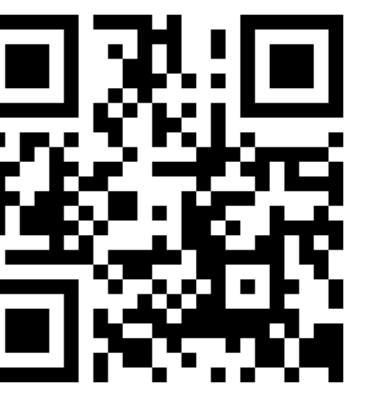


# Une chaîne d'outils ouverts pour la simulation du transfert radiatif dans les atmosphères planétaires

Vincent Eymet [vincent.eymet@meso-star.com](mailto:vincent.eymet@meso-star.com)  
Richard Fournier (Laplace)

| Més o | Star >  
Understanding Complex Systems



Codes et bases de données maintenus et mis à disposition par *Més o-Star* : (<http://www.meso-star.com>) sous la license CeCILL.

## Cadre d'utilisation :

- ★ Analyse des échanges radiatifs dans le but d'améliorer les codes de production
- ★ Tests d'hypothèses, de modèles physiques, d'algorithmes, etc
- ★ Chaîne prête à l'emploi dans le cadre de l'exploration d'un espace de paramètres (ex : exoplanètes)

## Données spectrales

### ● Production de spectres haute résolution : KSPECTRUM

Donne la possibilité de maîtriser l'incertitude :

- ★ sur les valeurs de  $k(\nu)$  : nécessite de pouvoir prendre en compte toutes les transitions, sans troncature des profils de raie
- ★ sur les valeurs interpolées à partir des résultats : demande un calcul ad-hoc du pas spectral

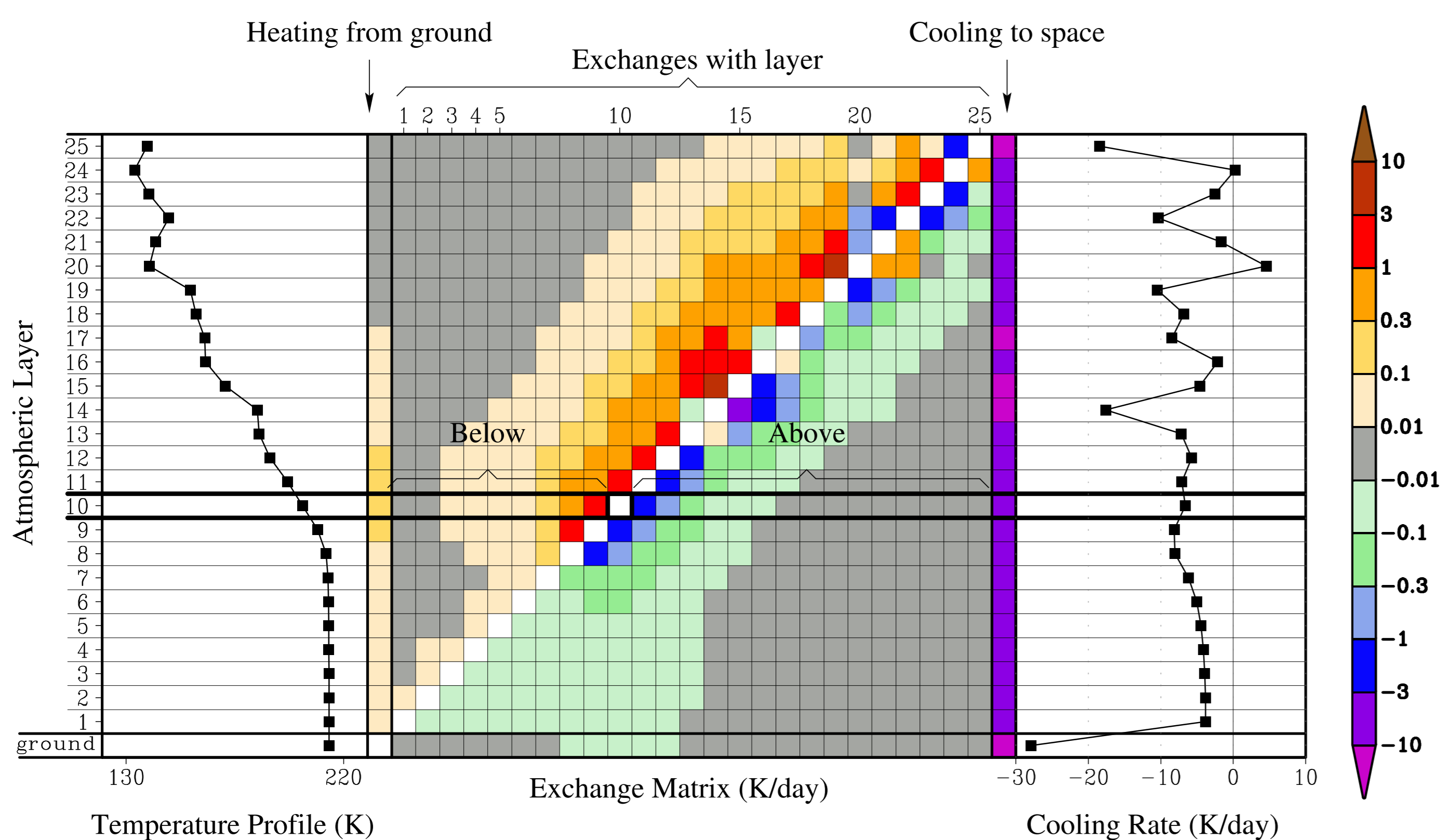
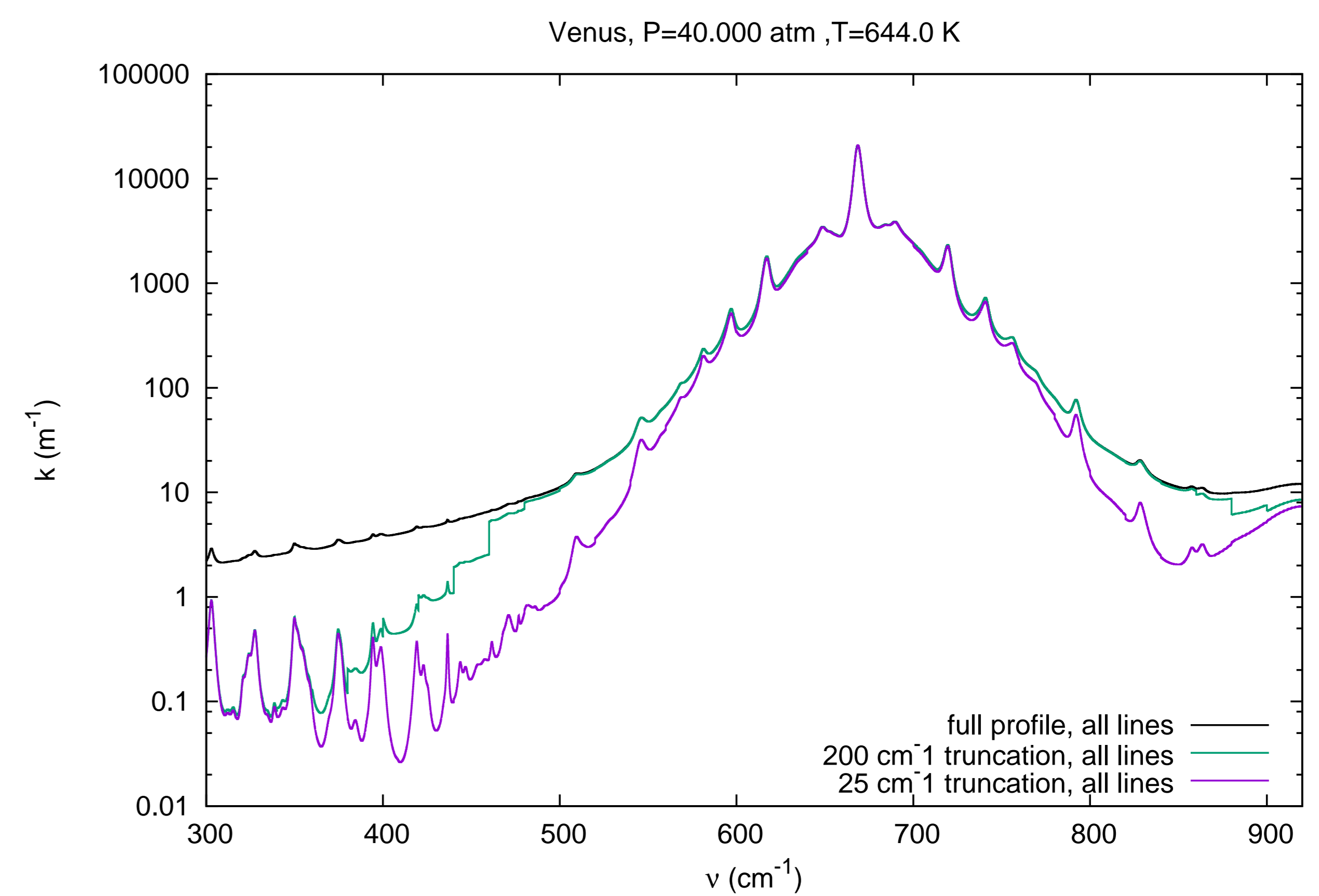
**Applications actuelles** : système solaire [1, 2], Terre primitive [3], exoplanètes [4, 5, 6, 7, 8].

### ● Paramètres de modèles statistiques : KDISTRIBUTION

Utilise les spectres générés par KSPECTRUM pour produire les k-distributions correspondantes.

### ● Base de spectres en haute résolution : HRSD

Ensemble de spectres calculés pour  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $NO$  et  $NO_2$  (par espèce) à l'aide de HITRAN-2004, sur une grille (P/T/x) dans les limites suivantes :  $P \in [0.4-40]$  bars,  $T \in [300-1500]$  K et  $x \in [0.01-1]$ .



## Transfert radiatif "slab"

- KARINE : Simulation de transfert radiatif (flux, bilans, carte de PNE) basé sur l'utilisation d'algorithmes de Monte-Carlo, en géométrie plan-parallèle.
  - ★ Formalisme Puissances Nettes Echangées
  - ★ Absorption, diffusion multiple
  - ★ Modèle spectral : k-distributions (plage LW)
- Applications** : Terre, Vénus [1]
- Toy-models (solutions analytiques) : atmosphères non diffusantes. Permet l'utilisation directe des spectres haute résolution (signal de flux TOA, fonction de contribution).

## Transfert radiatif 3D

Planet EMC : modélisation du transfert radiatif pour une géométrie sphérique.

Permet de traiter les effets 3D dans une atmosphère absorbante et diffusante inhomogène.

- ★ Algorithmes de Monte-Carlo différents selon la source (LW/SW)
- ★ Prise en compte possible de nuages 3D
- ★ Utilisation du modèle spectral en k-distributions
- ★ Utilisation de solutions analytiques pour l'optimisation spectrale

## Applications :

- ★ Courbes de phase pour la Terre et exoplanètes (LAB)
- ★ Vénus (LMD 2014, en cours de publication)
- ★ Transit de Vénus

(earthorbitvisible.u3d)

## Références

- [1] V. Eymet, R. Fournier, J.-L. Dufresne, S. Lebonnois, F. Hourdin, and M.A. Bullock. Net-Exchange parameterization of thermal infrared radiative transfer in Venus' atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 114, E11008, DOI:10.1029/2008JE003276, 2009.
- [2] S. Guerlet, A. Spiga, M. Sylvestre, M. Indurain, T. Fouchet, J. Leconte, E. Millour, R. Wordsworth, M. Capderou, B. Bézard, and F. Forget. Global climate modeling of Saturn's atmosphere. Part I : Evaluation of the radiative transfer model. *Icarus*, 238 :110–124, August 2014.
- [3] B. Charnay, F. Forget, R. Wordsworth, J. Leconte, E. Millour, F. Codron, and A. Spiga. Exploring the faint young Sun problem and the possible climates of the Archean Earth with a 3-D GCM. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 118(D17) :10414, September 2013.
- [4] R. Wordsworth, F. Forget, F. Selsis, J.-B. Madelaine, E. Millour, and V. Eymet. Is gliese 581d habitable? some constraints from radiative-convective climate modeling. *Astronomy and Astrophysics*, DOI : 10.1051/0004-6361/201015053, 2010.
- [5] R. Kopparapu, R. Ramirez, J.F. Kasting, V. Eymet, T.D. Robinson, S. Mahadevan, R.C. Terrien, S. Domagal-Goldman, V. Meadows, and R. Deshpande. Habitable zones around main-sequence stars : new estimates. *Astrophysical Journal*, 765, issue 2, 2013.
- [6] J. Leconte, F. Forget, B. Charnay, R. Wordsworth, F. Selsis, E. Millour, and A. Spiga. 3D climate modeling of close-in land planets : Circulation patterns, climate moist bistability, and habitability. *Astronomy and Astrophysics*, 554 :A69, June 2013.
- [7] B. Samuel, J. Leconte, D. Rouan, F. Forget, A. Léger, and J. Schneider. Constraining physics of very hot super-Earths with the James Webb Telescope. The case of CoRot-7b. *Astronomy and Astrophysics*, 563 :A103, March 2014.
- [8] J. Leconte, F. Forget, B. Charnay, R. Wordsworth, and A. Pottier. Increased insolation threshold for runaway greenhouse processes on Earth-like planets. *Nature*, 504 :268–271, December 2013.