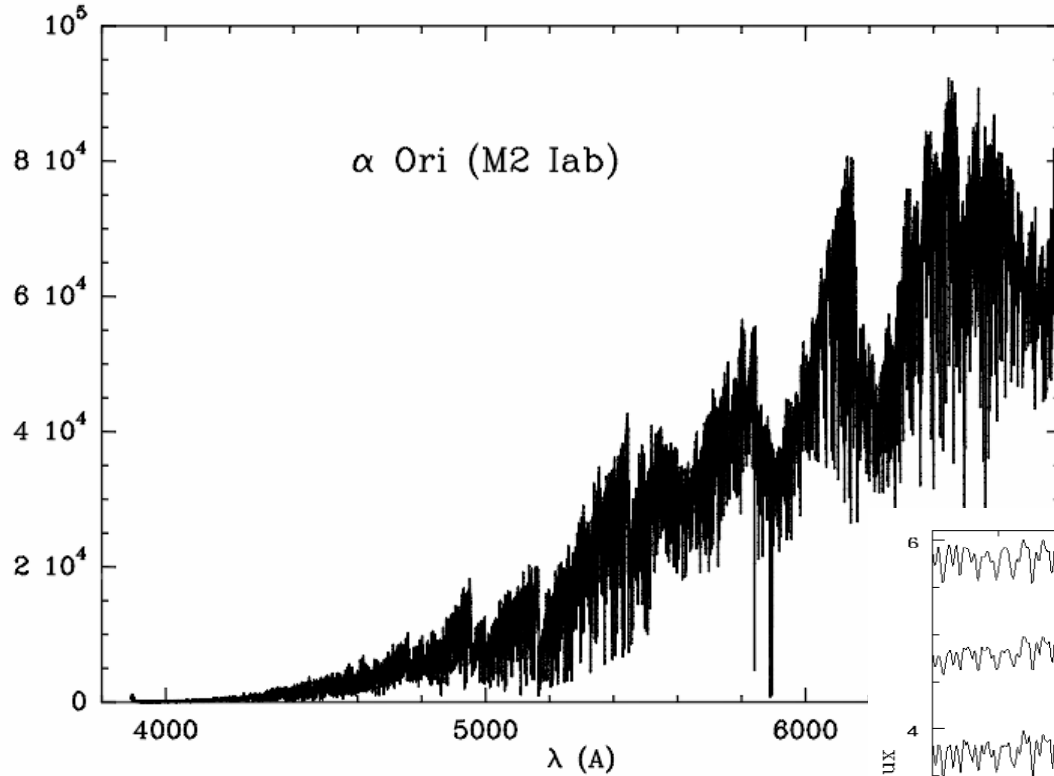


# Opacités d'étoiles froides

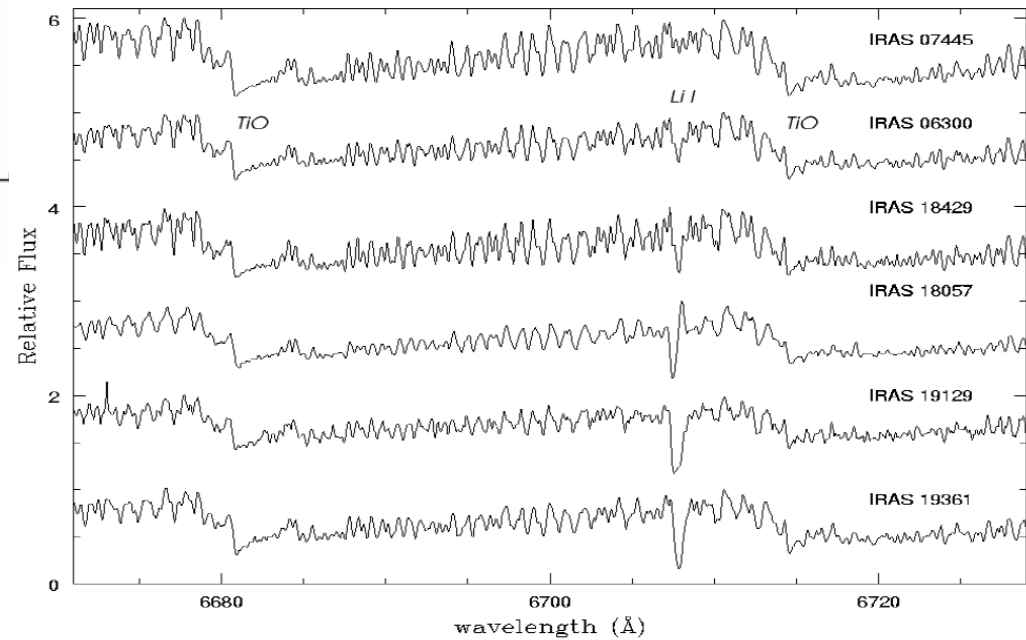
Bertrand Plez  
LUPM, Montpellier



# On observe des spectres

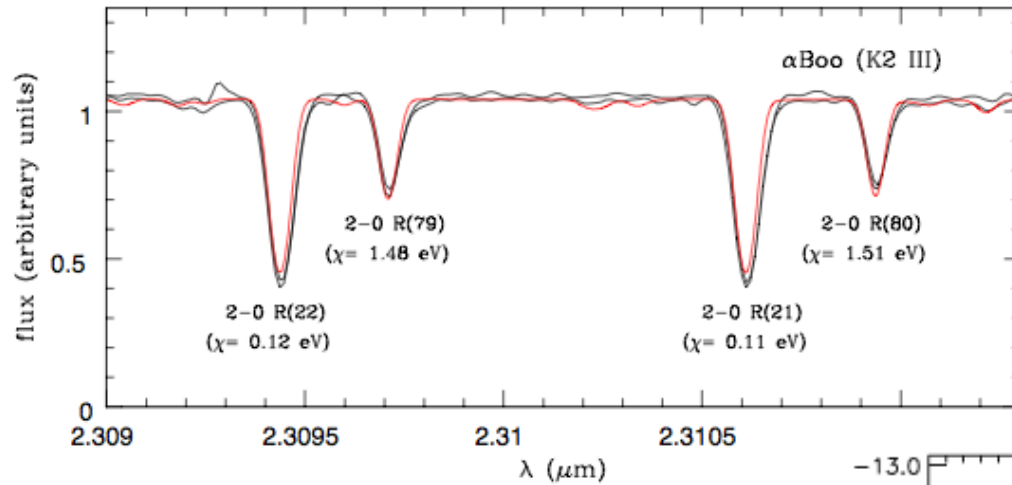


Non, ce n'est pas du  
bruit...

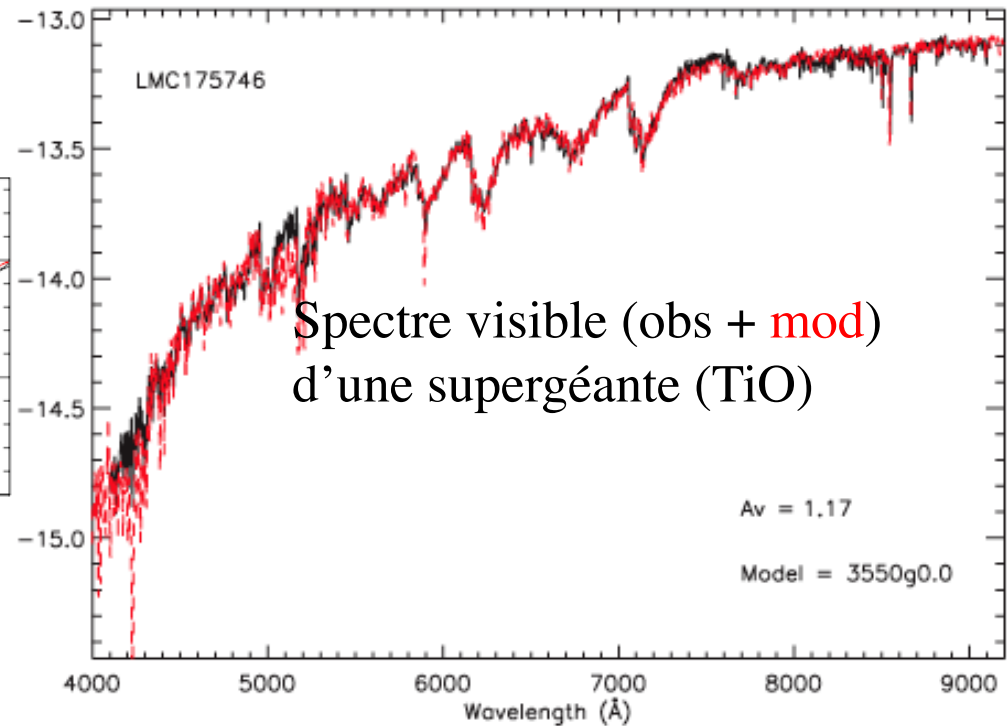
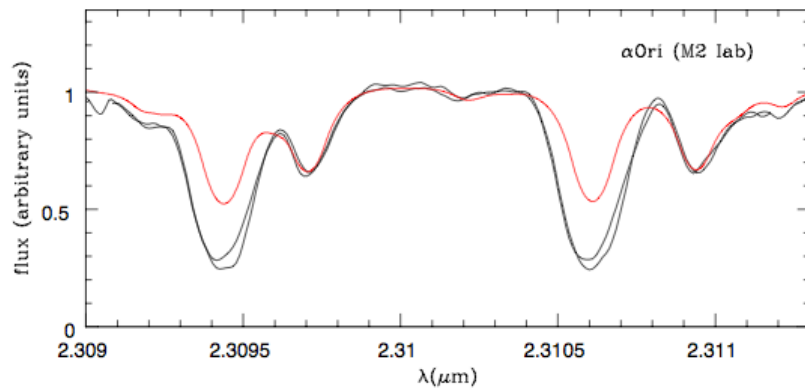


# On les modélise...

...plus ou moins bien



CO dans l'IR



# Modèles d'atmosphères classiques

**classiques = ETL (équilibre thermodynamique local), 1-D, hydrostatiques**

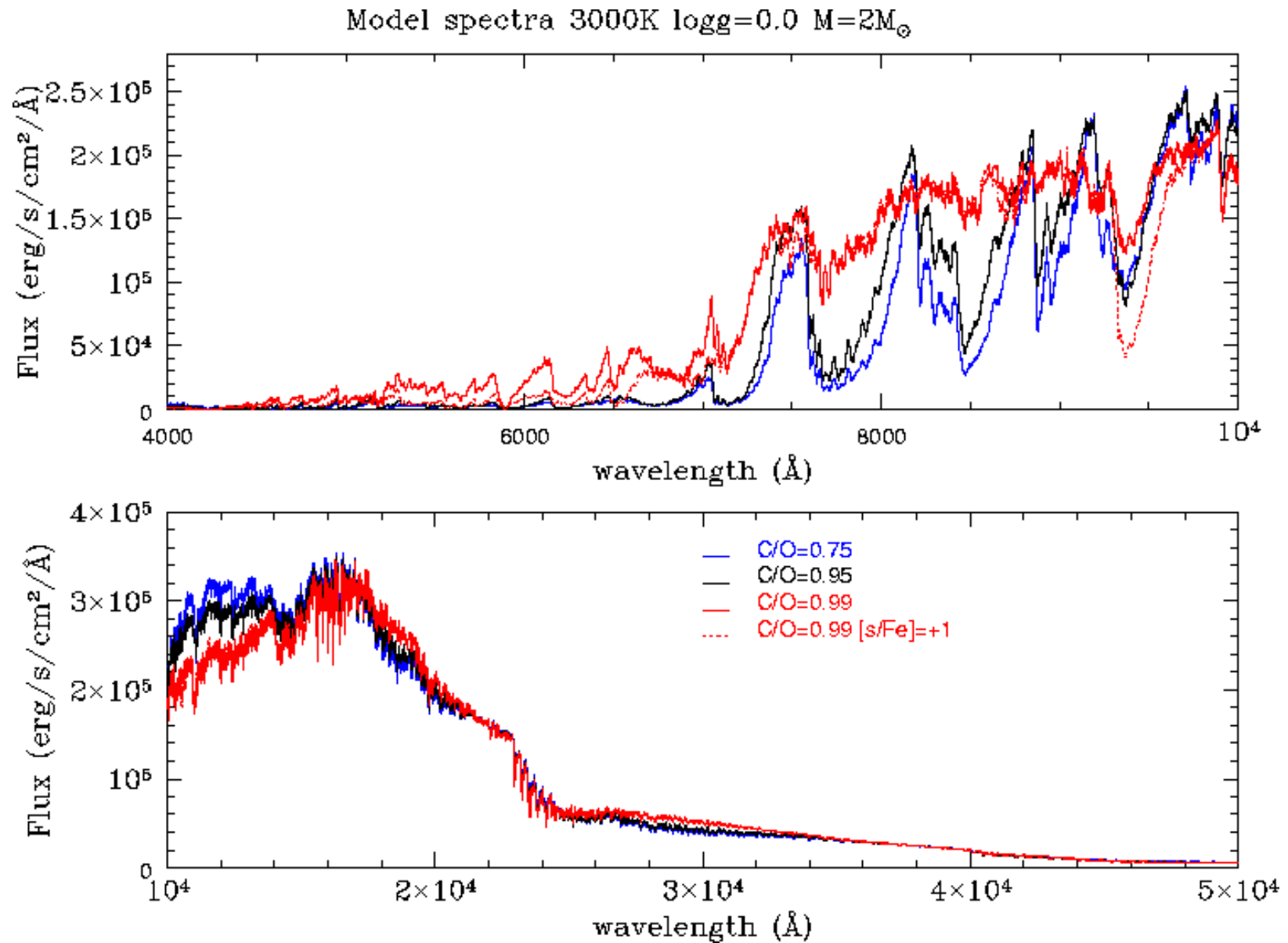
Les étoiles réelles ne sont pas “classiques” !

Mais...

- les modèles classiques incluent des **opacités détaillées**
- Ils servent de **référence** pour des approches plus ambitieuses (3-D, hors-ETL, ...)
- Les spectres d'étoiles froides sont très affectés par les raies moléculaires et **pas encore tous analysés en détail** à l'aide de modèles classiques

NB: développements impressionnants: convection 3D (Asplund et al., Freytag et al.), NETL (Hauschildt et al.), pulsation-poussières-vents (Hoefner et al.).

Exemples de modèles MARCS 1D (hydrostatiques, ETL)  
spectres émergents en f(C/O)



Effet des opacités (cf. effet de serre):

Chauffage en profondeur

Refroidissement/chauffage en surface

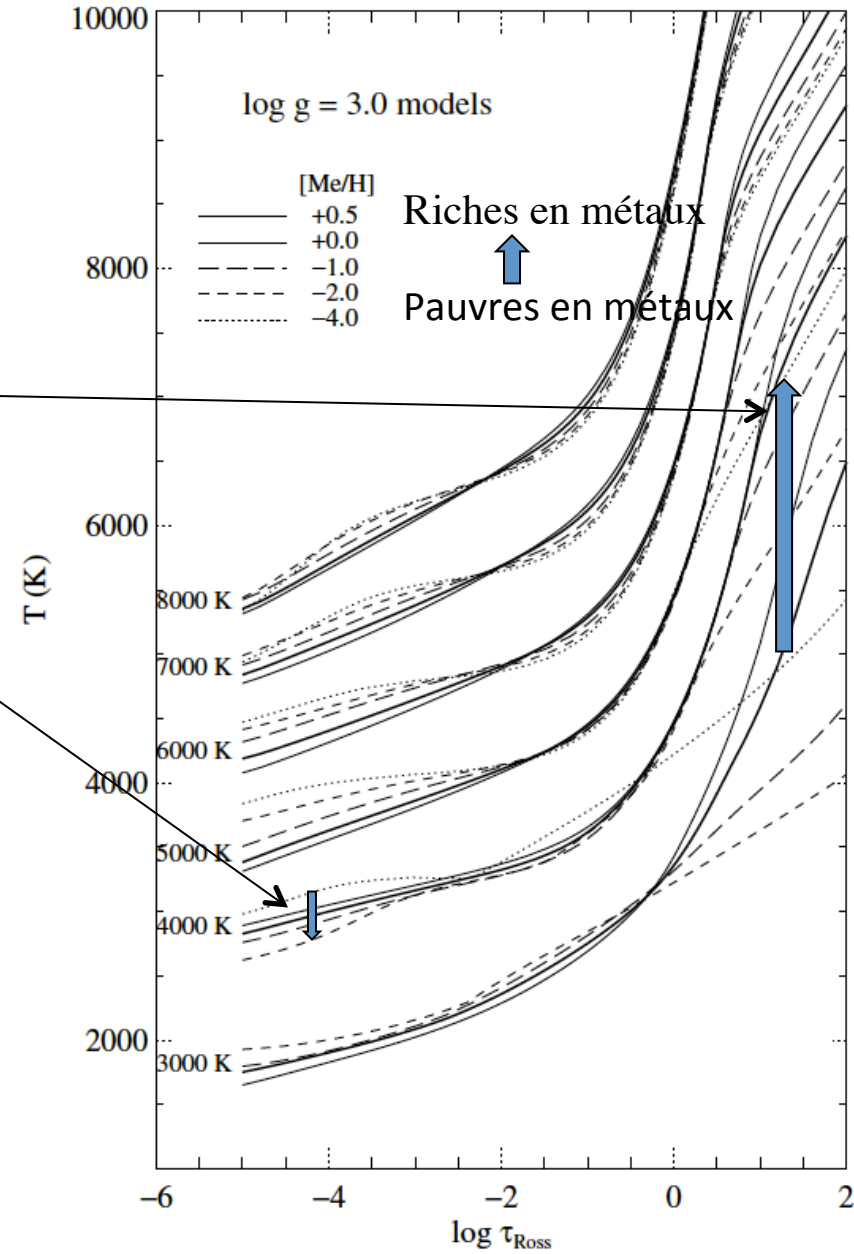
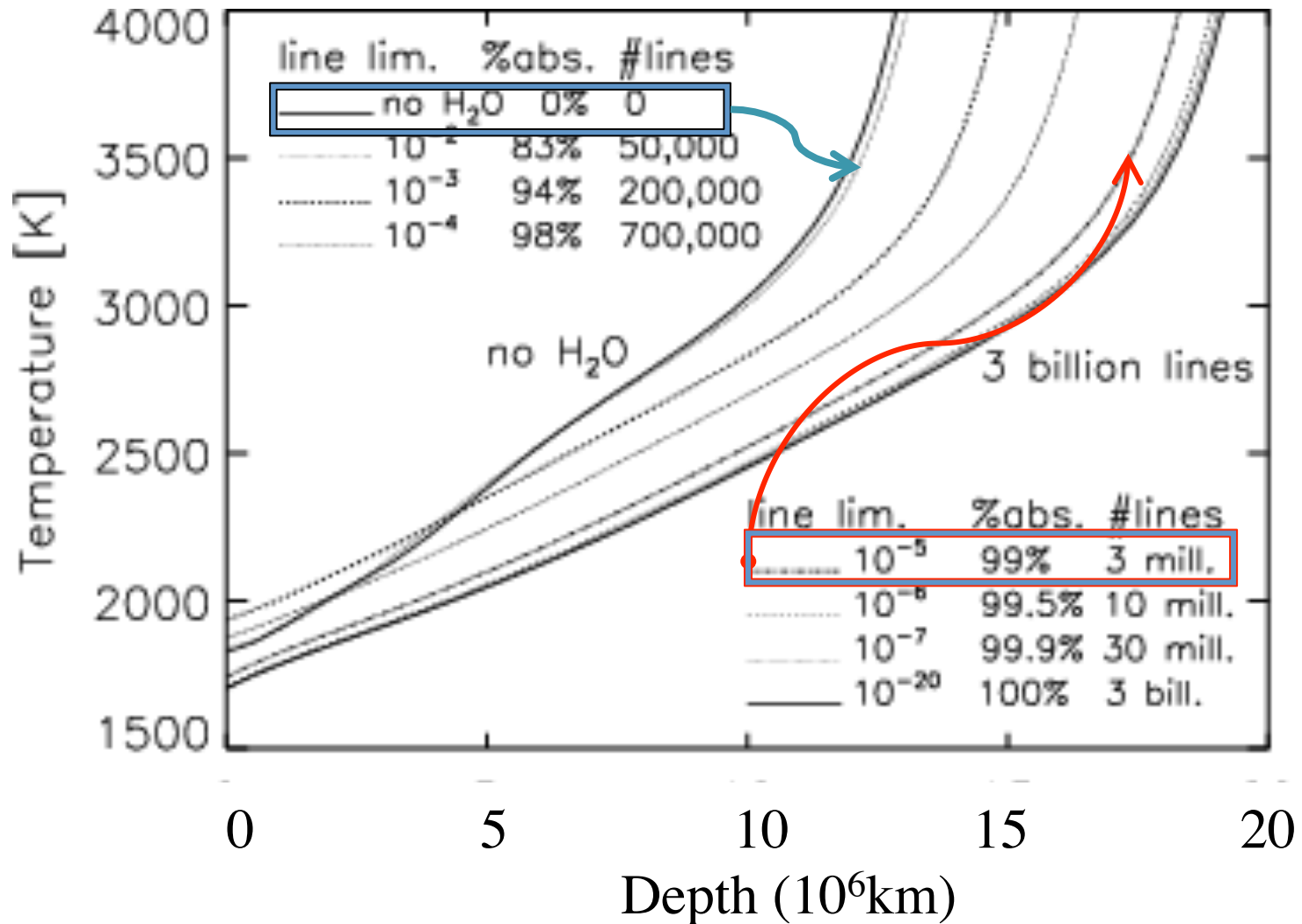


Fig. 2. The temperature structures for a set of model atmospheres with different  $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g = 3$  and different metallicities.

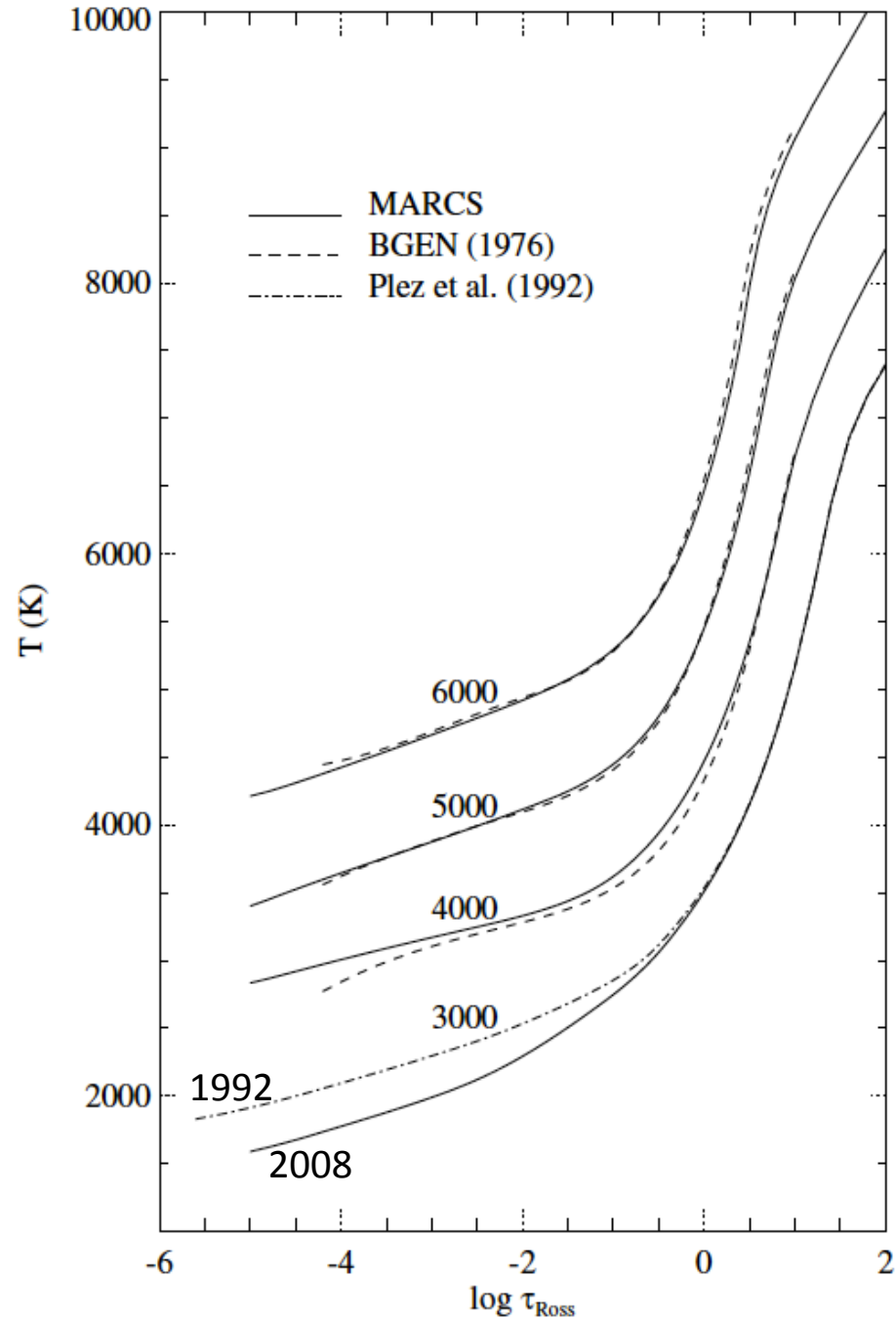
Importance de la complétude des listes de raies pour la structure thermique (Jørgensen et al. 2001) M-type stars



# Influence des opacités moléculaires

Les modèles de 1992 intègrent des opacités pour  $H_2O$  qui ne sont pas correctes.

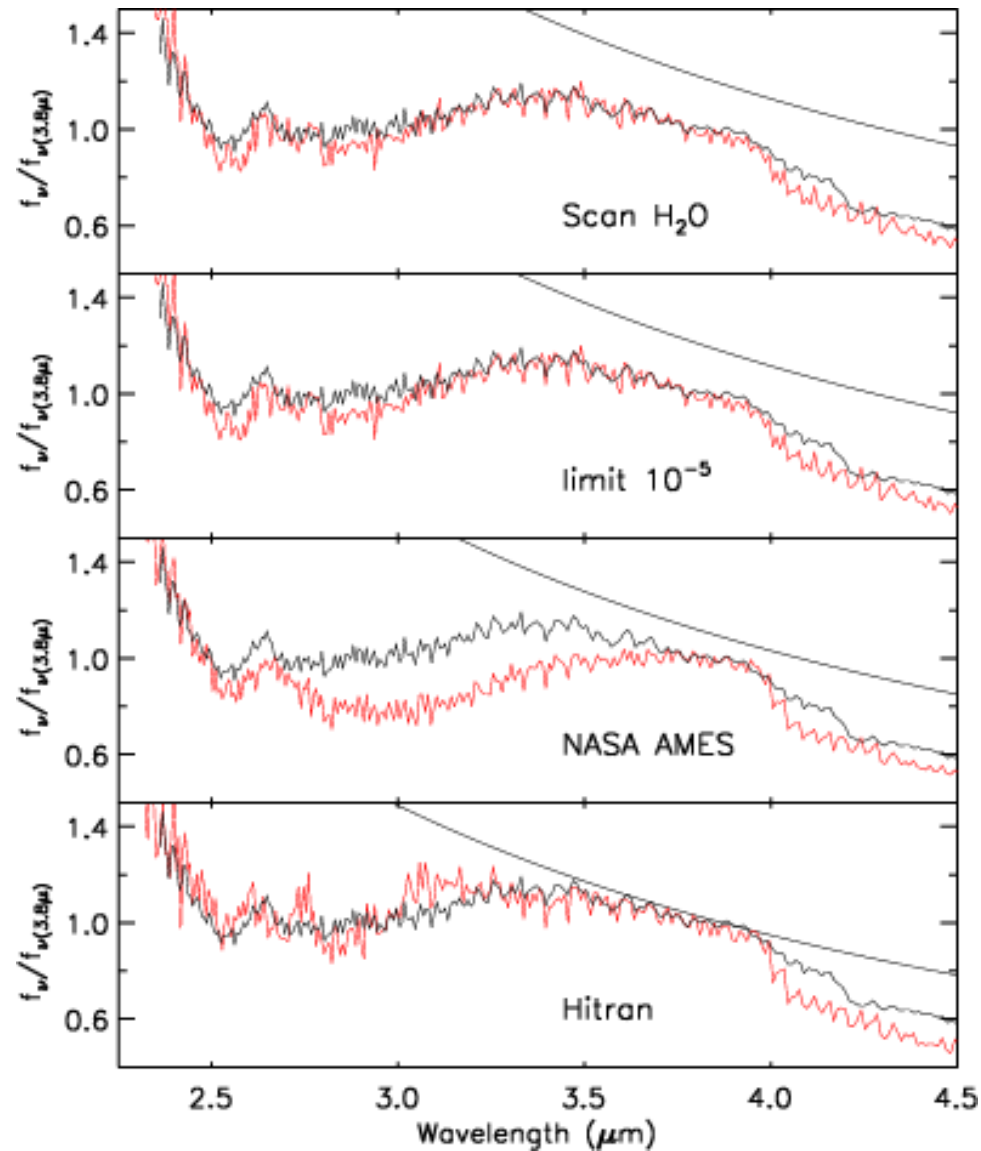
Leur **sous-estimation** conduit à des couches de **surface trop chaudes**.



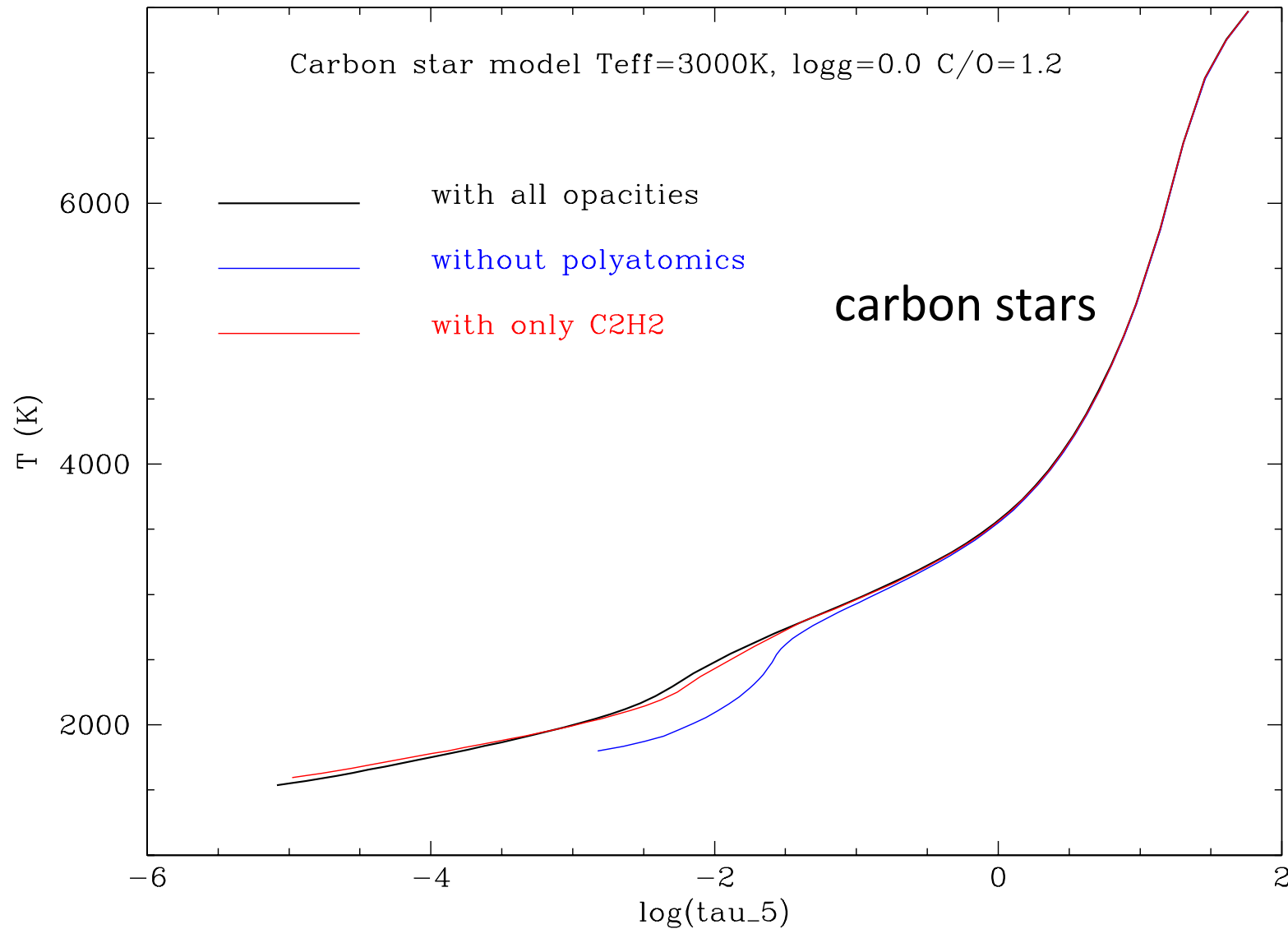


# Importance de la complétude et de l'exactitude des listes de raies pour la modélisation des spectres (Jørgensen et al. 2001)

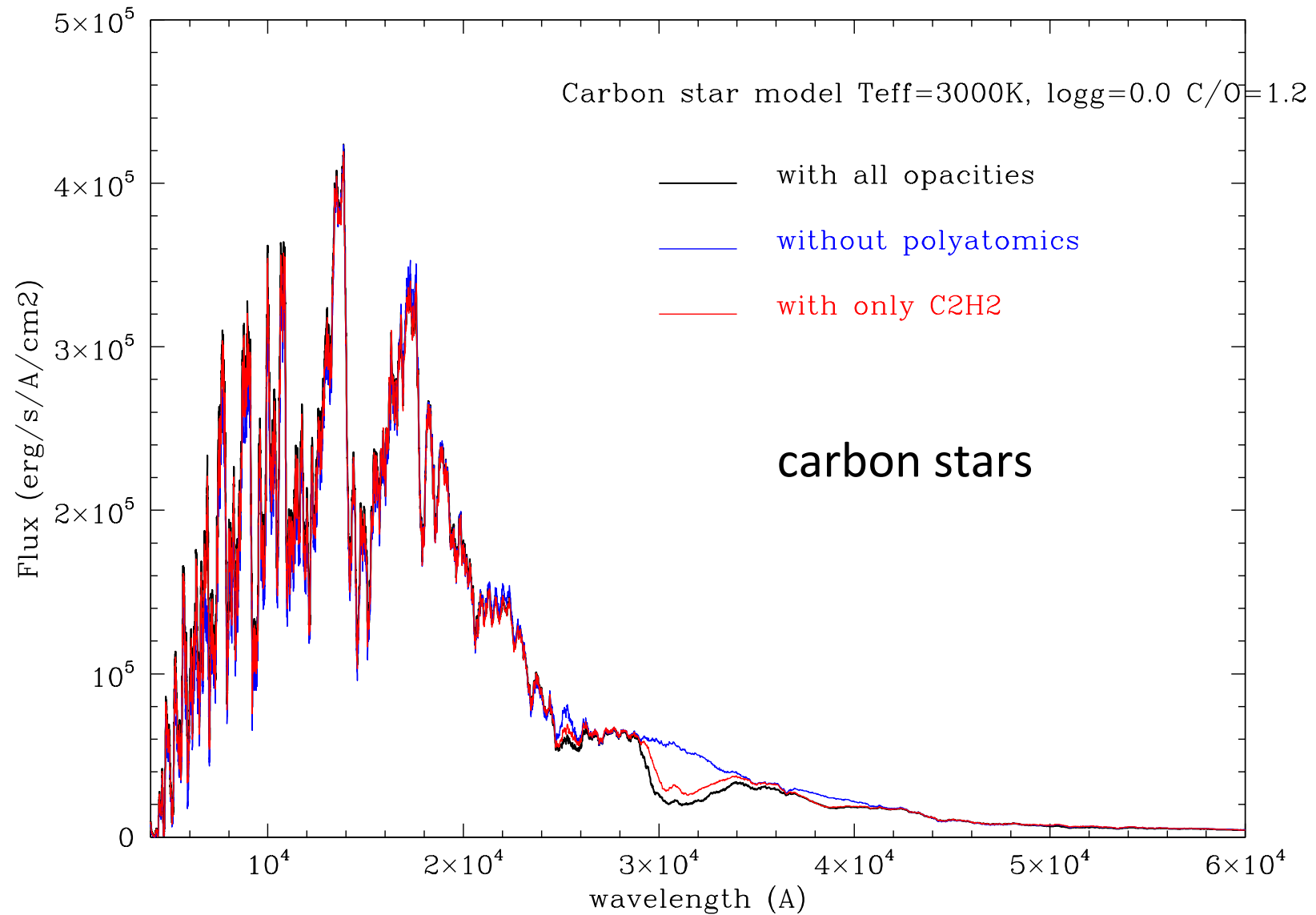
H<sub>2</sub>O @ 3microns  
M-type stars



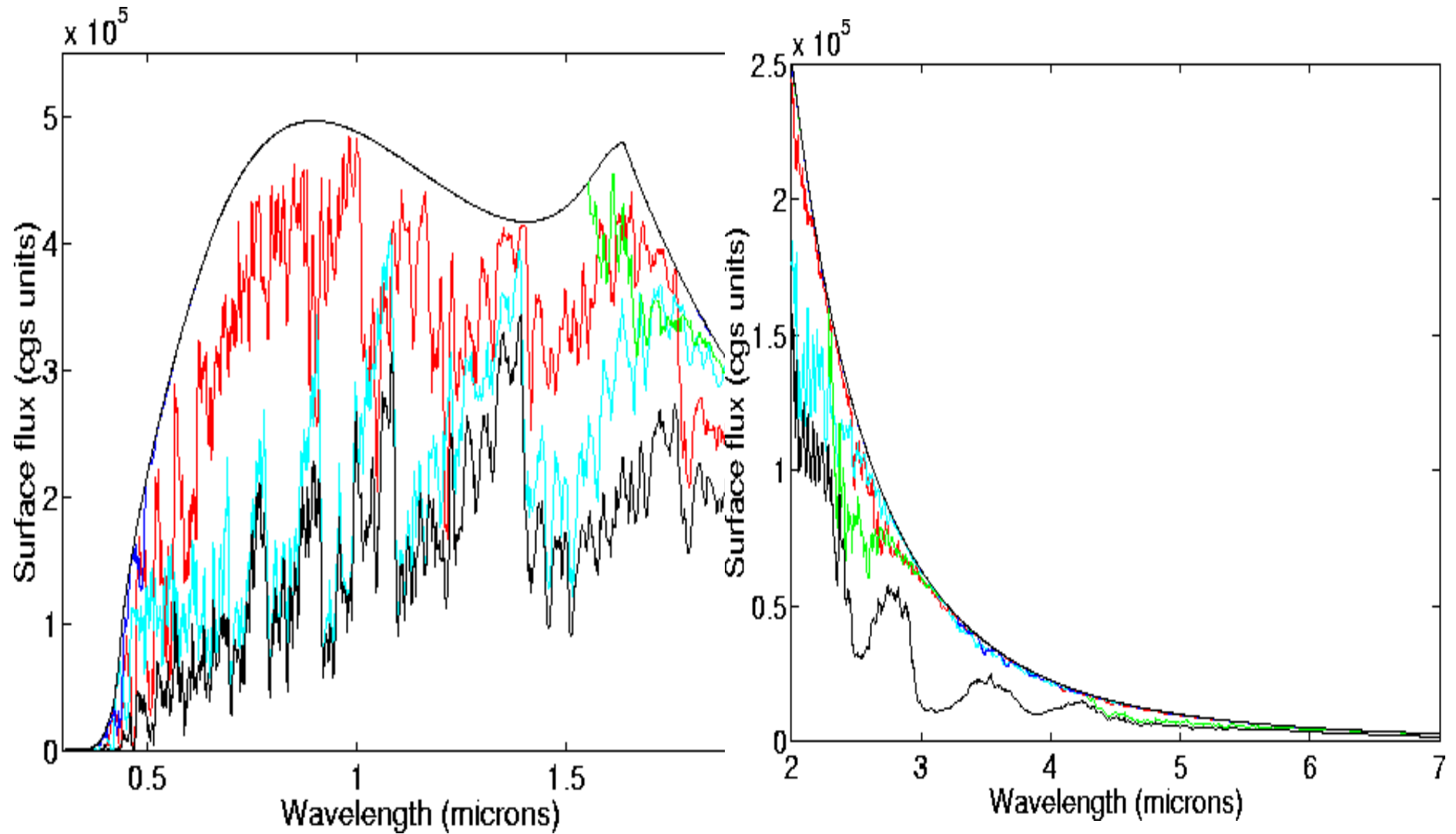
# Importance de la complétude des listes de raies pour la structure thermique



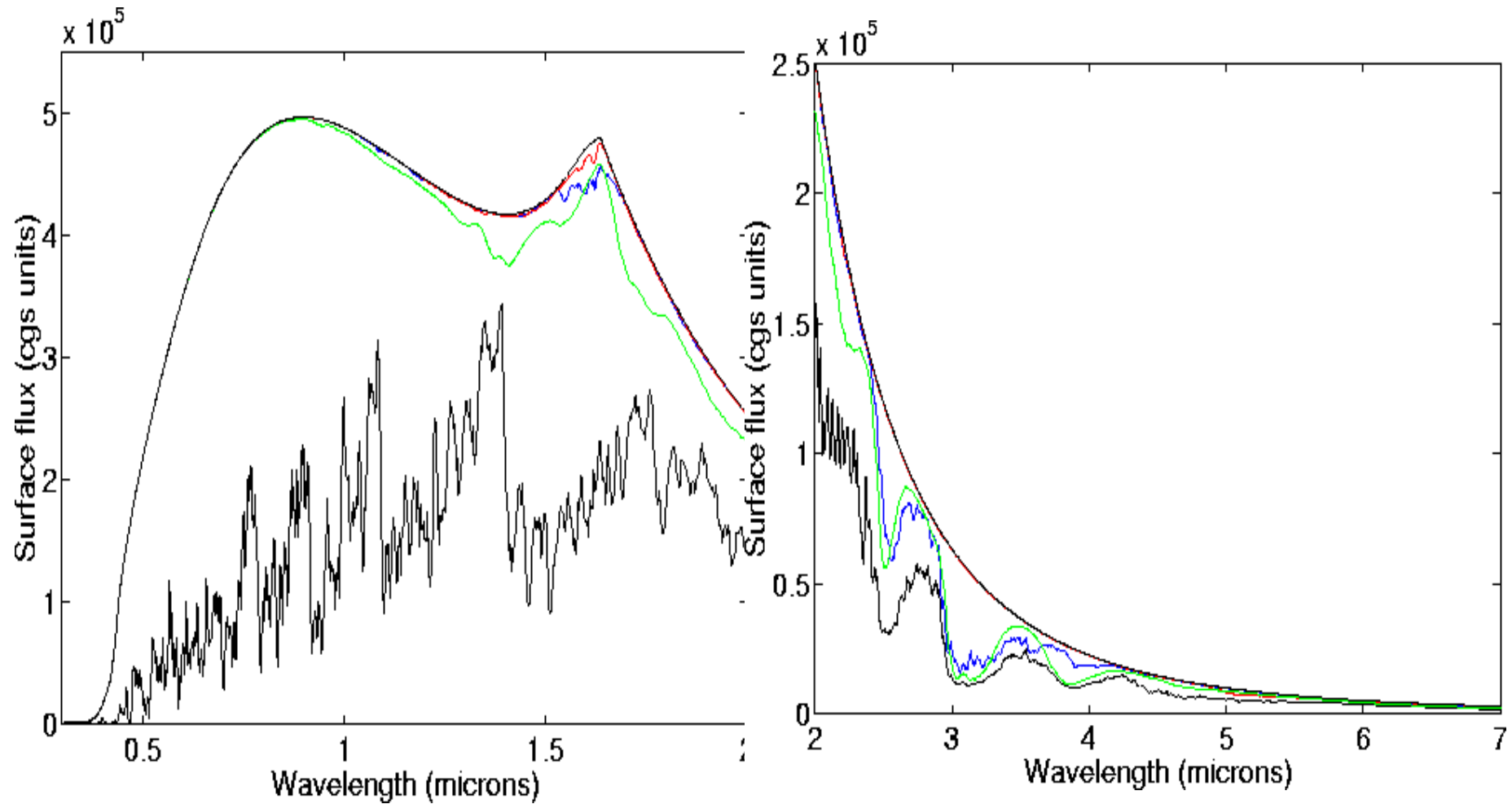
# Importance de la complétude des listes de raies pour la modélisation du spectre

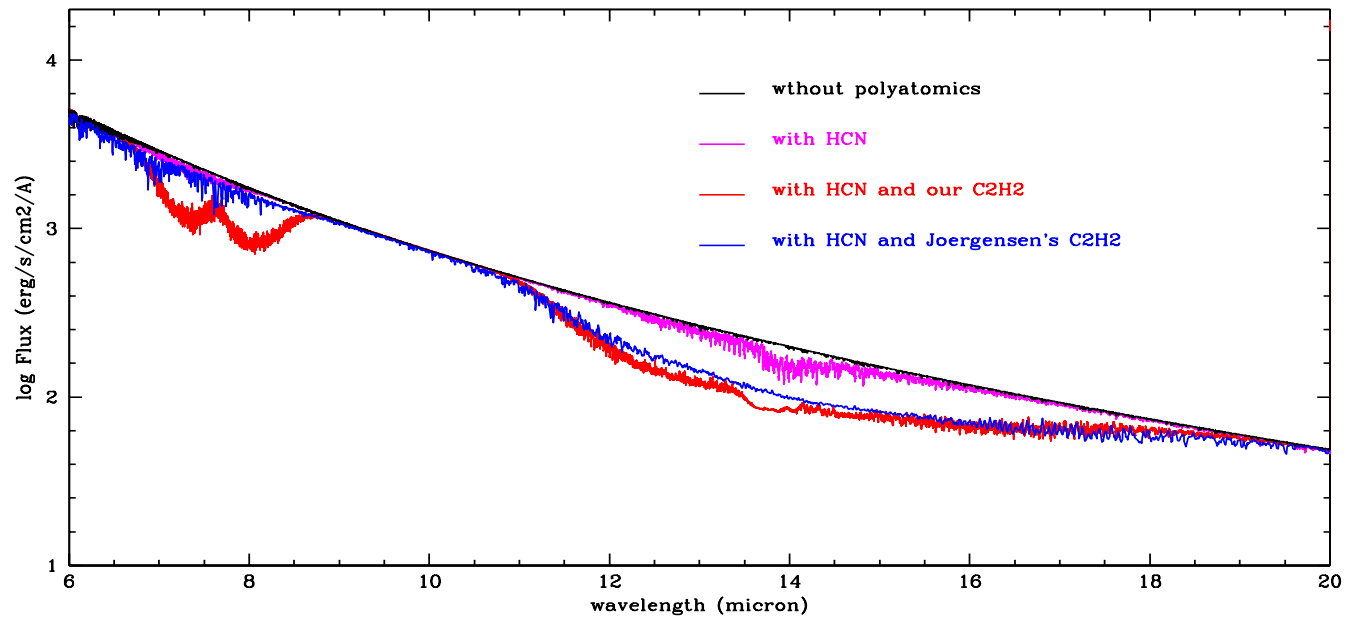
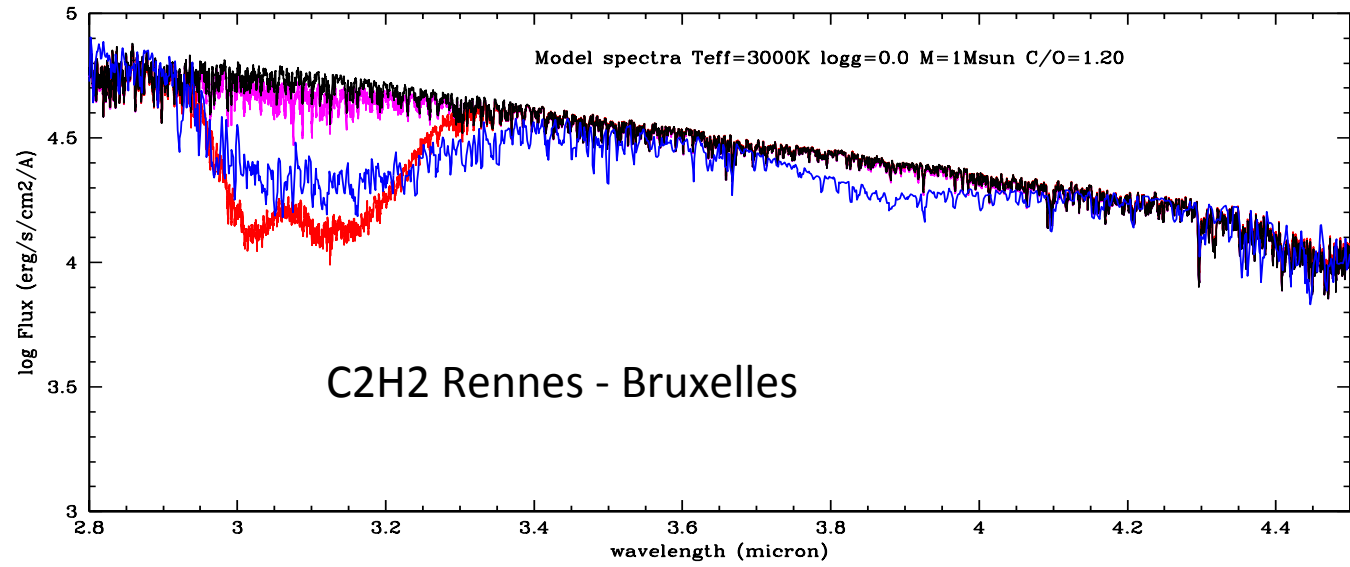


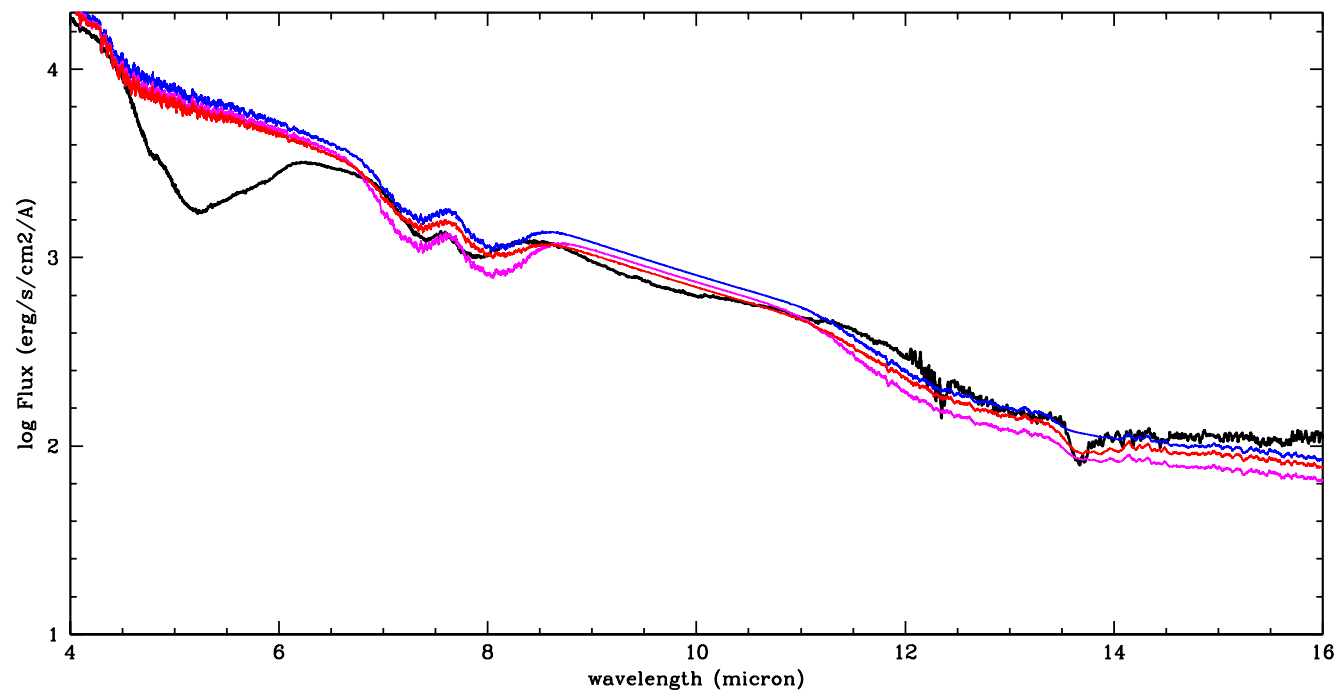
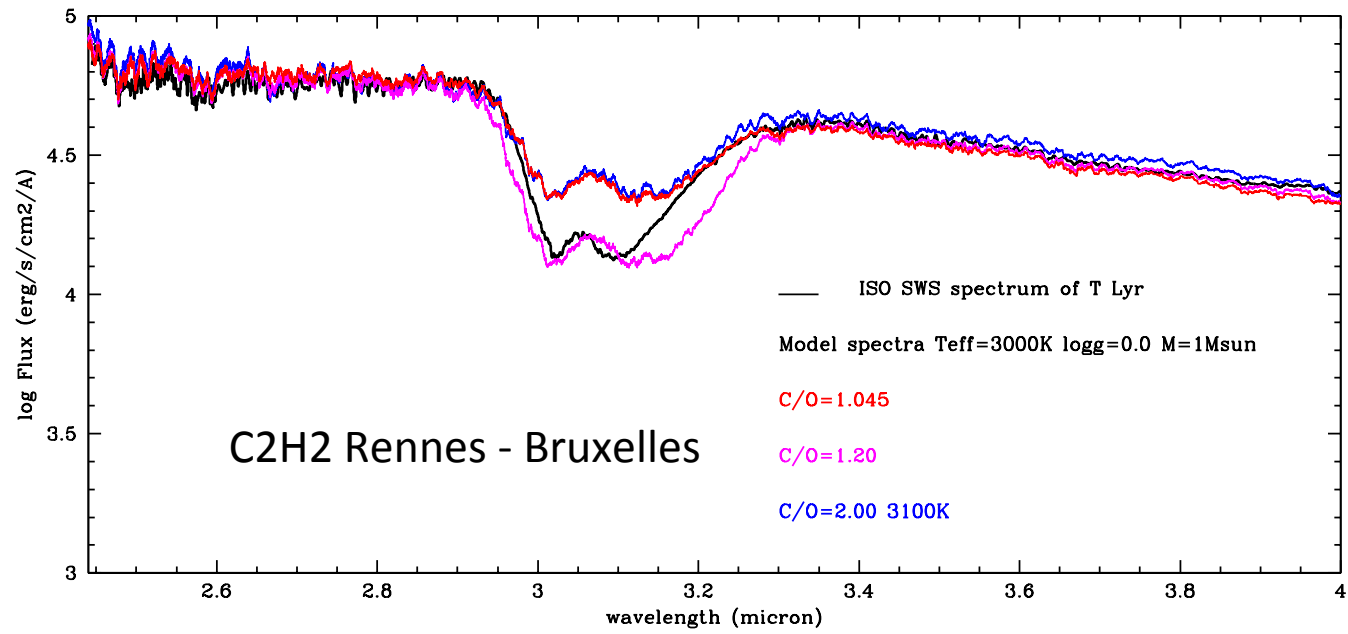
# Étoiles C : opacités $C_2$ , CN, CO, CH



# Étoiles C : opacités $C_3$ , $C_2H_2$ , HCN

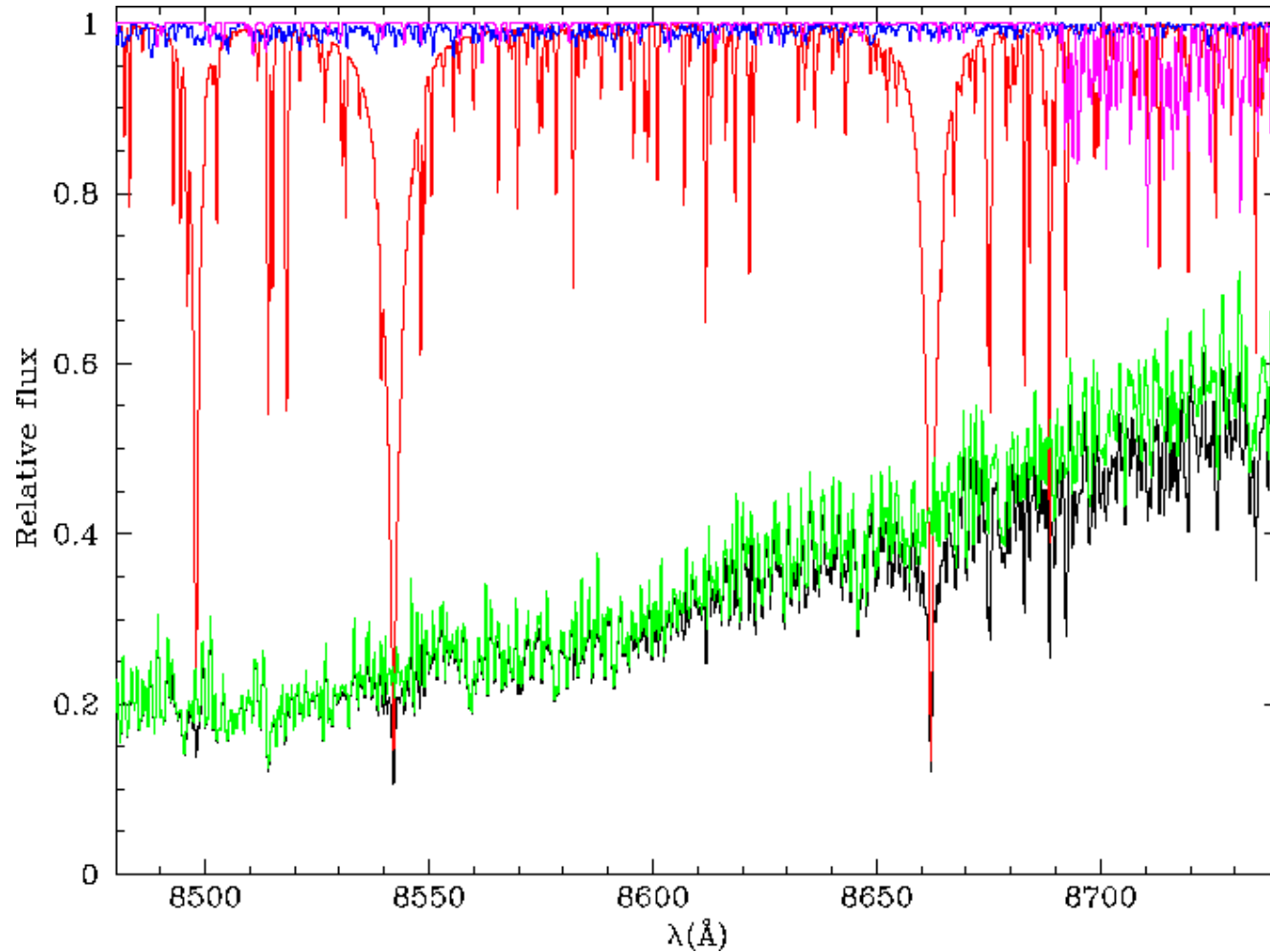






Gaia RVS

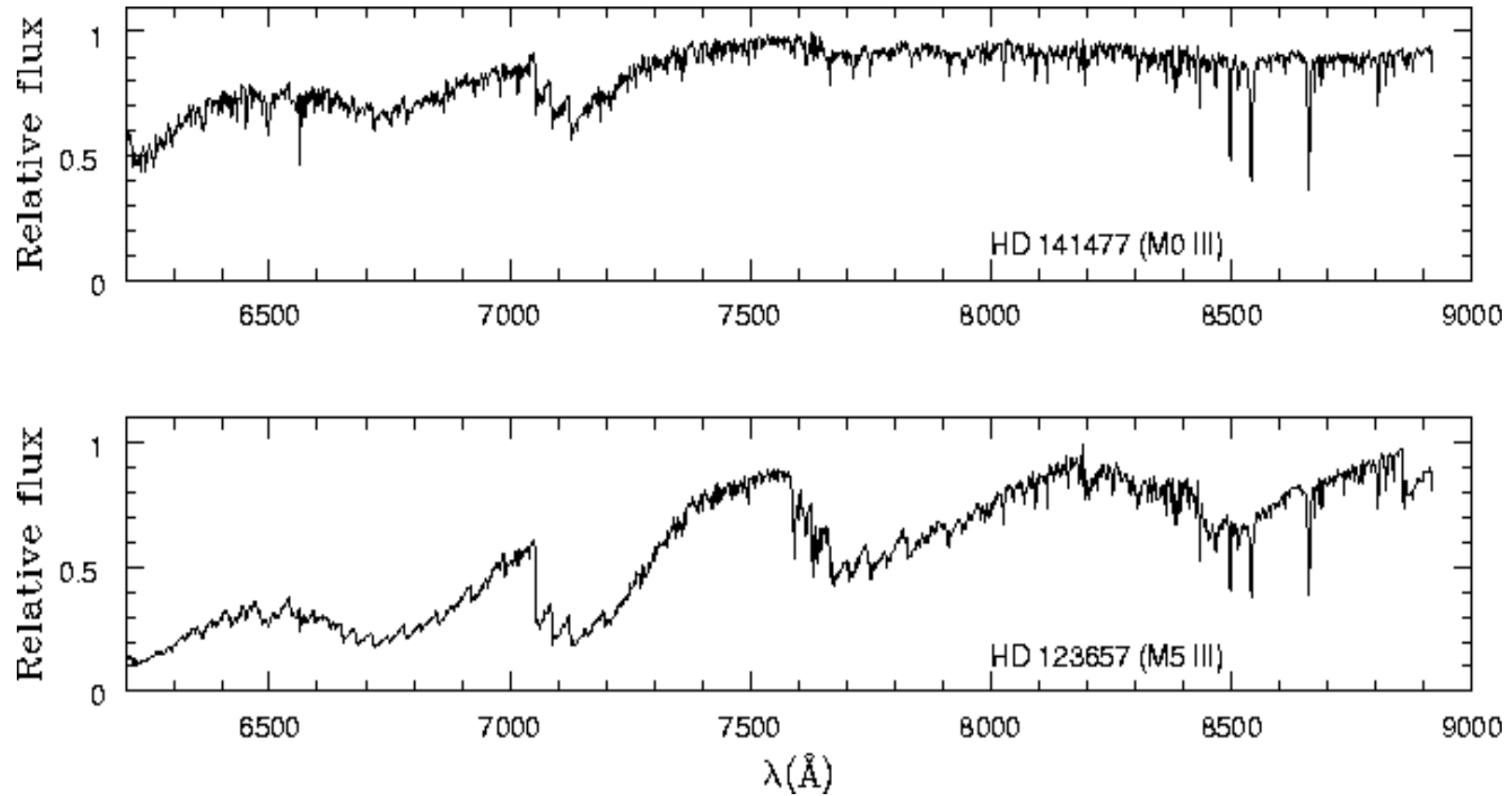
Géante rouge de composition solaire : 3200K  $\log g=0.35$  C/O=0.5



Contributions: toutes les raies; **atomes**; **TiO**, **CN**, **FeH**

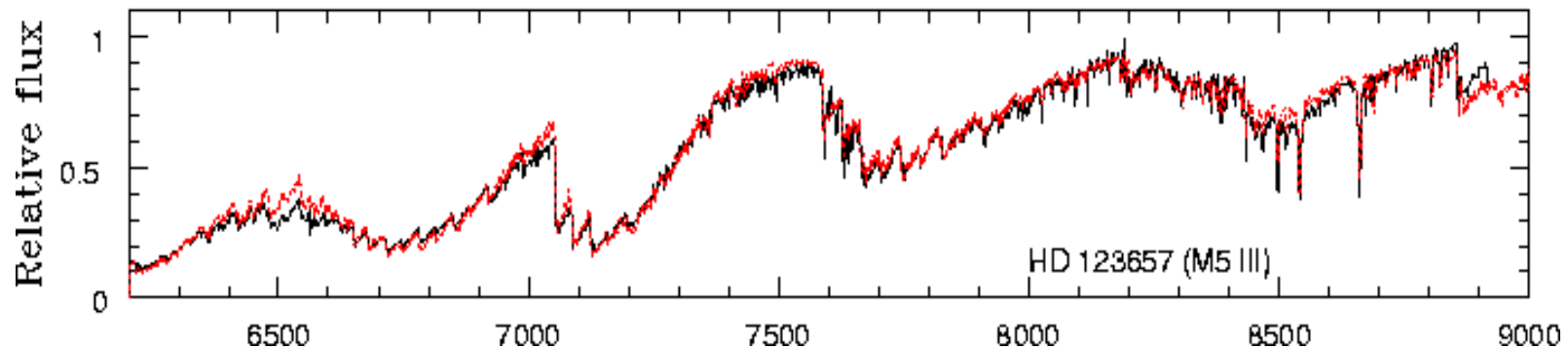
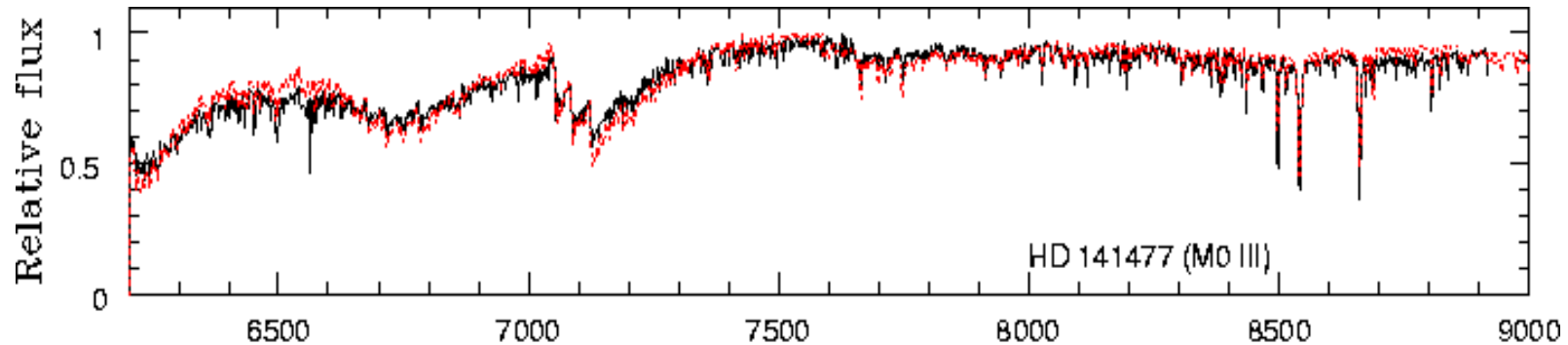


## Exemple de calcul de spectre de géantes M



Observed spectra of M giants (Serote-Roos et al. 1996, A&AS, 117, 93)

## Exemple de calcul de spectre de géantes M

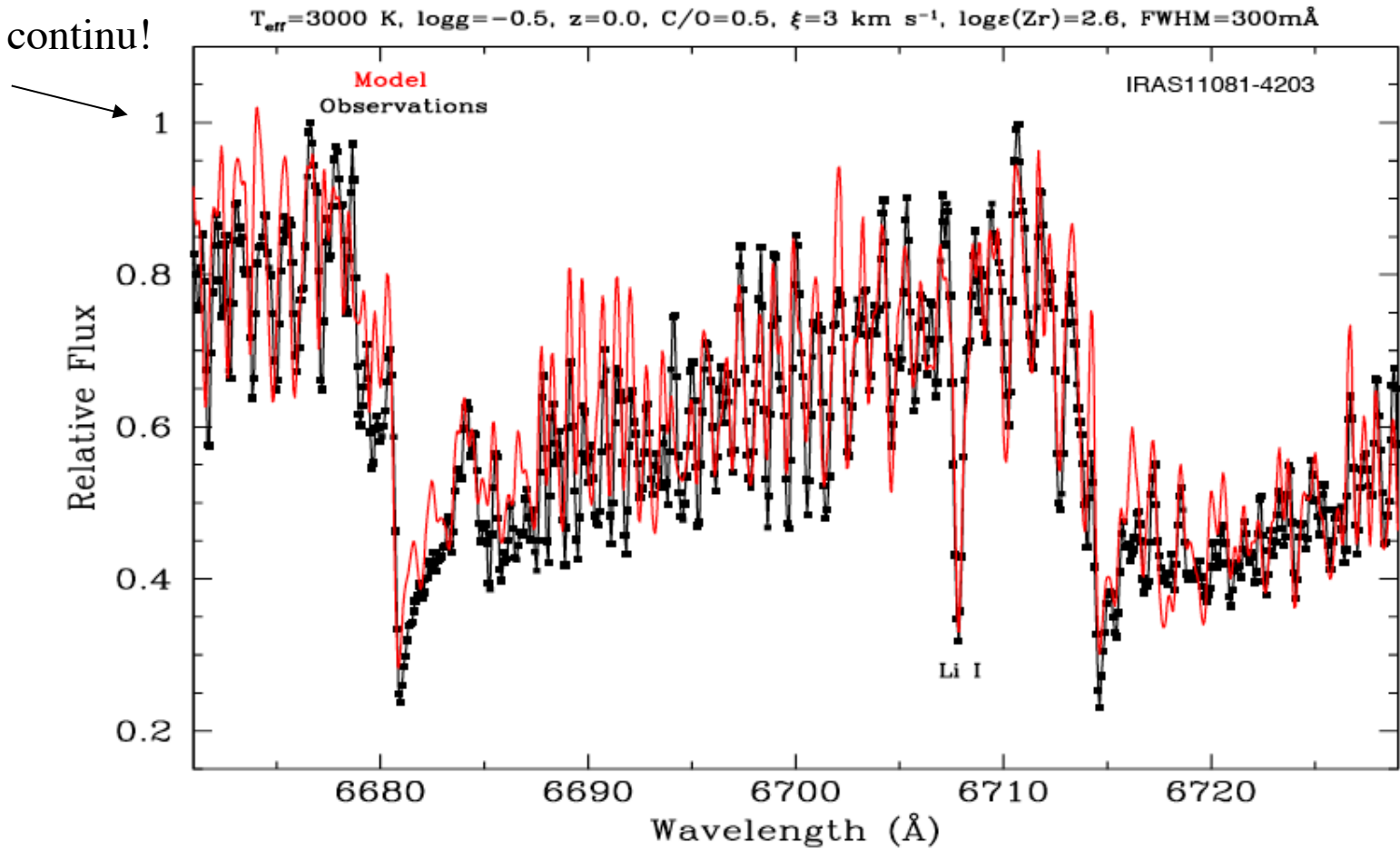


Observed spectra of M giants (Serote-Roos et al. 1996, A&AS, 117, 93),  
and **MARCS model spectra**  
(from Alvarez & Plez 1998, A&A 330, 1109)

Ajustement du spectre d'une géante rouge très froide (raies de TiO, ZrO, atomes) à l'aide d'un **modèle** ( $T_{\text{eff}}$ ,  $\log g$ , composition chimique)

Il faut **de bonnes listes de raies**

Ceci n'est pas le continu!



From García-Hernández et al. 2007, A&A 462, 711

Molecule

Data Type

igraphy

## ExoMol: Molecules with Transition line lists

Ressource :

<http://www.exomol.com>

- ✓ line lists computed or reformatted from various sources
- ✓ not all isotopes
- ✓ not always accurate for spectroscopy
- ✓ group open to suggestions
- ✓ they don't duplicate existing efforts.
- ✓ mostly planet oriented => missing carbon polyatomics.

<p>other oxides</p> <table><tbody><tr><td>CO</td></tr><tr><td>NO</td></tr></tbody></table>	CO	NO	<p>larger molecules</p> <table><tbody><tr><td>CH<sub>4</sub></td></tr><tr><td>NH<sub>3</sub></td></tr><tr><td>HNO<sub>3</sub></td></tr><tr><td>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></td></tr><tr><td>H<sub>2</sub>CO</td></tr><tr><td>PH<sub>3</sub></td></tr><tr><td>SO<sub>3</sub></td></tr></tbody></table>	CH <sub>4</sub>	NH <sub>3</sub>	HNO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> CO	PH <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	<p>other hydrides</p> <table><tbody><tr><td>NH</td></tr><tr><td>CH</td></tr><tr><td>OH</td></tr><tr><td>HCl</td></tr></tbody></table>	NH	CH	OH	HCl	<p>metal hydrides</p> <table><tbody><tr><td>MgH</td></tr><tr><td>NaH</td></tr><tr><td>NiH</td></tr><tr><td>SiH</td></tr><tr><td>CrH</td></tr><tr><td>CaH</td></tr><tr><td>BeH</td></tr><tr><td>TiH</td></tr><tr><td>FeH</td></tr><tr><td>LiH</td></tr><tr><td>ScH</td></tr></tbody></table>	MgH	NaH	NiH	SiH	CrH	CaH	BeH	TiH	FeH	LiH	ScH
CO																											
NO																											
CH <sub>4</sub>																											
NH <sub>3</sub>																											
HNO <sub>3</sub>																											
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>																											
H <sub>2</sub> CO																											
PH <sub>3</sub>																											
SO <sub>3</sub>																											
NH																											
CH																											
OH																											
HCl																											
MgH																											
NaH																											
NiH																											
SiH																											
CrH																											
CaH																											
BeH																											
TiH																											
FeH																											
LiH																											
ScH																											
<p>metal oxides</p> <table><tbody><tr><td>VO</td></tr><tr><td>AlO</td></tr><tr><td>TiO</td></tr><tr><td>SiO</td></tr><tr><td>CaO</td></tr></tbody></table>	VO	AlO	TiO	SiO	CaO	<p>other diatomics</p> <table><tbody><tr><td>PN</td></tr><tr><td>KCl</td></tr><tr><td>NaCl</td></tr><tr><td>LiCl</td></tr><tr><td>CN</td></tr><tr><td>C<sub>2</sub></td></tr><tr><td>CS</td></tr><tr><td>CP</td></tr></tbody></table>	PN	KCl	NaCl	LiCl	CN	C <sub>2</sub>	CS	CP	<p>ions</p> <table><tbody><tr><td>LiH<sup>+</sup></td></tr><tr><td>H<sub>2</sub><sup>+</sup></td></tr><tr><td>HeH<sup>+</sup></td></tr><tr><td>H<sub>3</sub><sup>+</sup></td></tr></tbody></table>	LiH <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> <sup>+</sup>	HeH <sup>+</sup>	H <sub>3</sub> <sup>+</sup>								
VO																											
AlO																											
TiO																											
SiO																											
CaO																											
PN																											
KCl																											
NaCl																											
LiCl																											
CN																											
C <sub>2</sub>																											
CS																											
CP																											
LiH <sup>+</sup>																											
H <sub>2</sub> <sup>+</sup>																											
HeH <sup>+</sup>																											
H <sub>3</sub> <sup>+</sup>																											
<p>triatomic molecules</p> <table><tbody><tr><td>H<sub>2</sub>O</td></tr><tr><td>CO<sub>2</sub></td></tr><tr><td>SO<sub>2</sub></td></tr><tr><td>HCN</td></tr><tr><td>N<sub>2</sub>O</td></tr><tr><td>H<sub>2</sub>S</td></tr></tbody></table>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	HCN	N <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> S																					
H <sub>2</sub> O																											
CO <sub>2</sub>																											
SO <sub>2</sub>																											
HCN																											
N <sub>2</sub> O																											
H <sub>2</sub> S																											

# worth looking at

**Heiter et al. Atomic and molecular data for optical stellar spectroscopy, Physica Scripta, Vol. 90, 054010**

compare calculated spectra with Gaia-ESO survey spectra

master line list built from databases (VALD) + molecules, specific laboratory work for some lines, careful selection, quality flags.

gf-values (lab or calculated), collisional broadening, ...

⇒ still unidentified lines in the optical spectrum of FGK stars!

Need lab work! and/or work on stellar spectra.

Note **Peterson and Kurucz, 2015, ApJS 216, 1** : identification of high-lying Fe I energy levels using stellar spectra.

See also **Masseron et al. 2014, A&A 571, A47**, same thing for CH.

Heiter et al. 2015

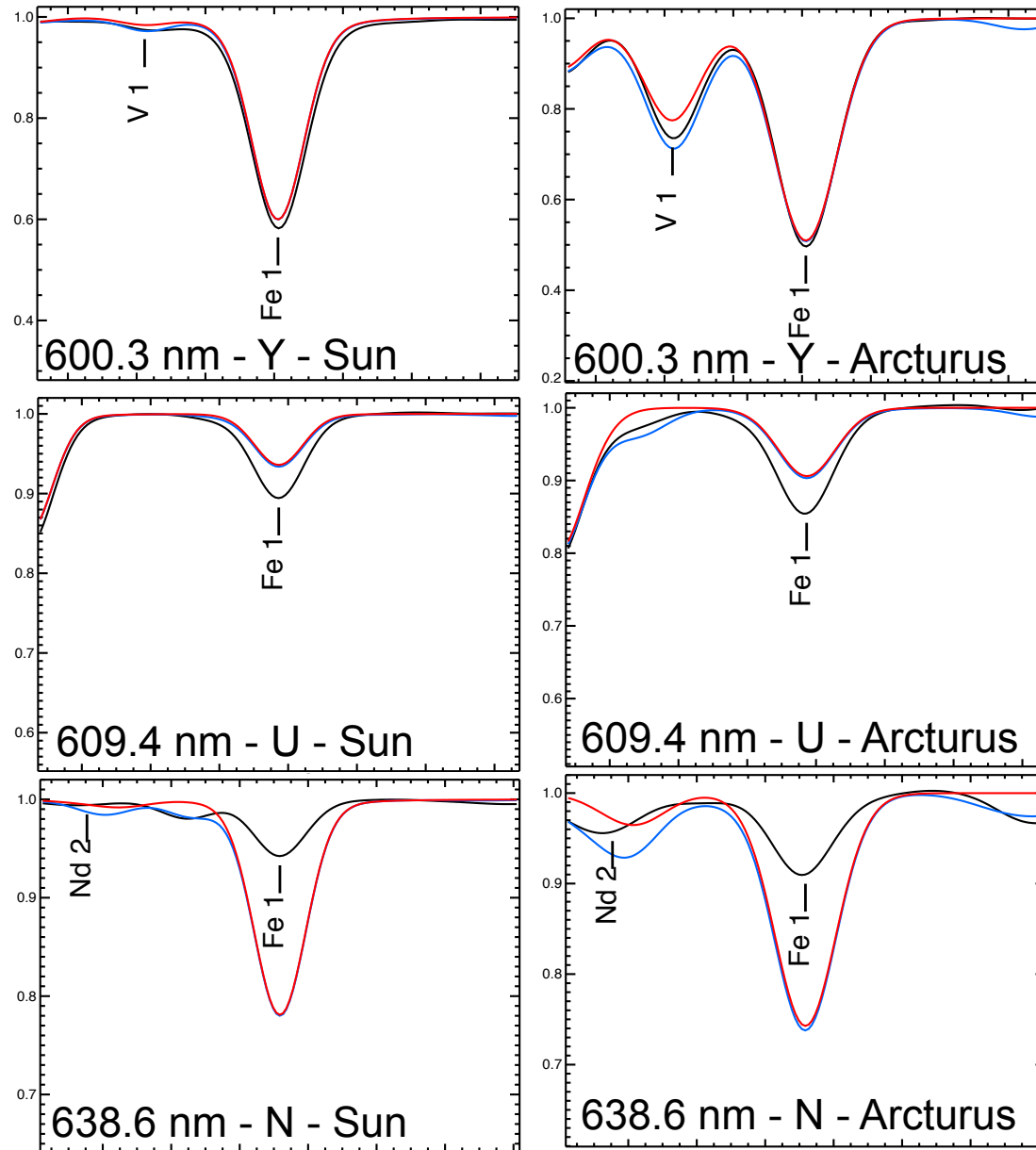
3 iron lines with different  
quality flags :

Y = yes

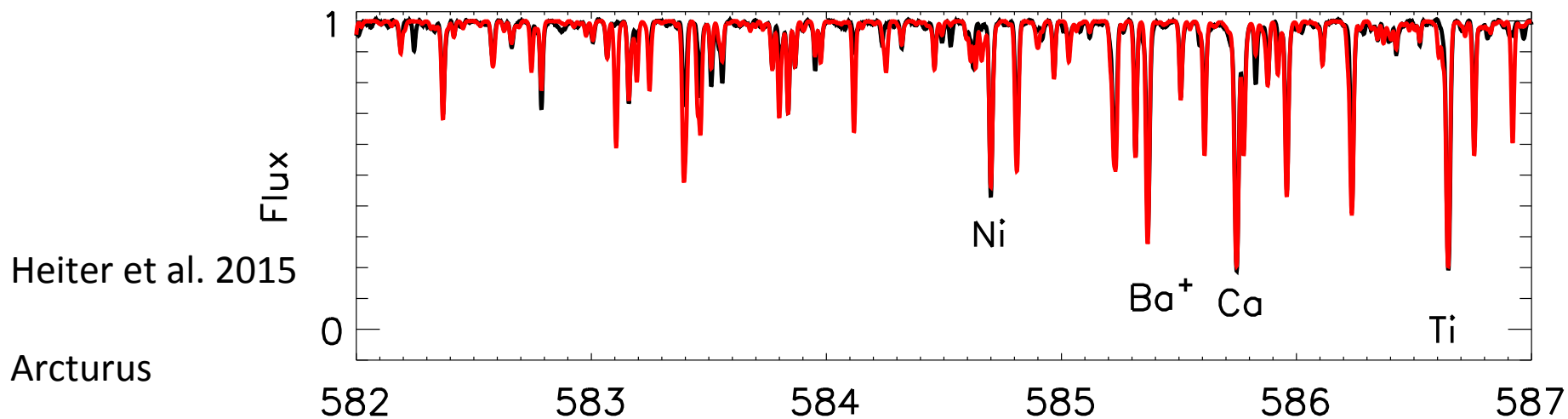
U = undecided

N = no

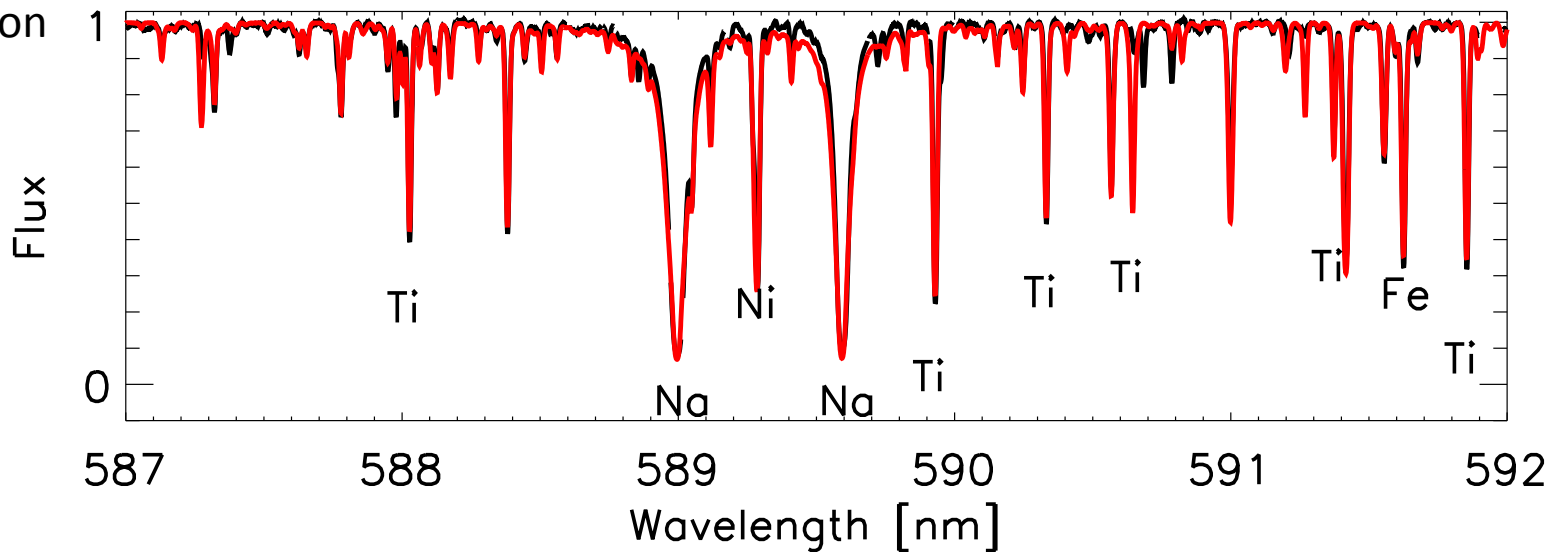
Black line is observation  
red and blue calculations



**Figure 3.** Comparison of observed and synthetic spectra around three Fe lines with different flags (Y for *Yes*, U for *Undecided*, N for *No*) for the Sun (left) and Arcturus (right). Black lines: observations, red lines: calculations including preselected spectral lines only, blue lines: calculations including blends.



Black line is observation  
red is calculation



**Figure 4.** Observed (black) and calculated (red) spectra for Arcturus around the Na doublet lines at 589 nm. The calculations include the full Gaia-ESO line list.

# Listes de raies / défis

**Il faut donc des listes de raies aussi complètes que possible**

- pour **la structure thermique** des modèles:
  - ✓ complétude jusqu' à des énergies élevées
  - ✓ positions approximatives (si pas de décalages systématiques)
  - ✓ intensités approximatives (et dans les bonnes bandes, pas de systématiques)
- pour le **calcul des spectres**
  - ✓ complétude dans le domaine modélisé
  - ✓ positions avec une précision de “laboratoire”
  - ✓ intensités à 10% ou mieux, si possible

**Atomes:** il reste des raies non identifiées!

**molécules:** certaines listes ne sont pas assez précises ou complètes: TiO, C2, FeH, C3, C2H2, LaO,..

**Autres défis:**

**hors-ETL:** collisions inélastiques avec e et H pour les atomes (e.g. Belyaev et al. 2016, ....)  
La même chose pour les molécules !

**polarisation:** facteurs de Landé pour les molécules aussi



# En résumé

- Certains spectres moléculaires **insuffisamment connus** ( $C_2H_2$ ,  $C_3$ ,  $LaO$ , ...)
- Idem pour des **raies atomiques** dans le visible qui restent à identifier/caractériser
- **IR** où l'on va de plus en plus: bandes JHK !
  
- Besoin de **paramètres supplémentaires (atomes et molécules!)**, e.g.
  - ✓ section efficace d'excitation collisionnelle, pour calculs hors-ETL
  - ✓ facteurs de Landé pour la polarisation
  - ✓ élargissement collisionnel, avec H, e- (profils de raies)
  
- besoin de **précision accrue**, pour analyser des données astrophysiques de très haut S/B et résolution spectrale, grands relevés coûteux.