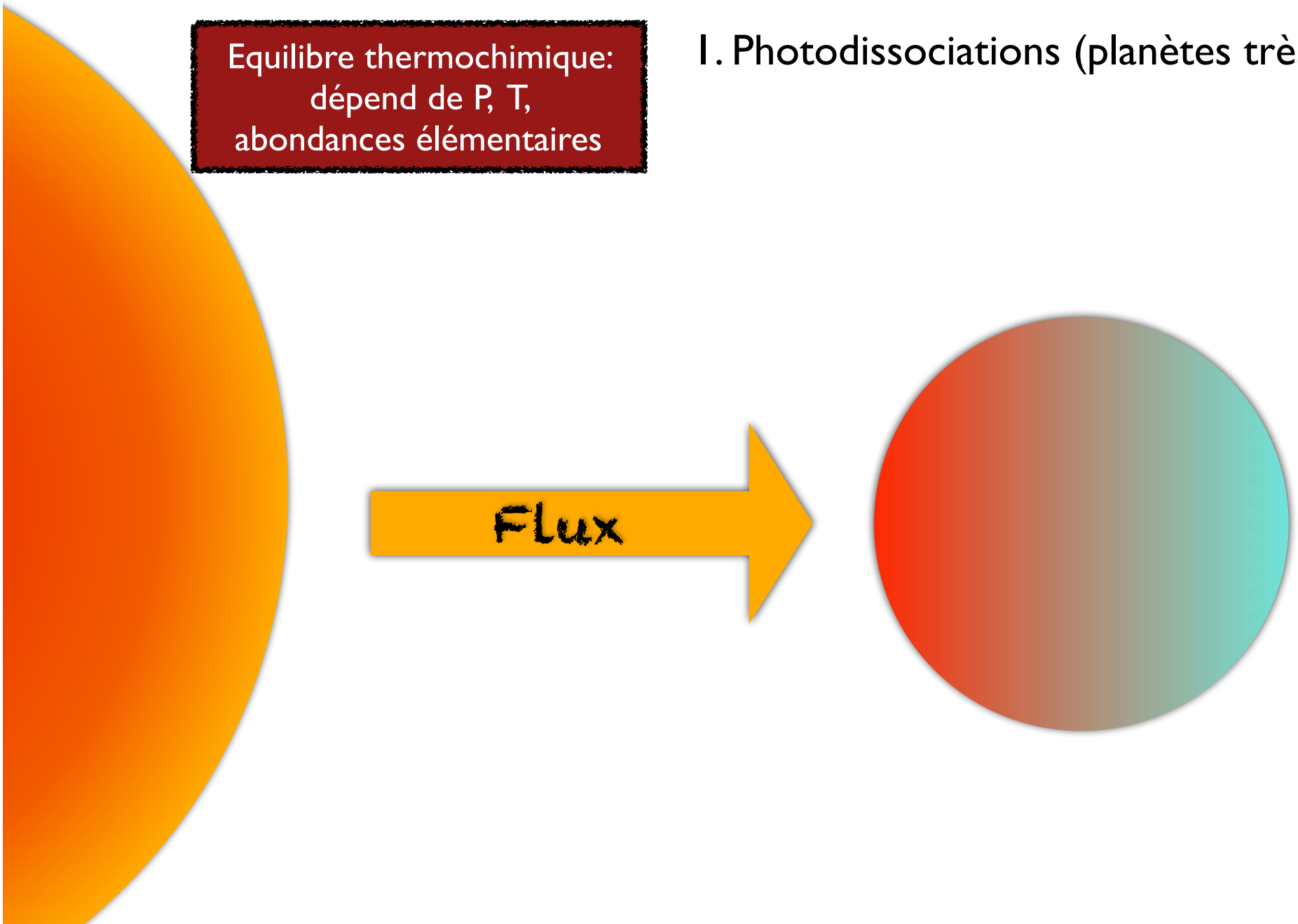
Equilibre thermochimique:
dépend de P, T,
abondances élémentaires



Processus hors-équilibre

Equilibre thermochimique:
dépend de P, T,
abondances élémentaires

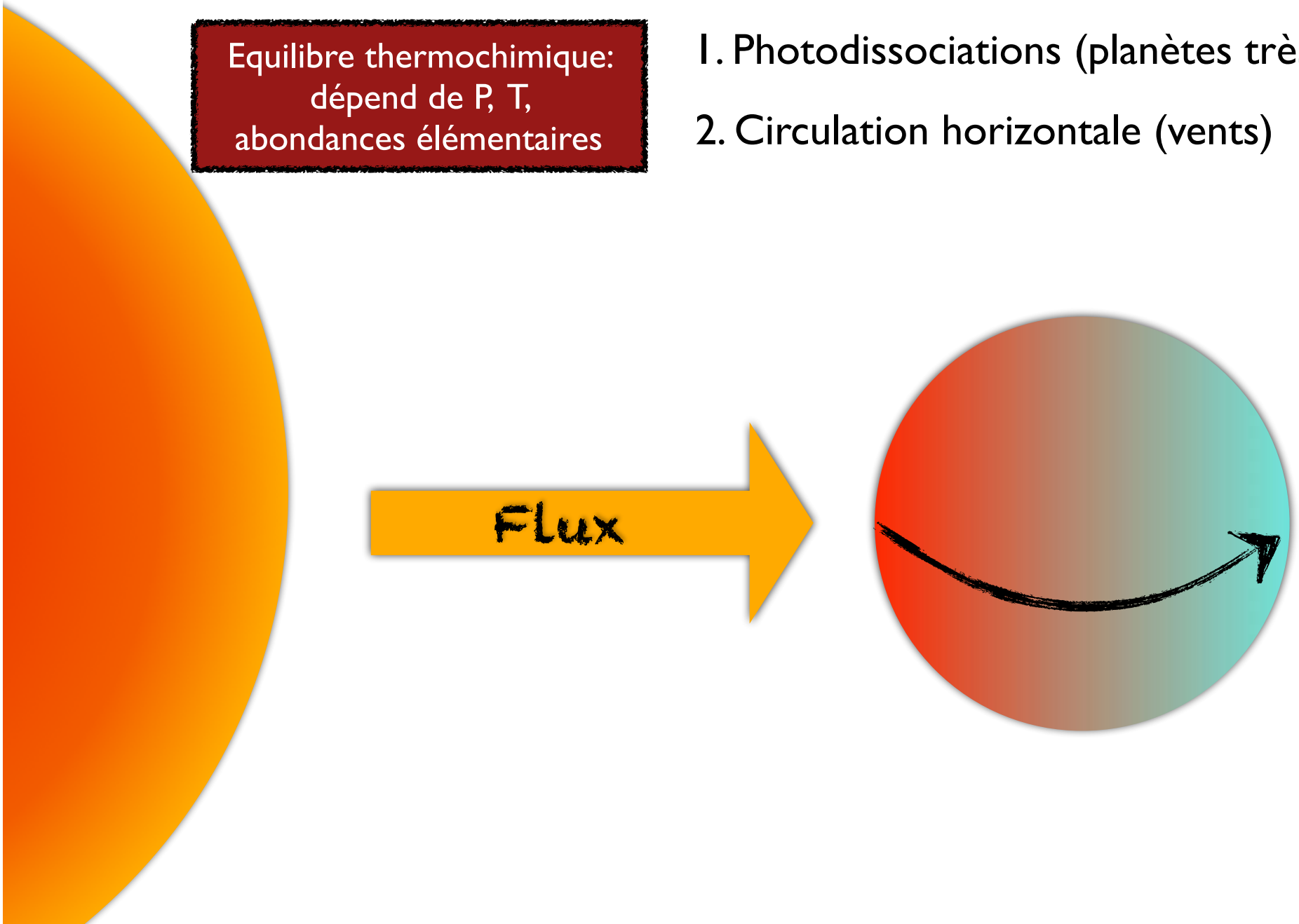
1. Photodissociations (planètes très proches)



Processus hors-équilibre

Equilibre thermochimique:
dépend de P, T,
abondances élémentaires

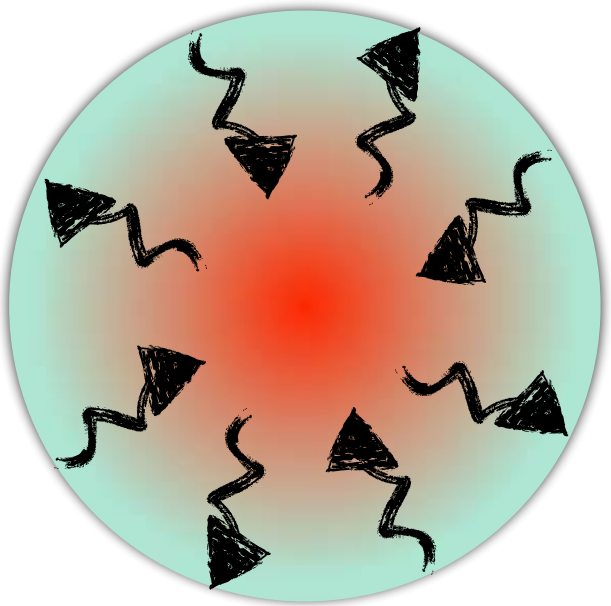
1. Photodissociations (planètes très proches)
2. Circulation horizontale (vents)



Processus hors-équilibre

Equilibre thermochimique:
dépend de P, T,
abondances élémentaires

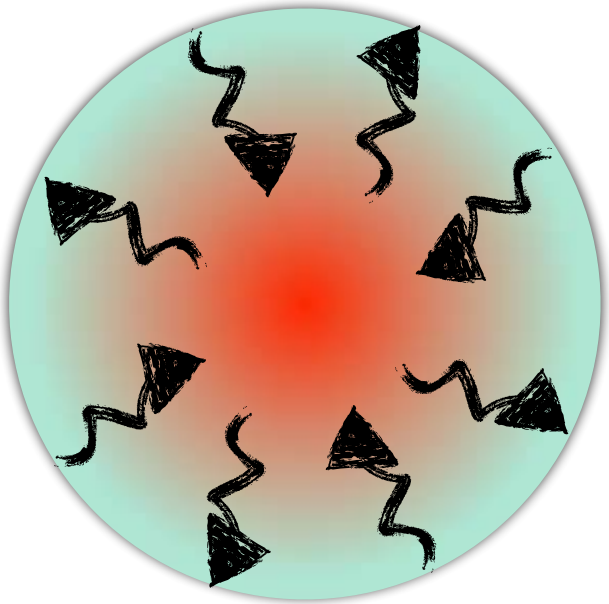
1. Photodissociations (planètes très proches)
2. Circulation horizontale (vents)
3. Mélange vertical (convection, turbulence)



Processus hors-équilibre

Equilibre thermochimique:
dépend de P, T,
abondances élémentaires

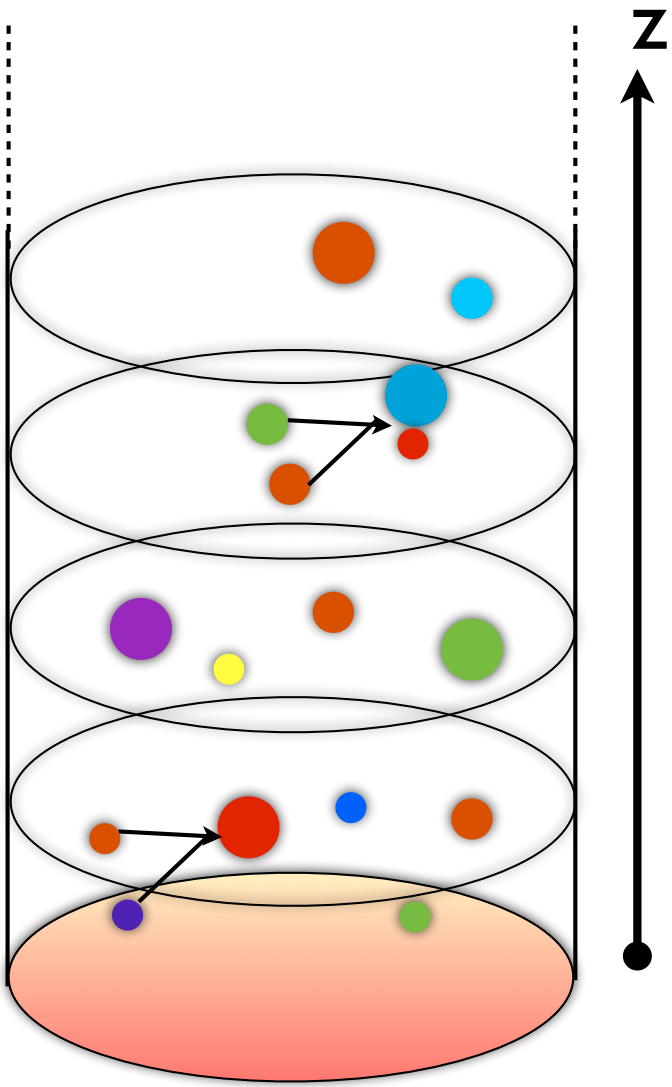
1. Photodissociations (planètes très proches)
2. Circulation horizontale (vents)
3. Mélange vertical (convection, turbulence)



interprétation spectroscopique :

➡ besoin de modèles cinétiques

Modèle 1D: cinétique, mélange vertical et photodissociations



colonne atmosphérique avec un profil PT
~100 niveaux
réactions chimiques à (P,T)

+ mélange vertical
+ flux UV → photodissociations

Pour chaque composé et pour chaque niveau, résolution de l'équation de continuité :

$$\frac{\partial n_i(z)}{\partial t} = P_i(z) - n_i(z)L_i(z) - div(\Phi_i(z)\vec{e_z})$$

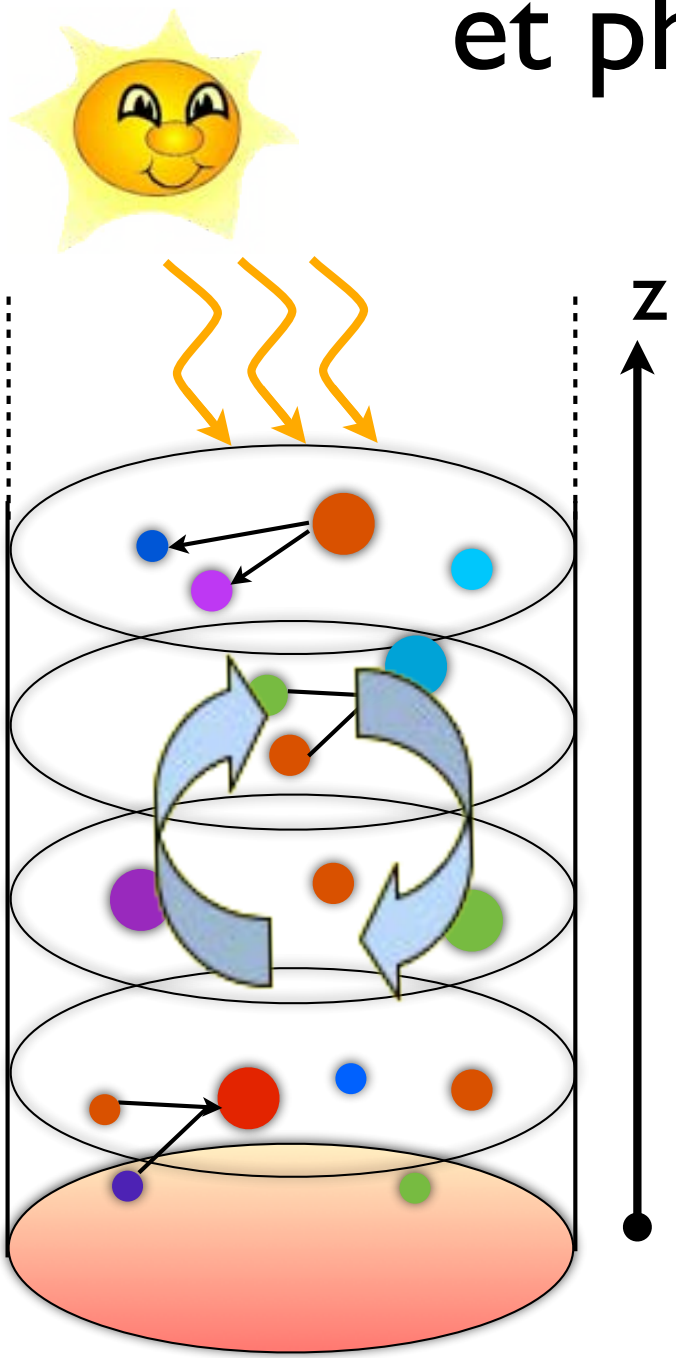
variation de la concentration ($cm^{-3}.s^{-1}$)

taux de production

taux de perte

mélange vertical

Modèle 1D: cinétique, mélange vertical et photodissociations



colonne atmosphérique avec un profil PT
~100 niveaux
réactions chimiques à (P,T)

+ mélange vertical
+ flux UV → photodissociations

Pour chaque composé et pour chaque niveau, résolution de l'équation de continuité :

$$\frac{\partial n_i(z)}{\partial t} = P_i(z) - n_i(z)L_i(z) - div(\Phi_i(z)\vec{e_z})$$

variation de la concentration ($cm^{-3}.s^{-1}$) | taux de production | taux de perte | mélange vertical

Schémas chimiques haute T

- Réseaux chimiques **inédits** en planétologie:

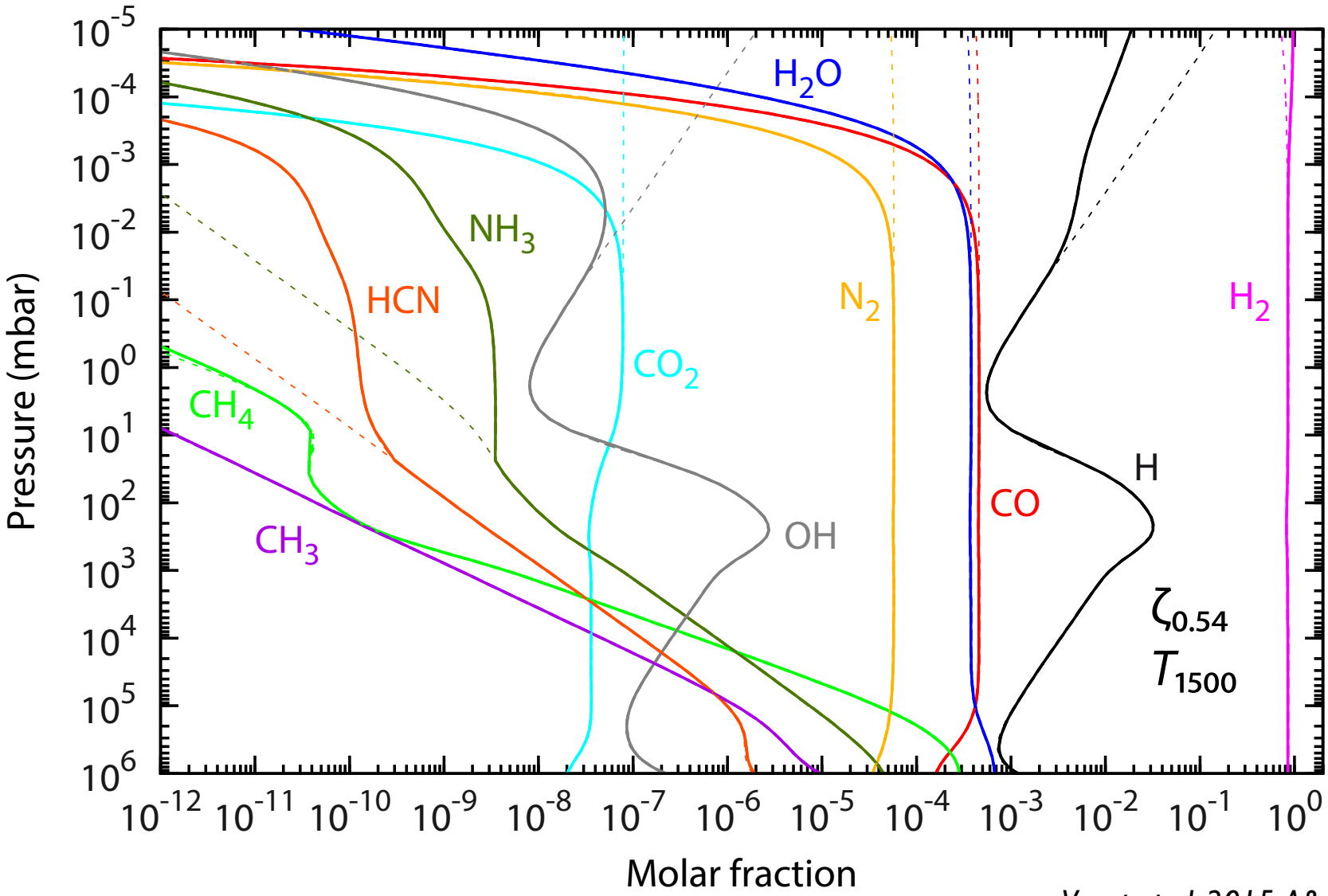
+

=

- collaboration **interdisciplinaire** - spécialiste en combustion (LRGP, Nancy)
- schémas validés expérimentalement dans leur **ensemble** - larges gammes de P (10^{-3}-10^{2} bar) et T (300-2500 K)
- 1920 réactions, 105 espèces (C,H,O,N), C_2 *Venot et al. 2012, A&A,*
- 4002 réactions, 240 espèces (C,H,O,N), C_6 *Venot et al. 2015, A&A*
- **disponibles** sur la base de données KIDA Kinetic Database for Astrochemistry (http ://kida.obs.u-bordeaux1.fr/)

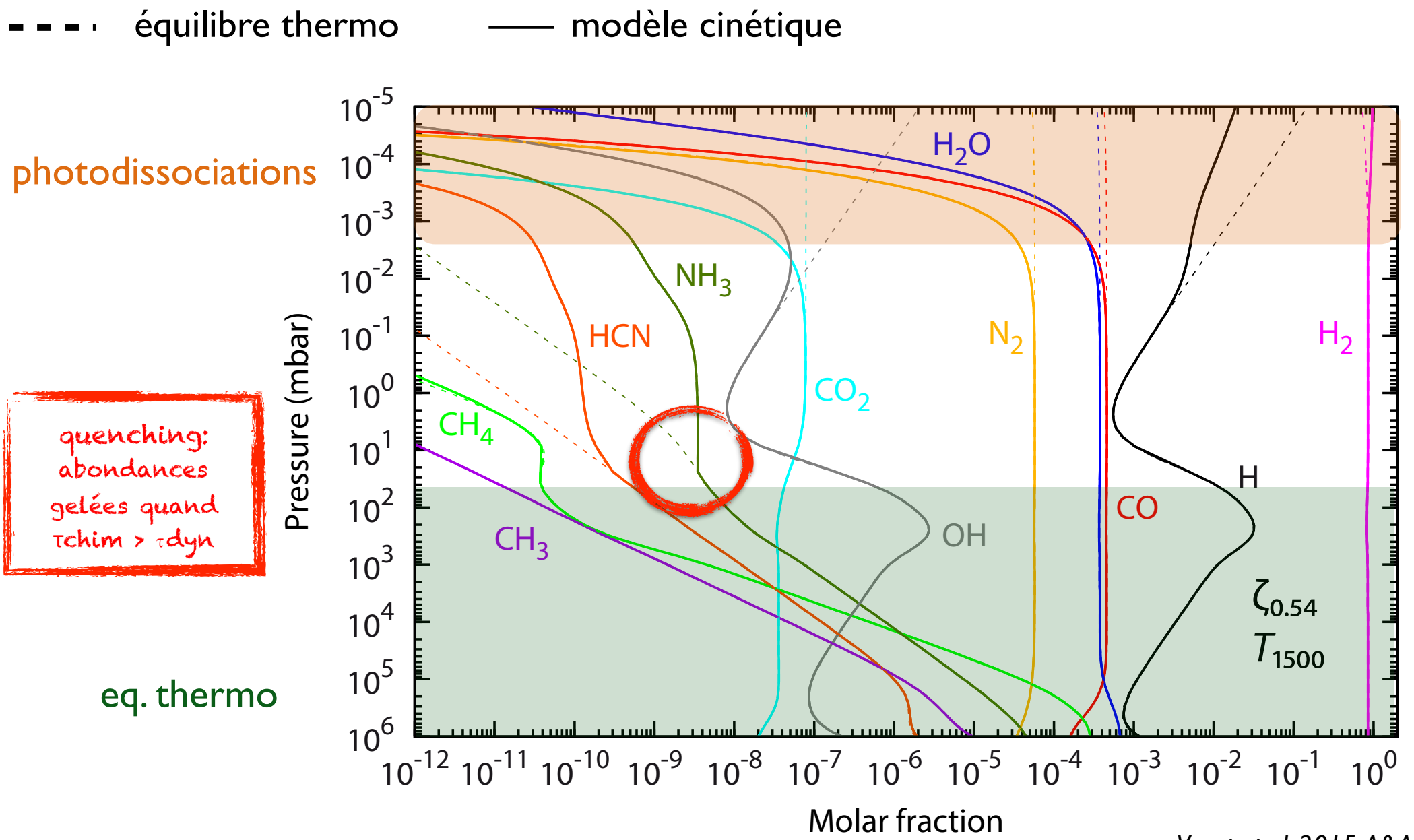
Modèle 1D : effet de K_{zz}

- - - équilibre thermo —— modèle cinétique



Venot et al. 2015, A&A

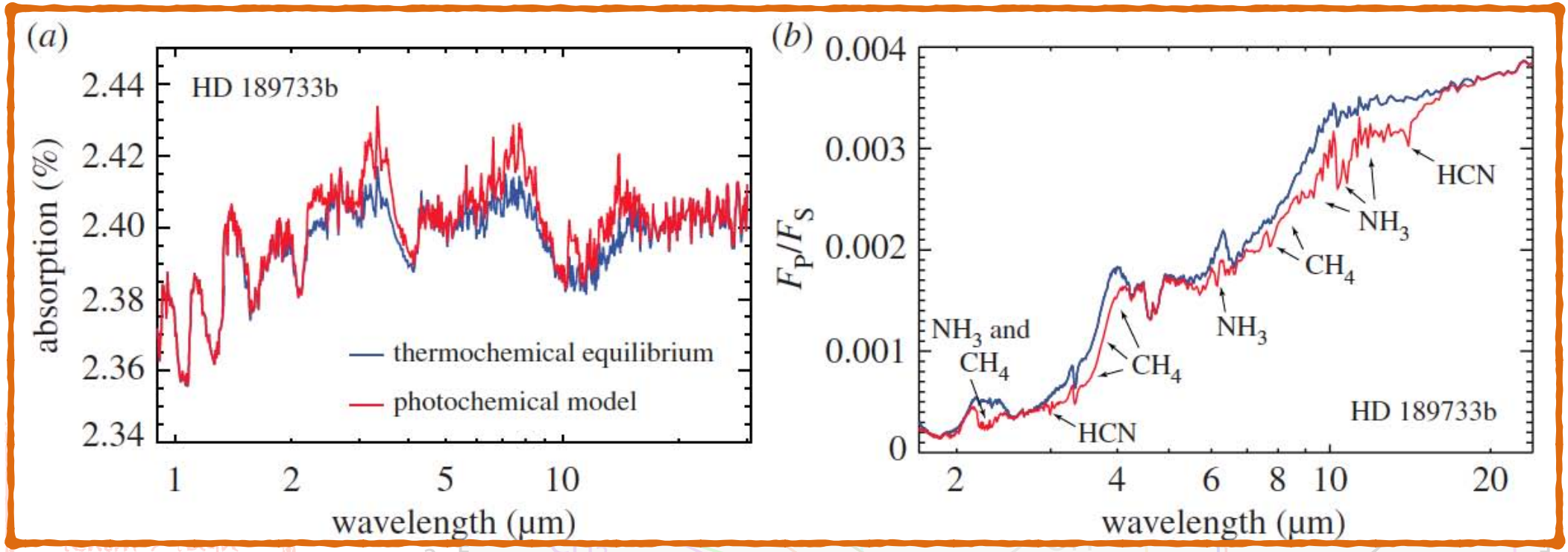
Modèle 1D : effet de K_{zz}

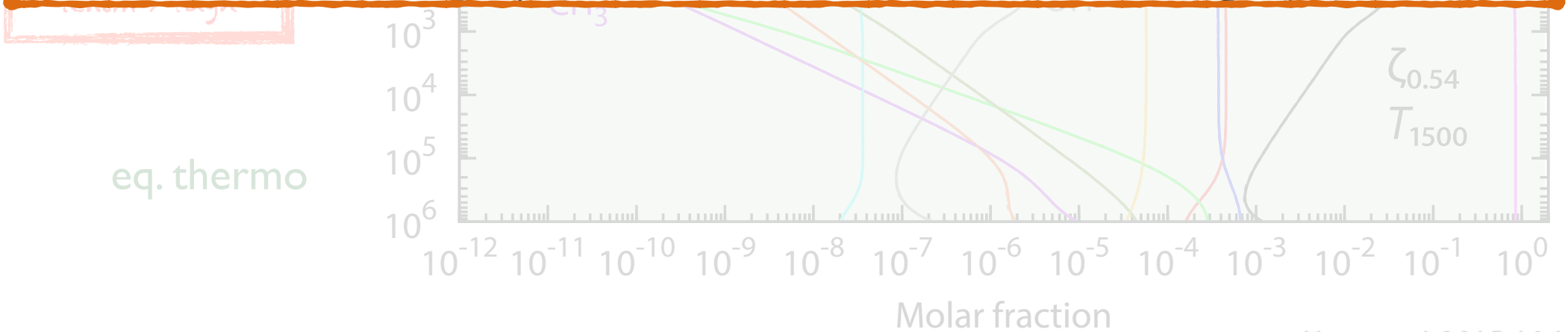


Venot et al. 2015, A&A

Modèle 1D : effet de K_{zz} et hν

équilibre thermo — modèle cinétique





Venot et al. 2015, A&A

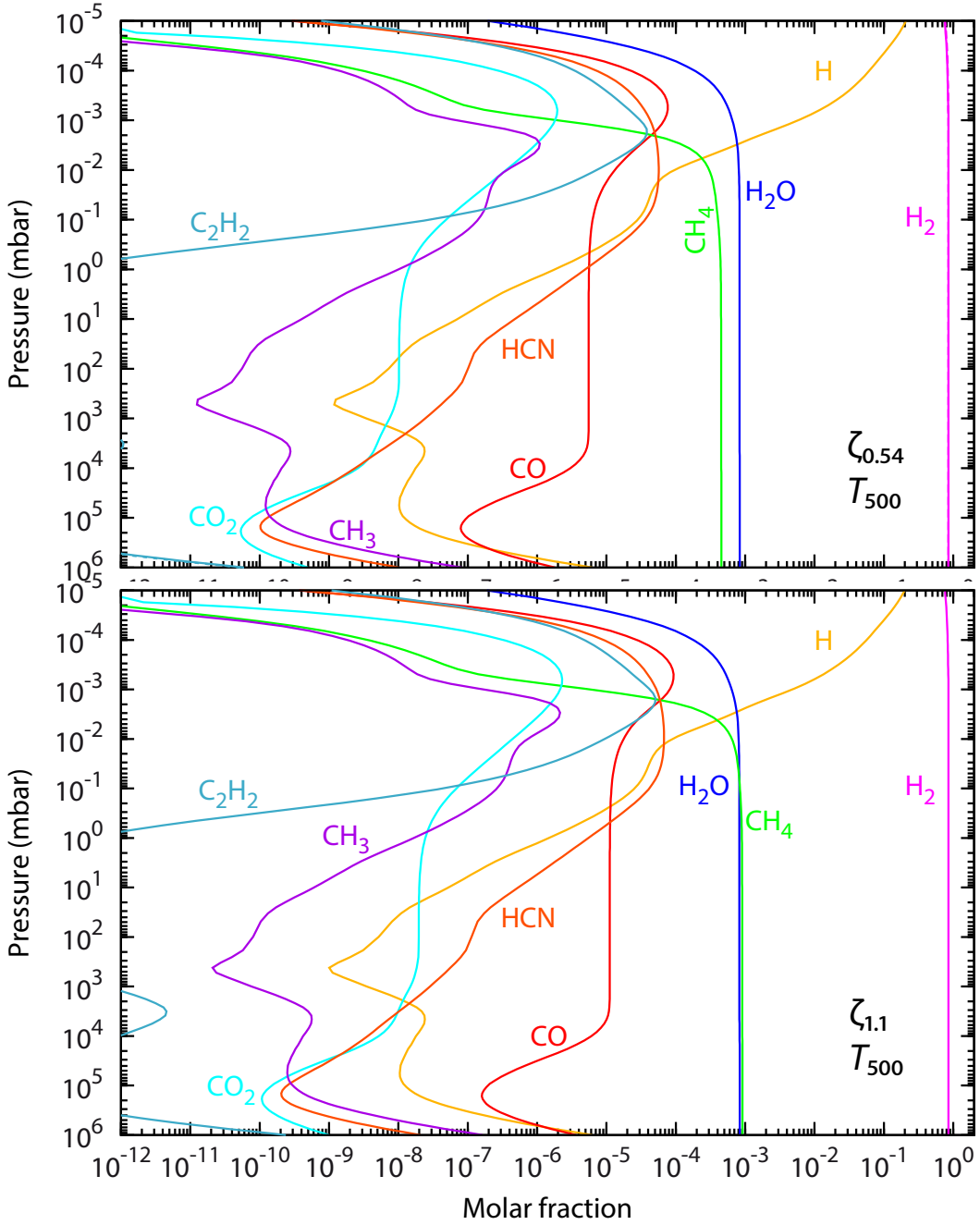
Beaucoup de paramètres influencent la composition chimique:

- température
- métallicité
- rapport d'abondances élémentaires (C/O)
- irradiation de l'étoile

leur effets peuvent être couplés et décuplés par le mélange vertical

→ **forte influence sur la composition**
→ **difficile de prédire par avance**

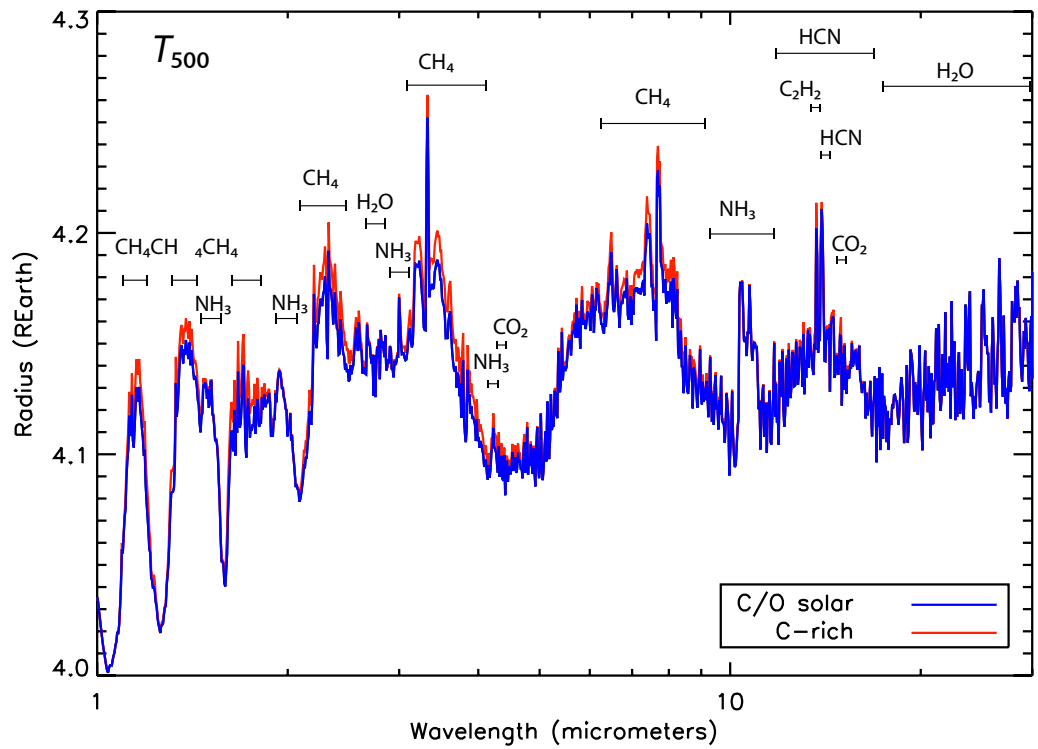
Composition élémentaire : C/O



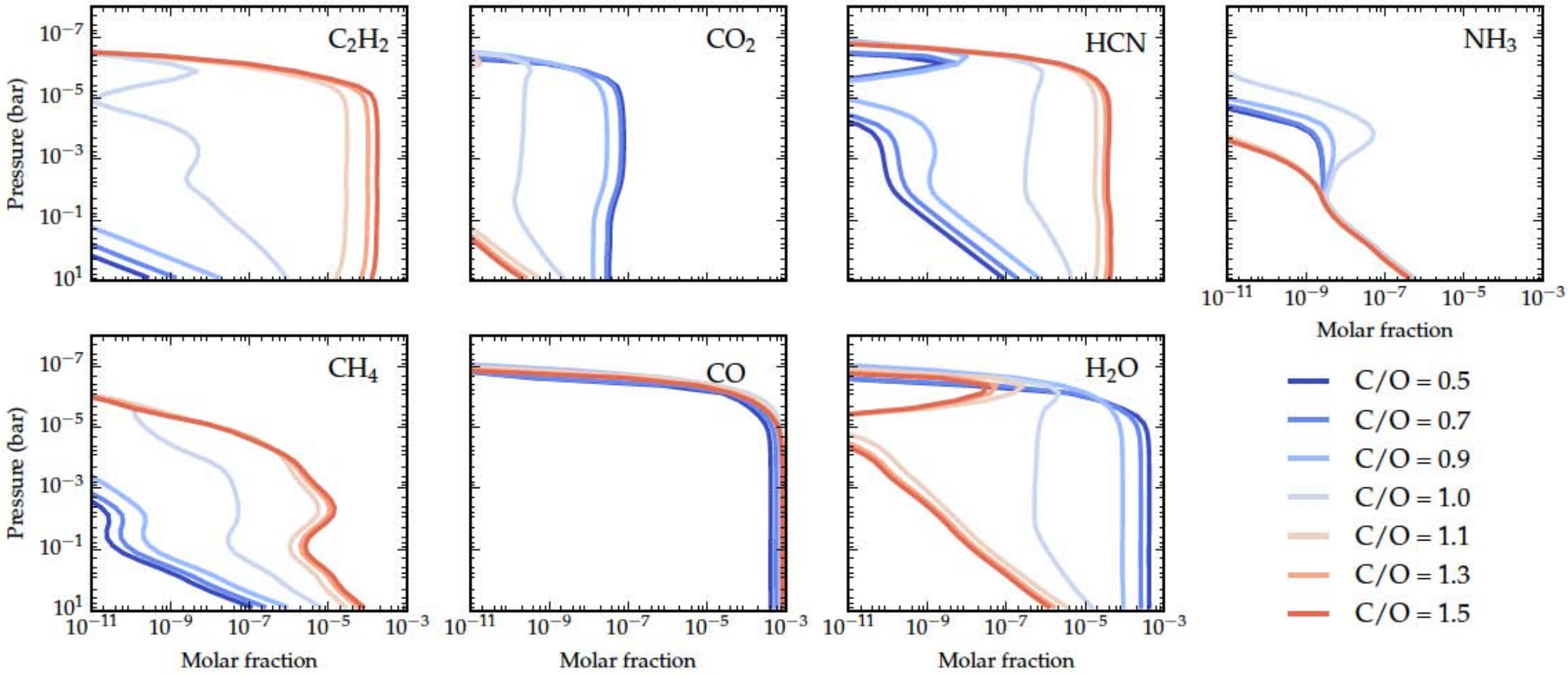
- C/O = 0.54 (solaire)
- C/O = 1.1

@500 K (T moyenne):
- C/O a peu d'effet sur la composition chimique
- spectres très similaires

Venot et al. 2015, A&A



Composition élémentaire : C/O



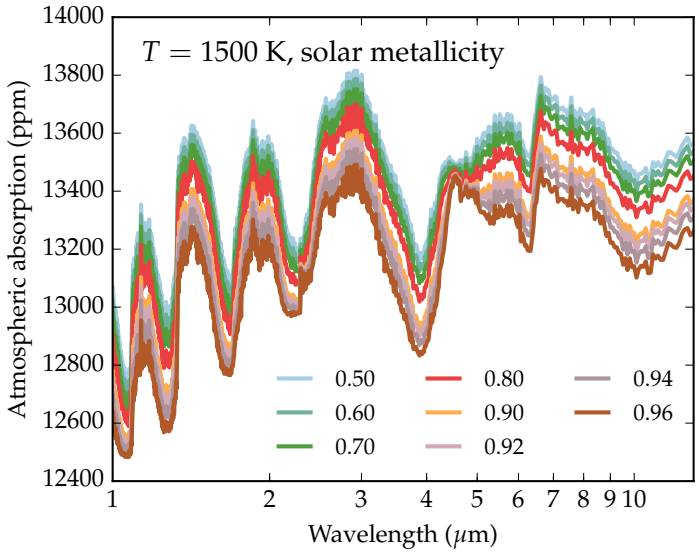
@1500 K (haute T):

- effet énorme sur la composition chimique (C_2H_2, CH_4, HCN, H_2O)

- spectres très différents !

Rocchetto, Waldmann, Venot et al. in press, ApJ

Composition élémentaire : C/O

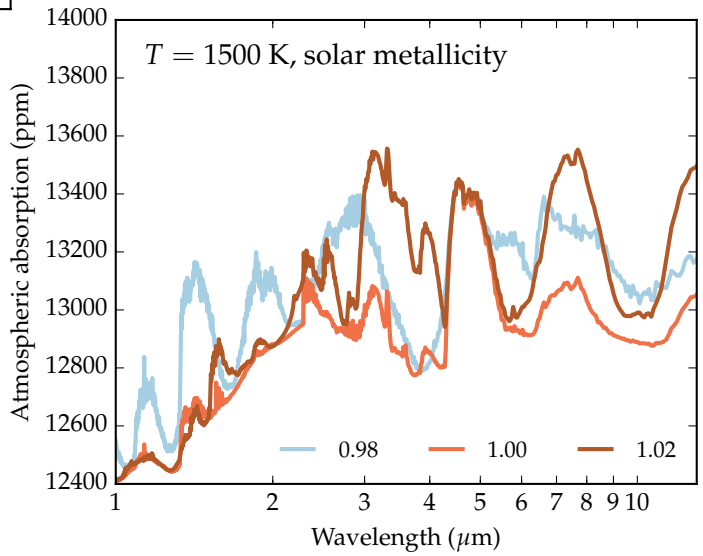


⇒C/O < 1: forme due principalement à H_2O

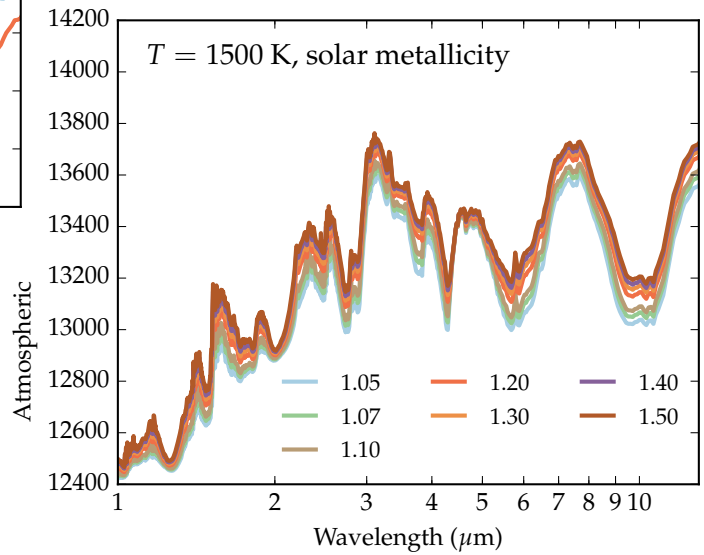
transition drastique autour de C/O=1

⇗

méthode de retrieval (TauRex - UCL) :
facile de distinguer les cas C/O < 1 et C/O > 1 mais plus difficile de déterminer de façon précise C/O



adapté de Rocchetto, Waldmann, Venot et al. in press, ApJ



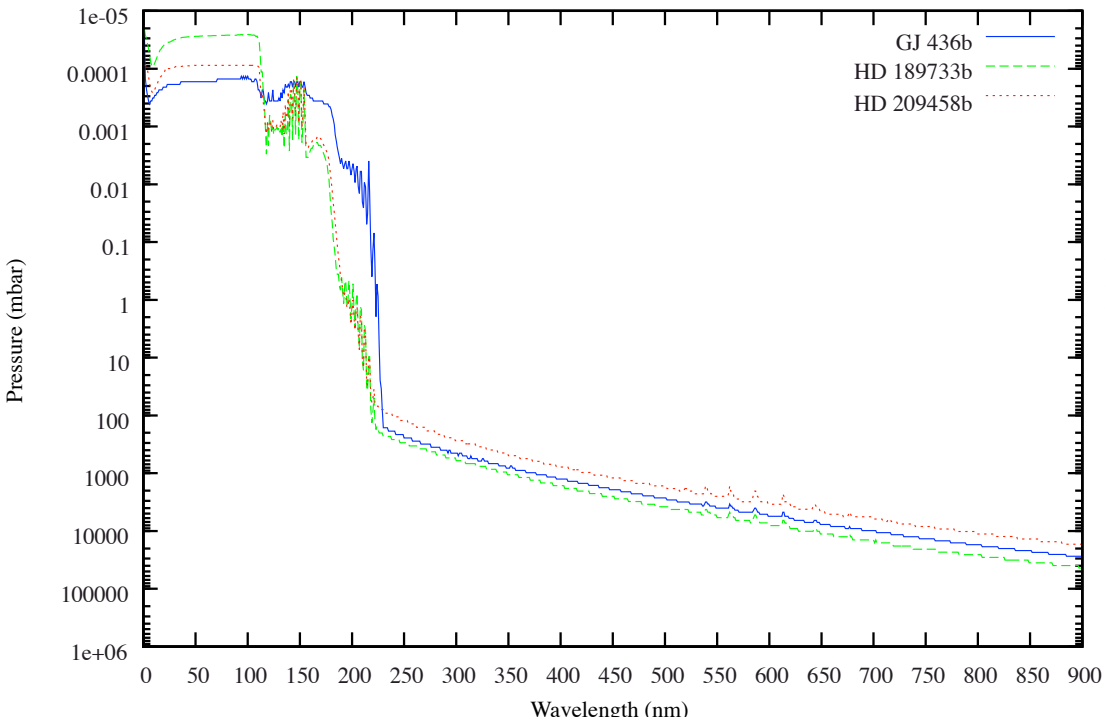
C/O > 1: forme principalement due à CH_4, HCN (et C_2H_2) ⇐

Photodissociations

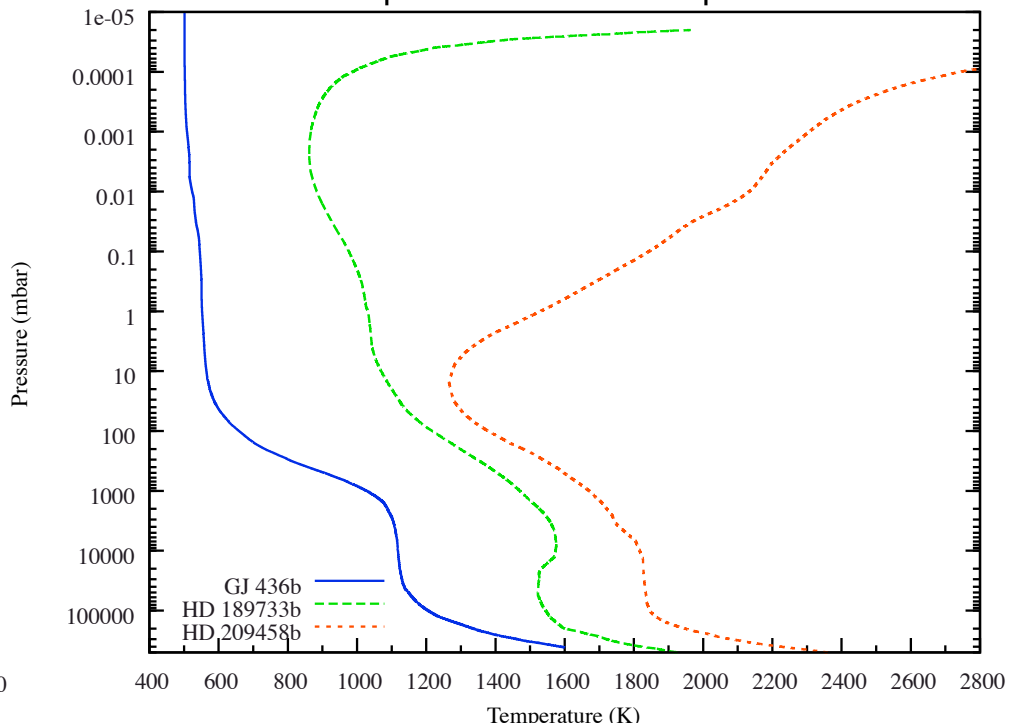
Où les photodissociations ont lieu dans les atmosphères ?

cas de HD189733b, HD209458b (Jupiters Chauds), and GJ436b (Neptune Chaud)

pénétration du flux stellaire (niveau où τ=1)



profils thermiques

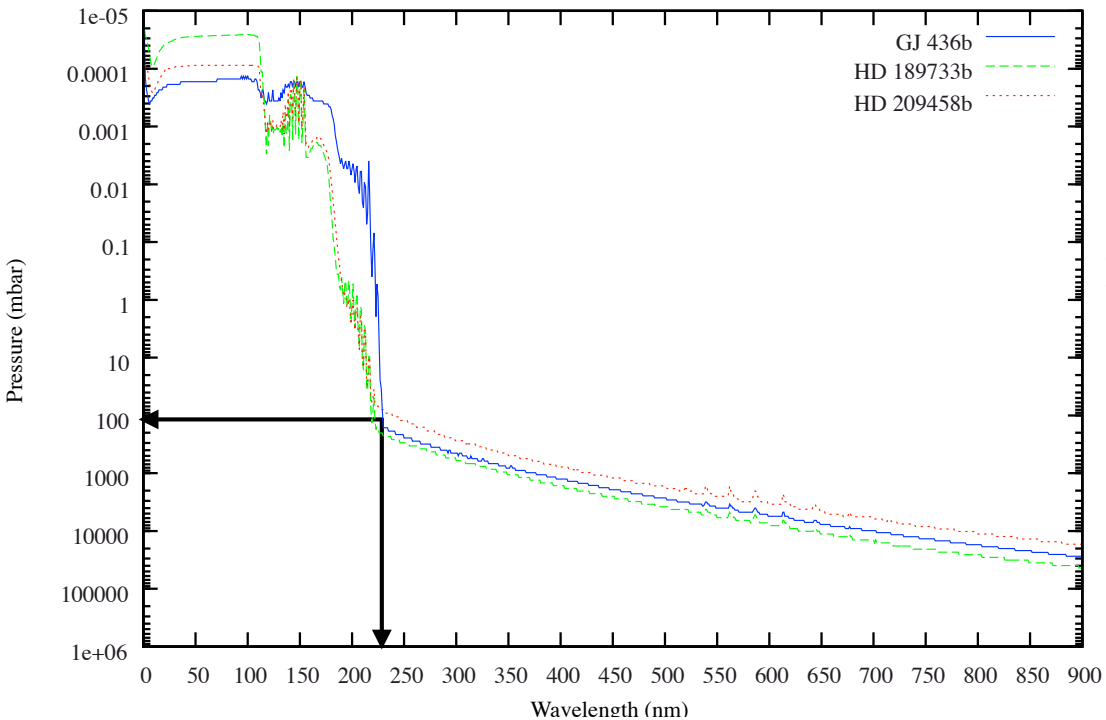


Photodissociations

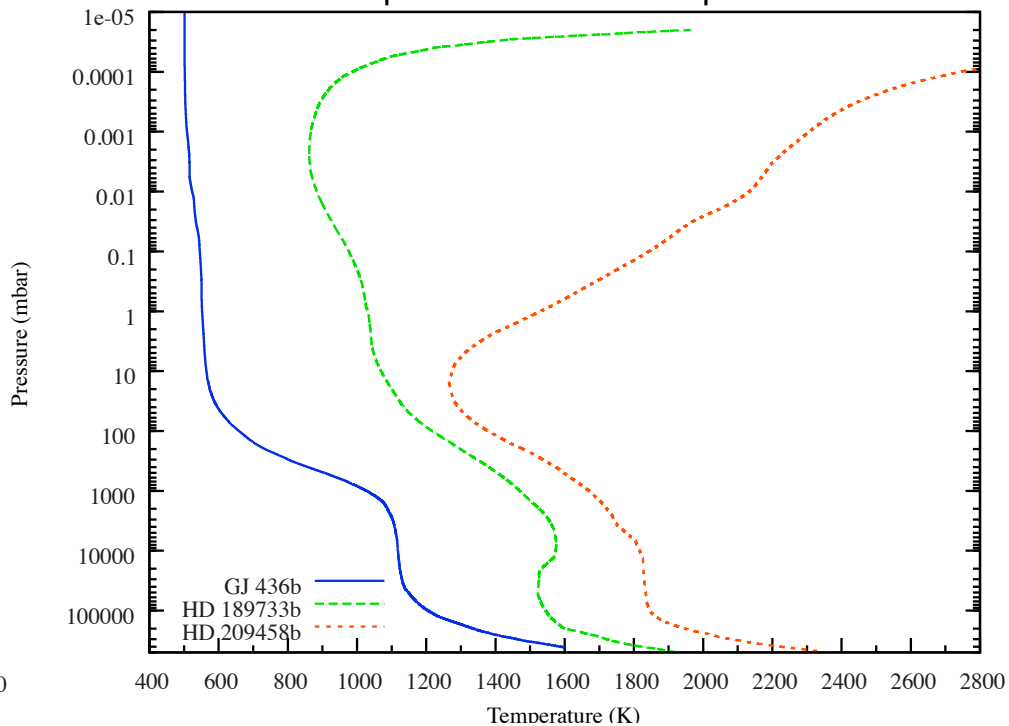
Où les photodissociations ont lieu dans les atmosphères ?

cas de HD189733b, HD209458b (Jupiters Chauds), and GJ436b (Neptune Chaud)

pénétration du flux stellaire (niveau où τ=1)



profils thermiques



λ intéressant : < 250 nm

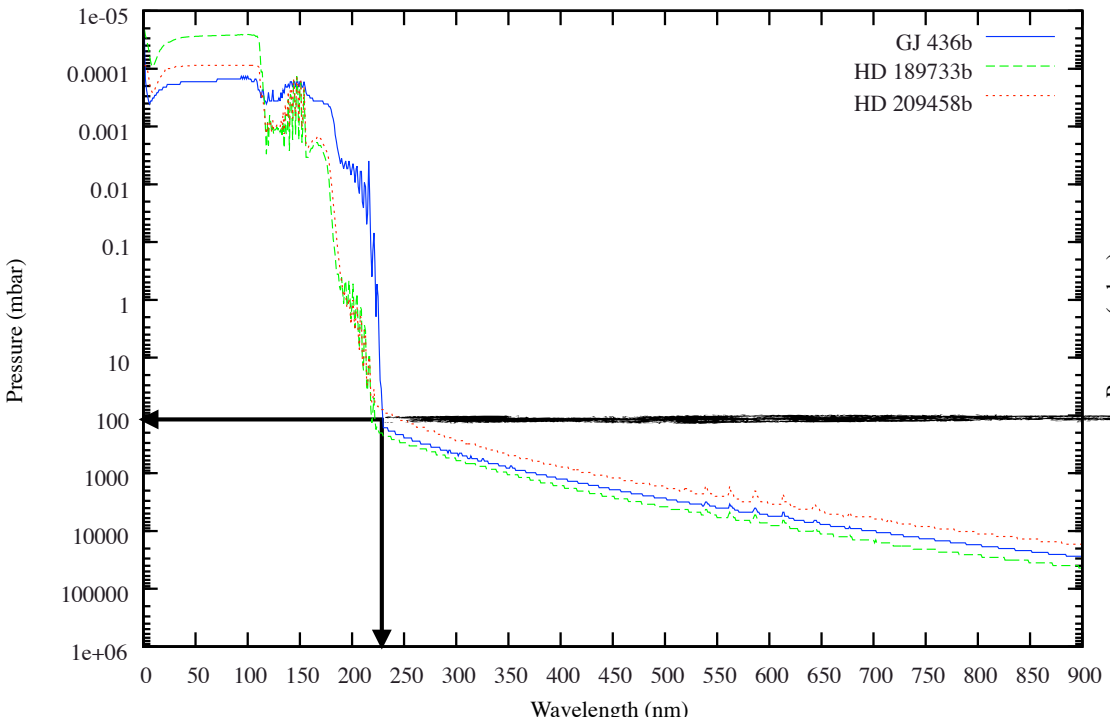
pénètre jusqu'à P < 100 mbar

Photodissociations

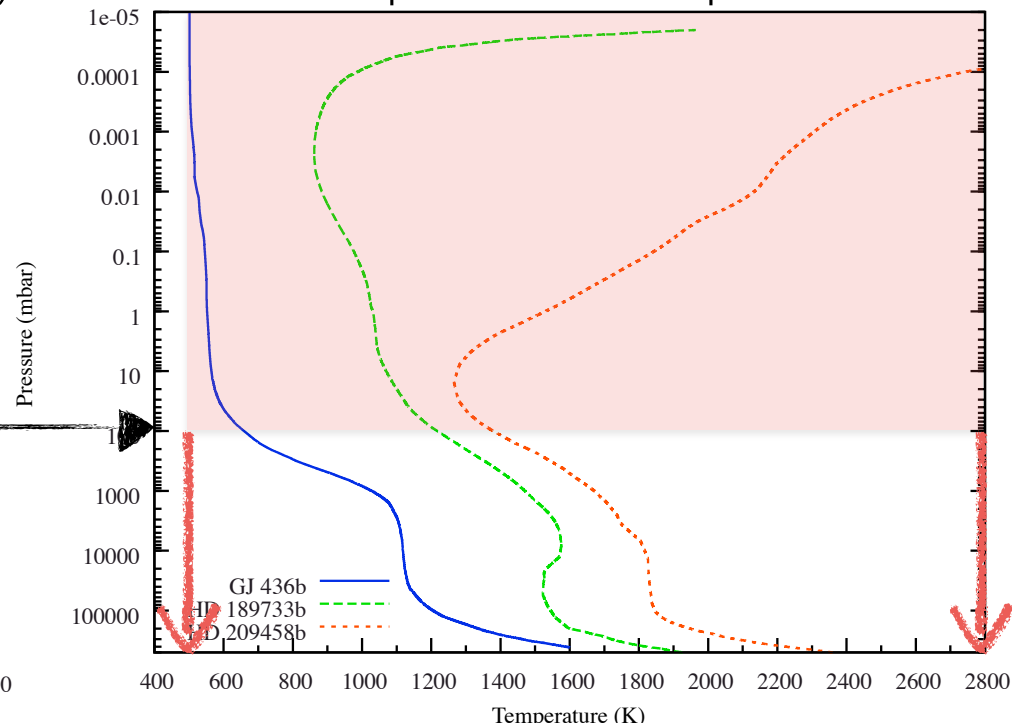
Où les photodissociations ont lieu dans les atmosphères ?

cas de HD189733b, HD209458b (Jupiters Chauds), and GJ436b (Neptune Chaud)

pénétration du flux stellaire (niveau où τ=1)



profils thermiques



λ intéressant : < 250 nm → 500 – 2800 K !

pénètre jusqu'à P < 100 mbar

Section efficace d'absorption VUV

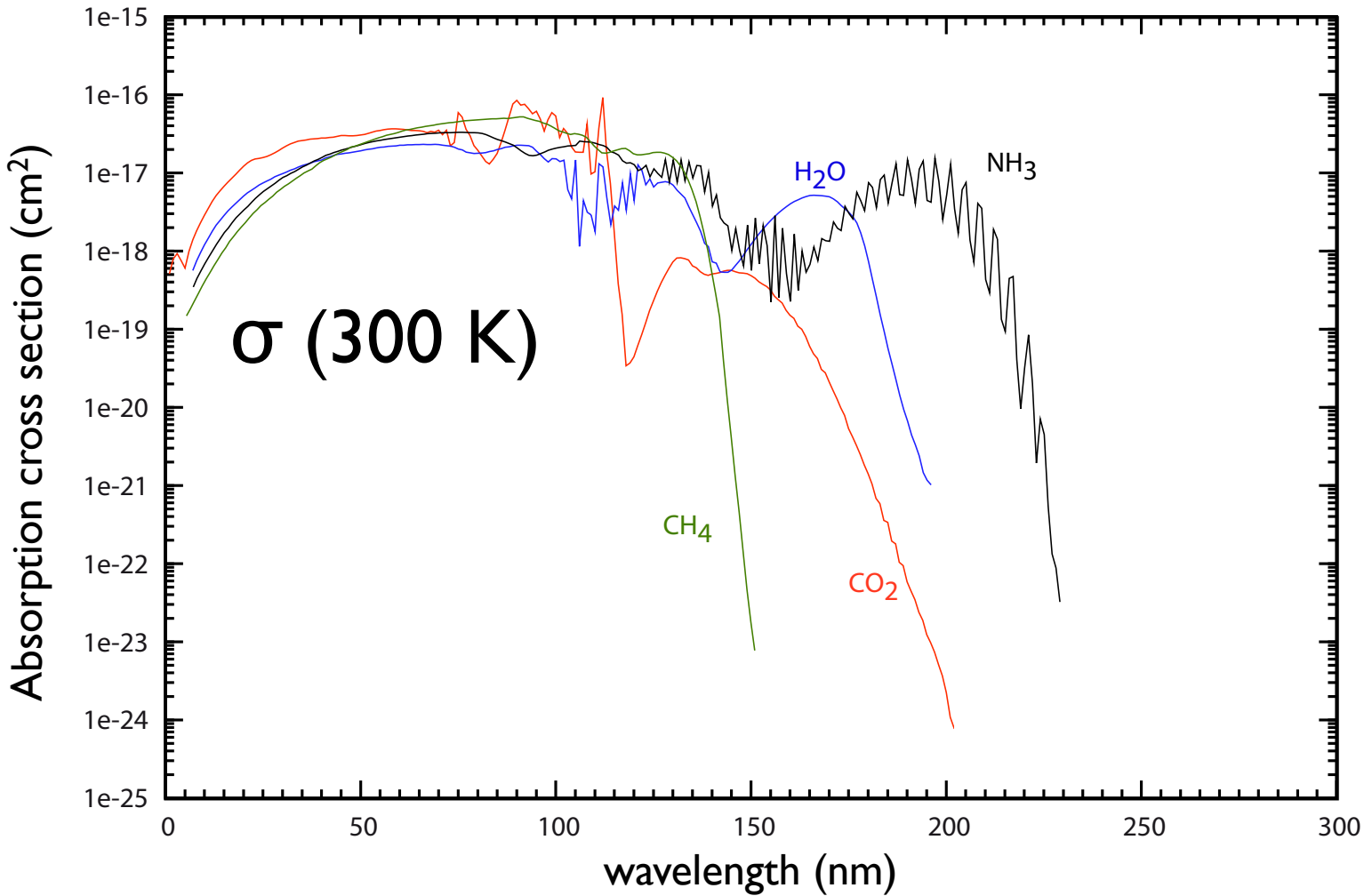
σ(λ,T) : capacité à absorber le flux

Taux de photodissociations :

$$J^k(z) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sigma(\lambda, T) F(\lambda, z) q_k(\lambda, T) d\lambda$$

Flux actinique :

$$F(\lambda, z) = F_0(\lambda) \exp\left(-\sigma(\lambda, T) \int_z^{\infty} n(h) dh\right)$$



Section efficace d'absorption VUV

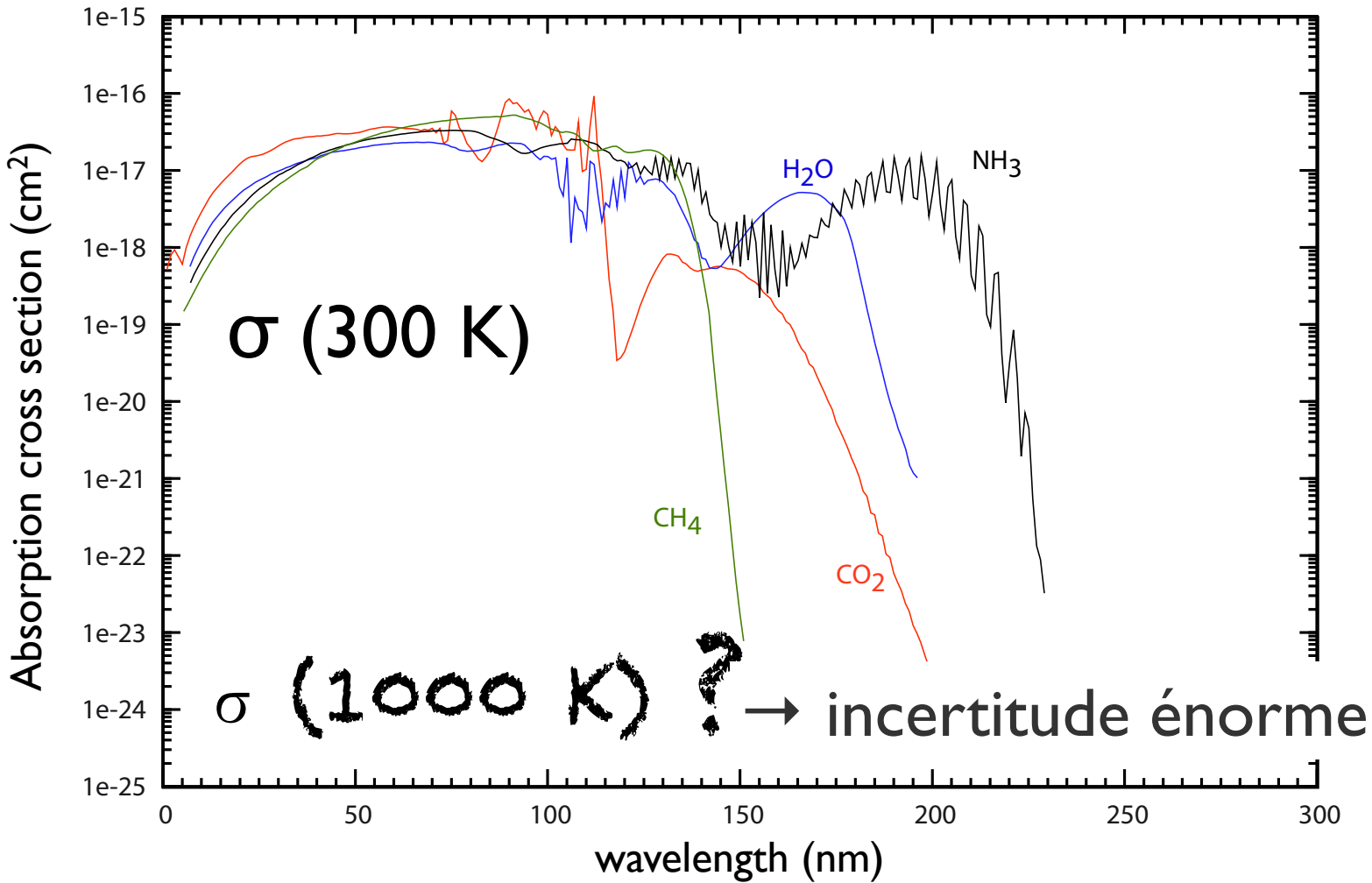
σ(λ,T) : capacité à absorber le flux

Taux de photodissociations :

$$J^k(z) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sigma(\lambda, T) F(\lambda, z) q_k(\lambda, T) d\lambda$$

Flux actinique :

$$F(\lambda, z) = F_0(\lambda) \exp\left(-\sigma(\lambda, T) \int_z^{\infty} n(h) dh\right)$$



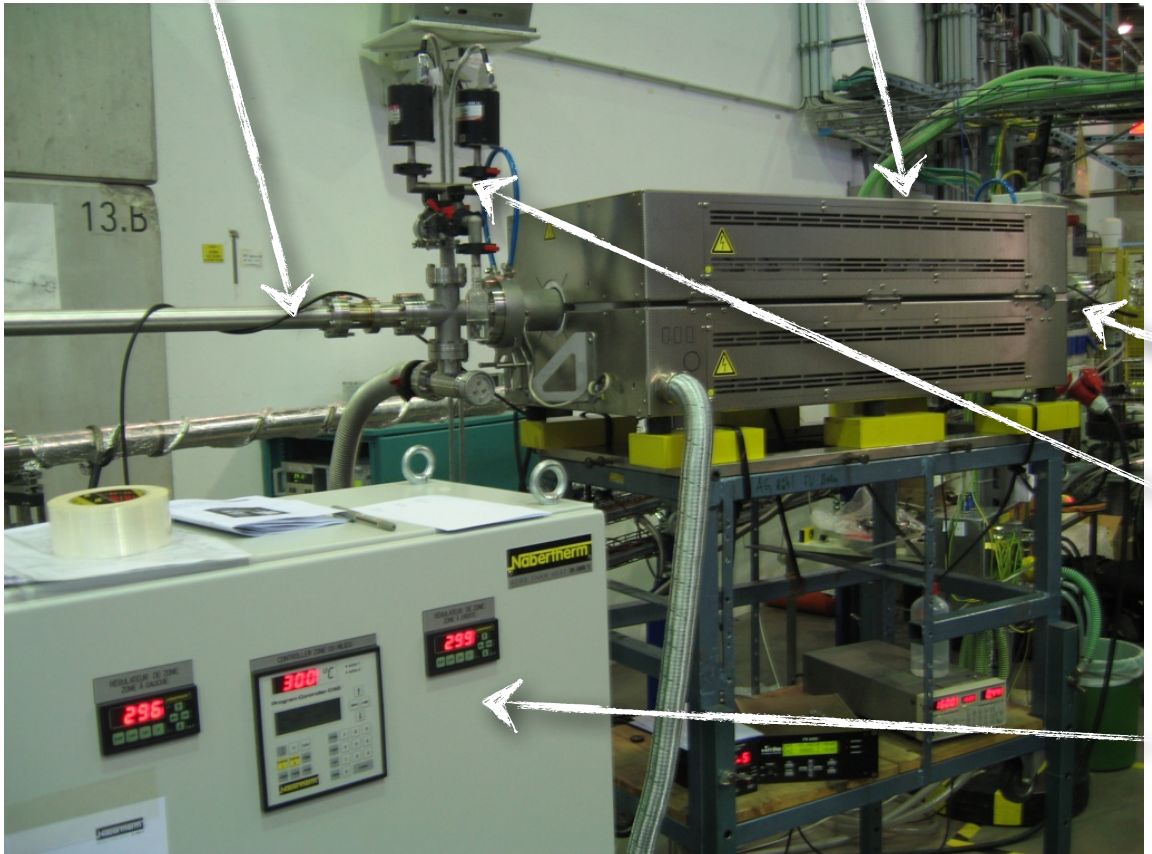
Section efficace d'absorption VUV

<u>dispositif expérimental :</u>

T jusqu'à 1200K

flux monochromatique incident

four + cellule



115-230 nm

centres synchrotron
BESSY / SOLEIL
$115 < \lambda < 190$ nm

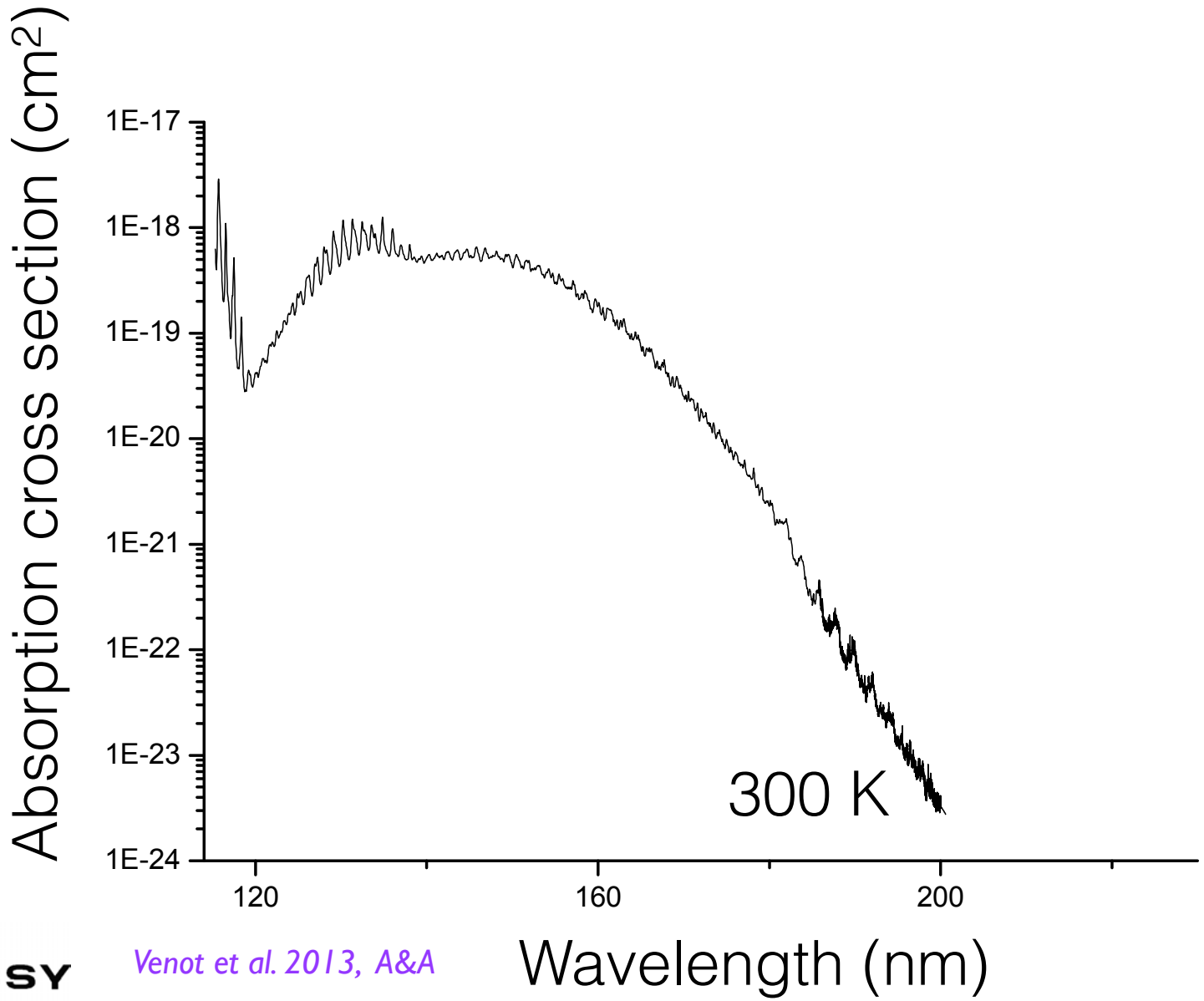
lampe UV au LISA
$190 < \lambda < 230$ nm

photomultiplicateur

injection de gaz

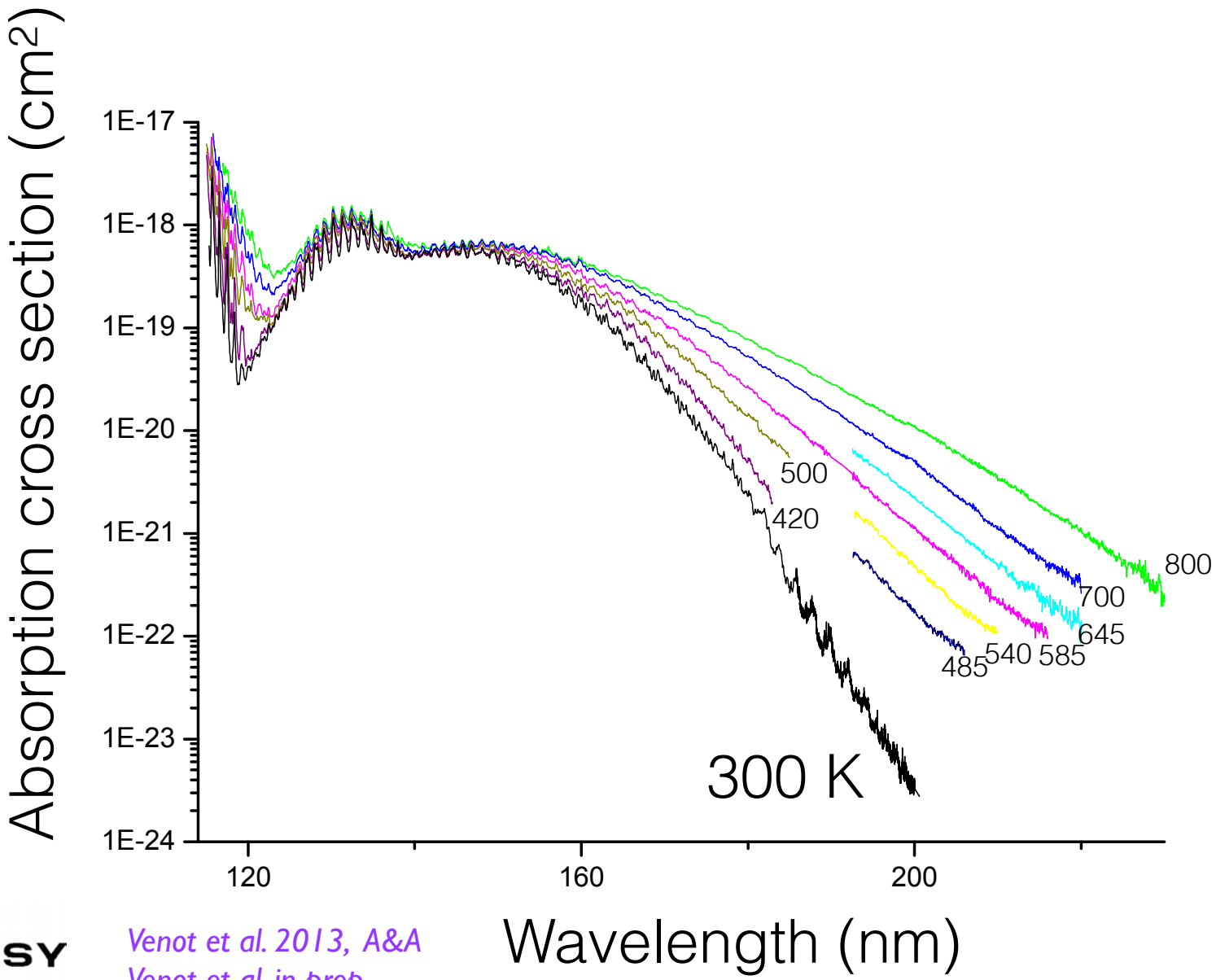
contrôle de température (3 zones)

Section efficace d'absorption du CO_2



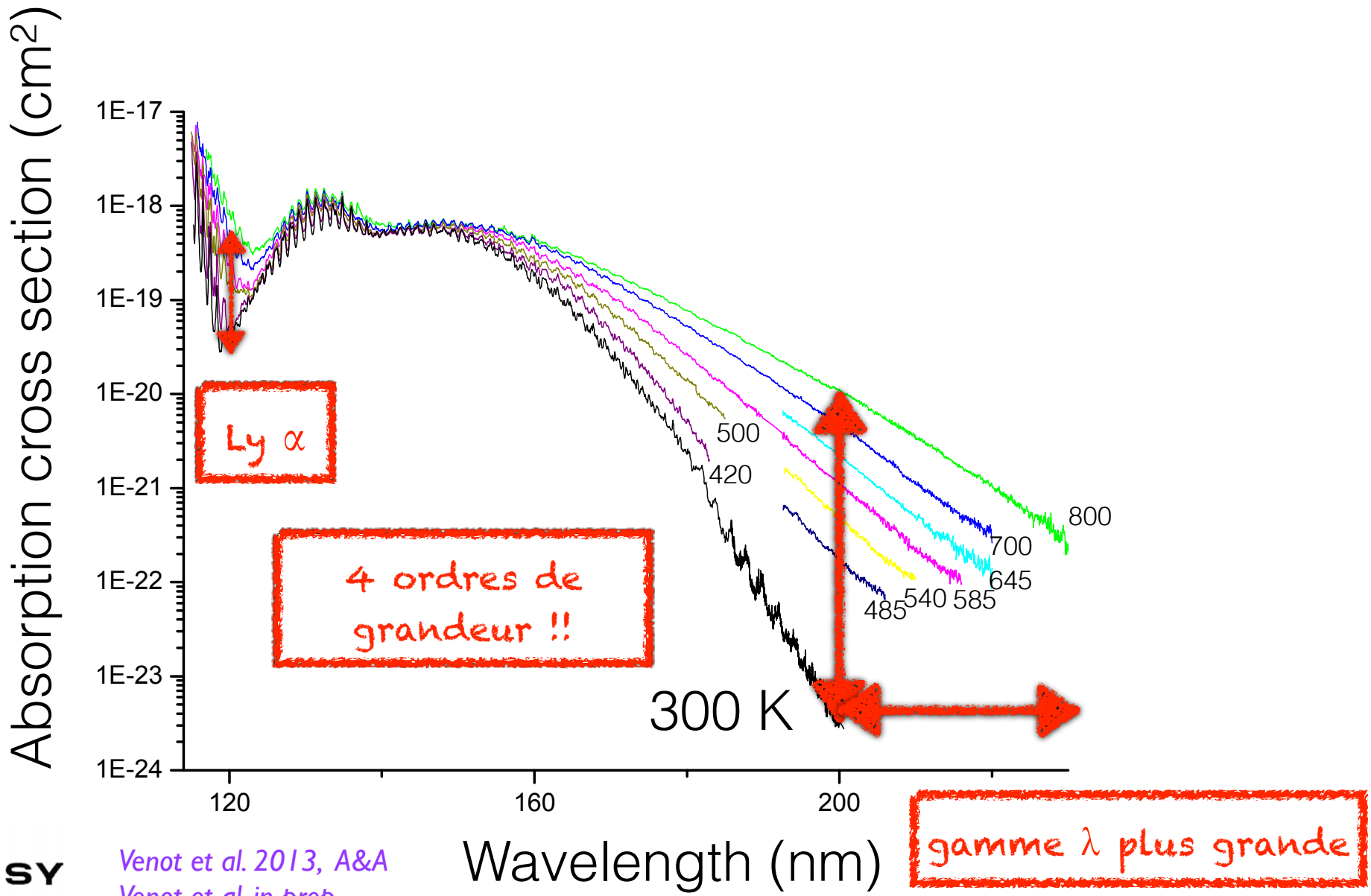
Venot et al. 2013, A&A

Section efficace d'absorption du CO_2



Venot et al. 2013, A&A
Venot et al. in prep.

Section efficace d'absorption du CO_2



BESSY

Venot et al. 2013, A&A
Venot et al. in prep.

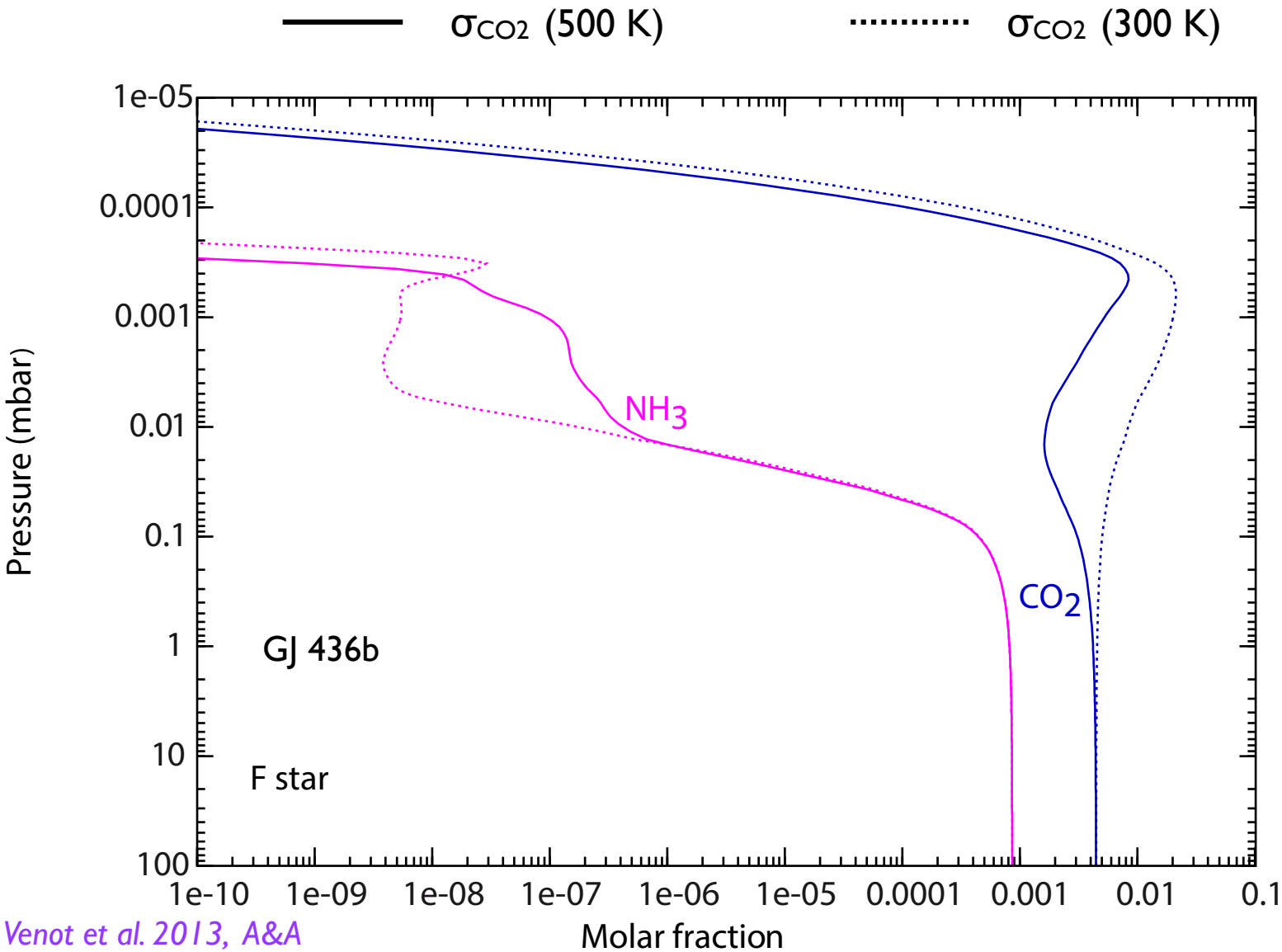
Conséquences sur l'atmosphère

Neptune chaud orbitant autour d'une étoile de type F
$T_{atm} \approx$ 500 K (P < 100 mbar)

influence du flux UV: interaction complexe entre molécules

modélisation correcte de la photochimie → essentiel d'avoir les données à haute T

utilisation des données à T ambiante → sous ou sur-estimation des photodissociations !



Venot et al. 2013, A&A

Conclusions

- modèle cinétique 1D pour étudier atmosphère exoplanètes chaudes + schéma chimique haute température très robuste

  ➡ *prochaine étape* : développer un schéma chimique réduit pour modèles 2D / 3D
  semble difficile car réactions de combustion sont très spécifiques et non généricables. chaque réaction individuelle est nécessaire…

- mesures expérimentales de sections efficaces d'absorption VUV à haute T (CO_2 OK - NH_3, C_2H_2 et HCN en cours)

  ➡ *prochaine étape* : développer notre plateforme spectrométrie UV au LISA
  nous permettra de réaliser nos mesures de façon quotidienne, sans être tributaire des attributions bi-annuelles de temps de faisceau en synchrotron
  financement DIM-ACAV (PI: M. Schwell) + ANR JC-JC (? PI: O. Venot)