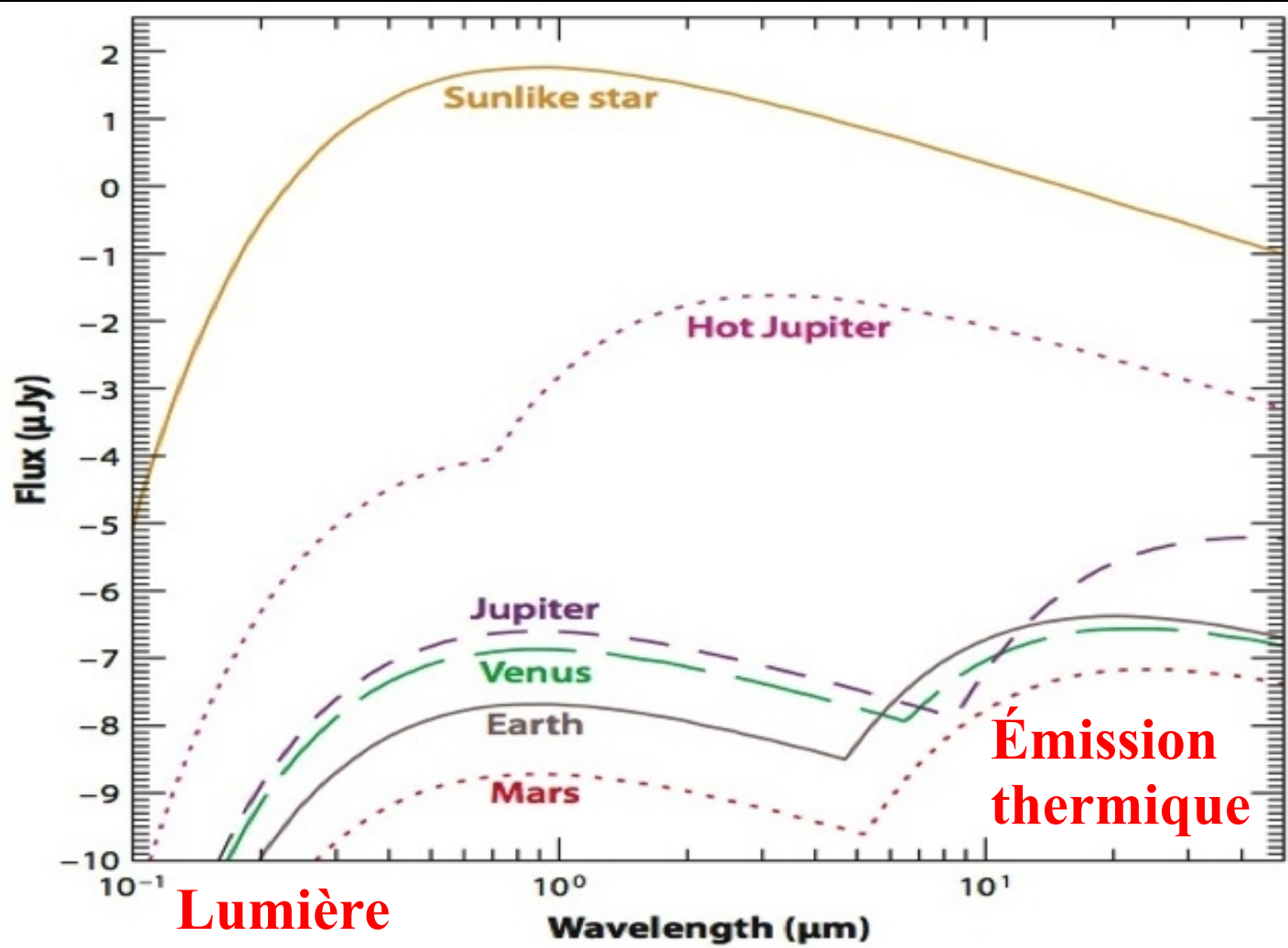


Atmosphères des exoplanètes

Difficultés de la mesure



1/ Haut contraste
 $10^4 - 10^{10}$

2/ Faible séparation
 $\theta \sim 0.1''$

Émission
 thermique

$$F_p = \varepsilon_{IR} B(\lambda, T_p) r_p^2$$

**Lumière
 réfléchie**

$$F_p = a(\lambda, t) \varphi(t) \cdot \frac{r_p^2}{4d^2} B(\lambda, T_s) r_s^2$$

Difficultés de la mesure

Observable = spectre

- Surface de la planète non résolue
→ Spectre intégré sur la surface (éclairée ou émettant) de la planète
- Résolution spectrale finie
→ moins de détails que sur spectres des modèles

Différents types de spectres mesurés

**Transmission
lumière stellaire
à travers atmosphère**

Transit primaire

**Lumière stellaire
réfléchie par
atmosphère**

**Imagerie directe
(pas de mesure
à ce jour)**

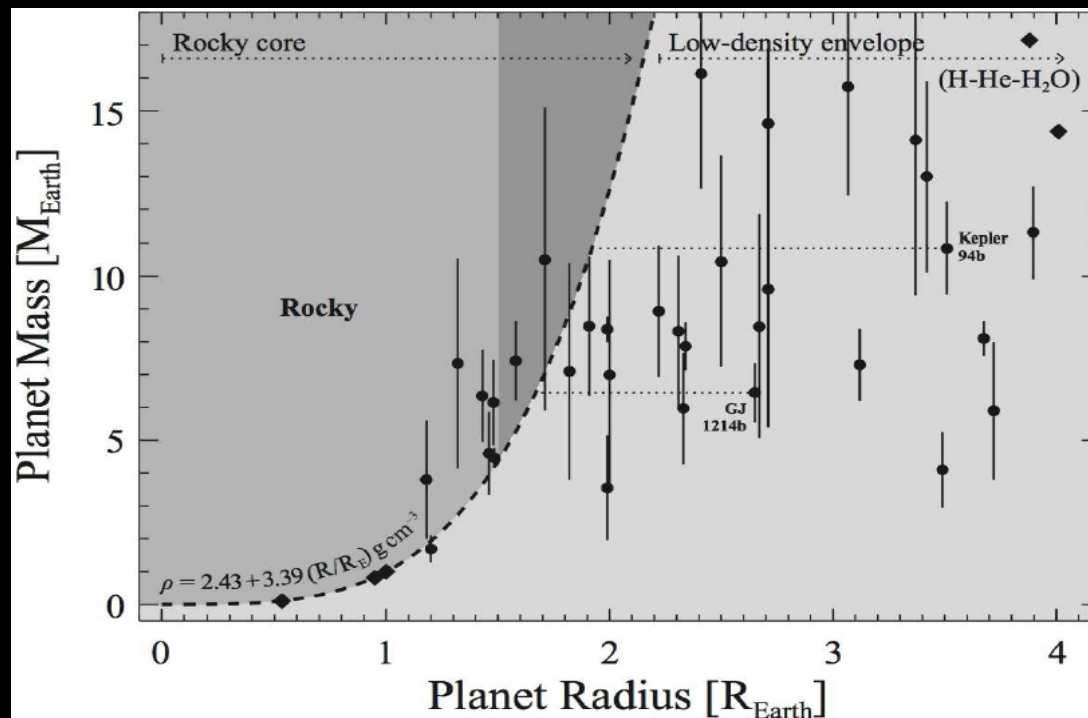
**Lumière émise
par planète**

**Imagerie directe
Transit secondaire**

Atmosphères des planètes terrestres

Origines atmosphères (1/2)

- 1/ H et He : capturés par embryons $>0.1M_{\text{Terre}}$ pendant formation
→ il y a des planètes $\sim 5M_{\text{Terre}}$ avec atm « massives » de H_2/He



Origines atmosphères (2/2)

2/ Dégazages catastrophiques de H_2O , CO_2

1/ Collisions des embryons → manteau supérieur fond

2/ Manteau refroidit → dégazage de H_2O , CO_2

Si distance < “snow line” : masse dégazée < masse océans Terre

Si distance > “snow line” : masse dégazée = $10 - 10^3$ masse océans Terre

3/ Volcanisme → atmosphère secondaire

Pertes d'atmosphère

1/ Particules s'échappent.

Excitation radiative des couches supérieures

+ particules énergétiques s'échappent

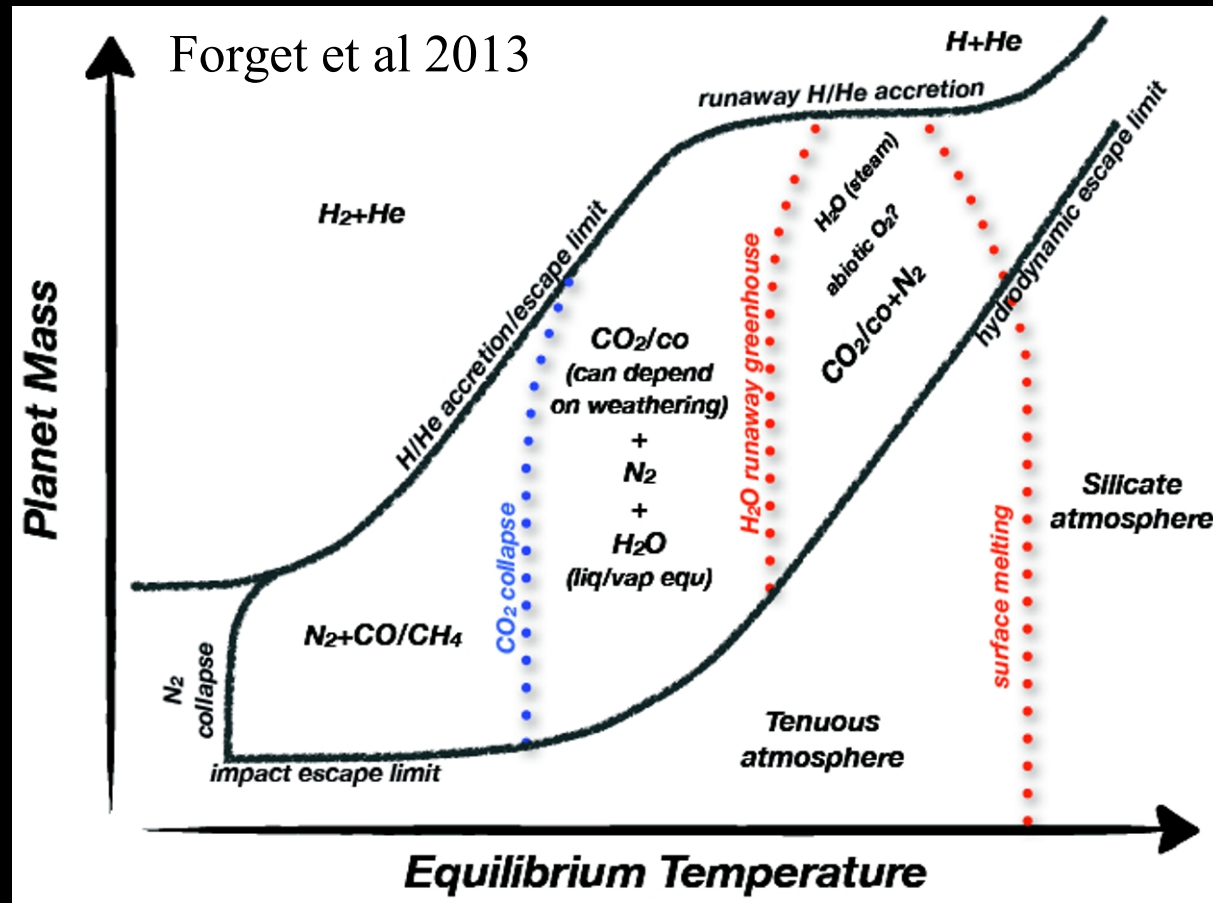
+ expansion adiabatique

+ vents stellaires

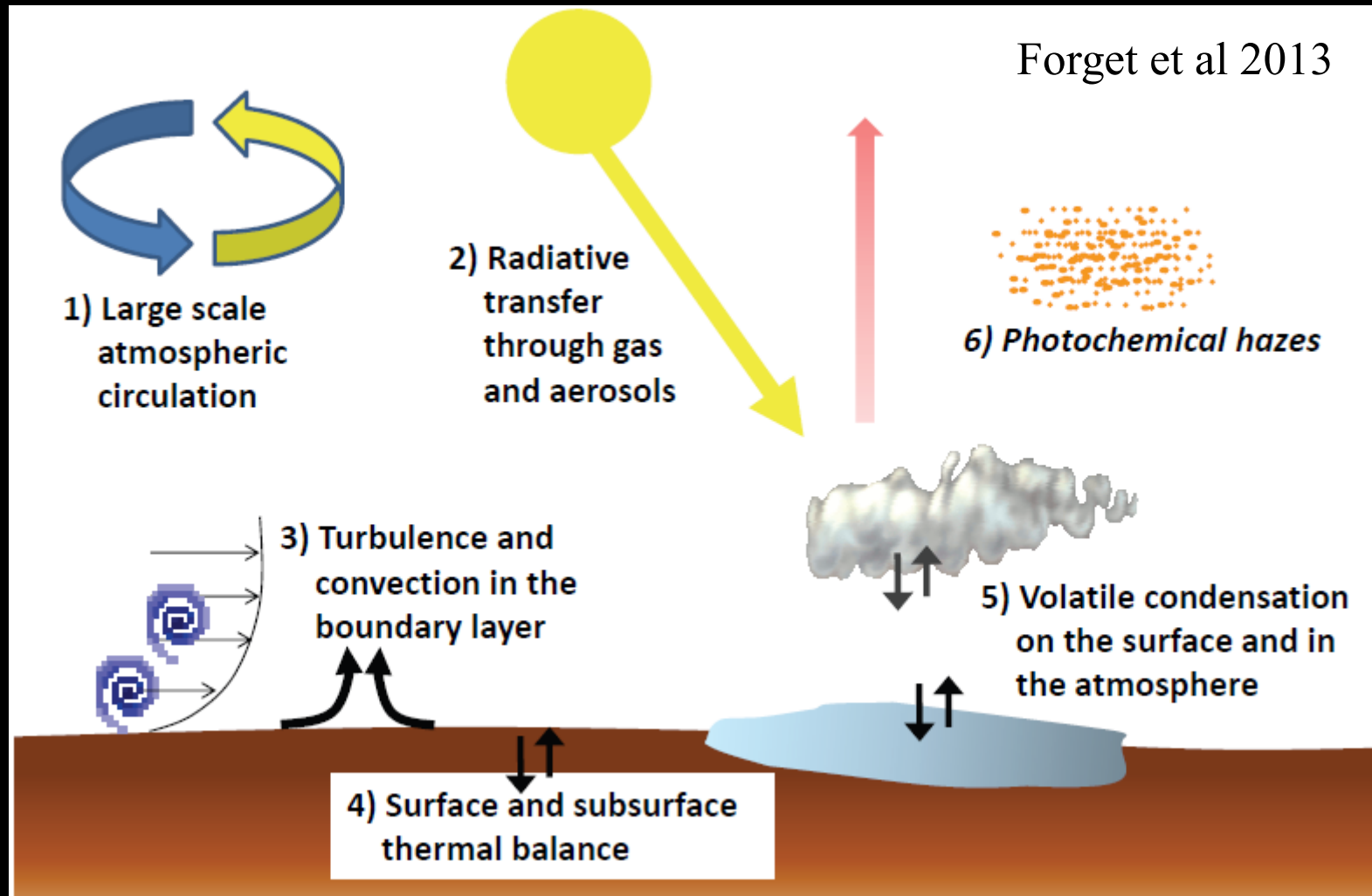
+ impact comète/astéroïde

2/ Réactions avec la surface. Exemple : CO₂ dans océans.

Atmosphères planètes solides



Processus à comprendre/simuler



+ Tectonique des plaques
+ rotation diurne
+ orbite annuelle

Quels modèles existent ?

Modèles 1D

- + pas trop compliqués → propriétés globales
- + n'expliquent pas les nuages (formation, distribution, etc)
- + n'expliquent pas les conditions locales

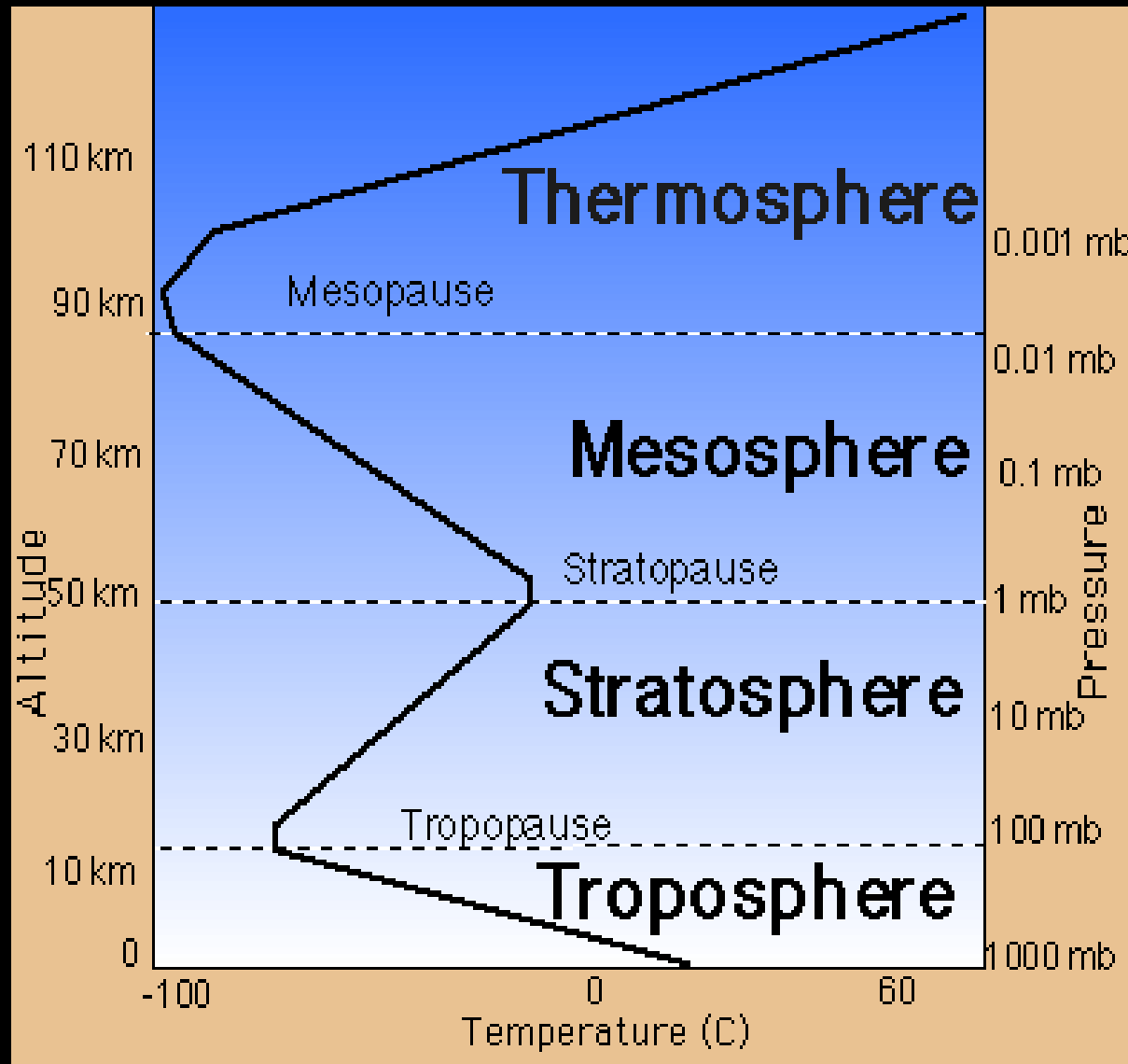
Modèles 3D (Global Climate Models = GCM)

- + Complexes
- + Reproduisent Terre, Mars, Vénus
- + Météorologie (variations annuelles et diurnes)
- + Encore incomplets (instabilités, comportements non linéaires, etc)

Que donnent les modèles

profils (P,T) ; cartes (P,T) ; composition ; spectres

Profils (P,T)



Très faibles pressions
→ 2^{de} inversion de T

Faibles pressions

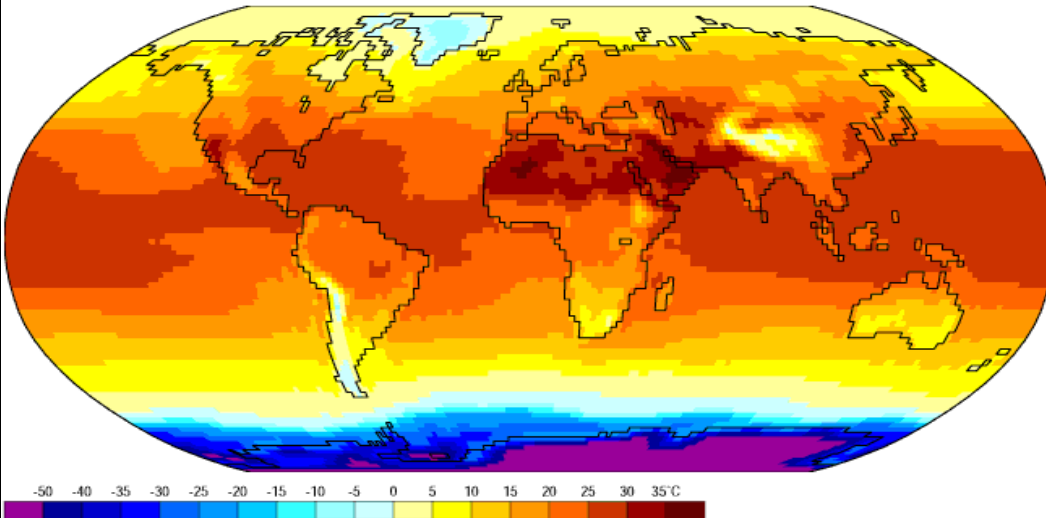
Couche d'ozone + UV
→ 1^{ere} inversion de T

~80 % de la masse de
l'atmosphère

Cartes de T et de P

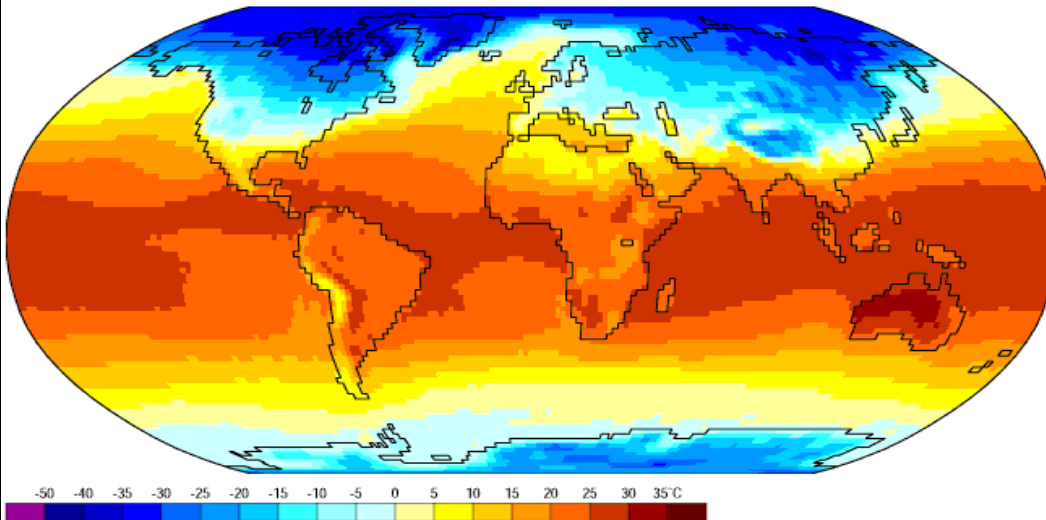
Air Temperature

Jul



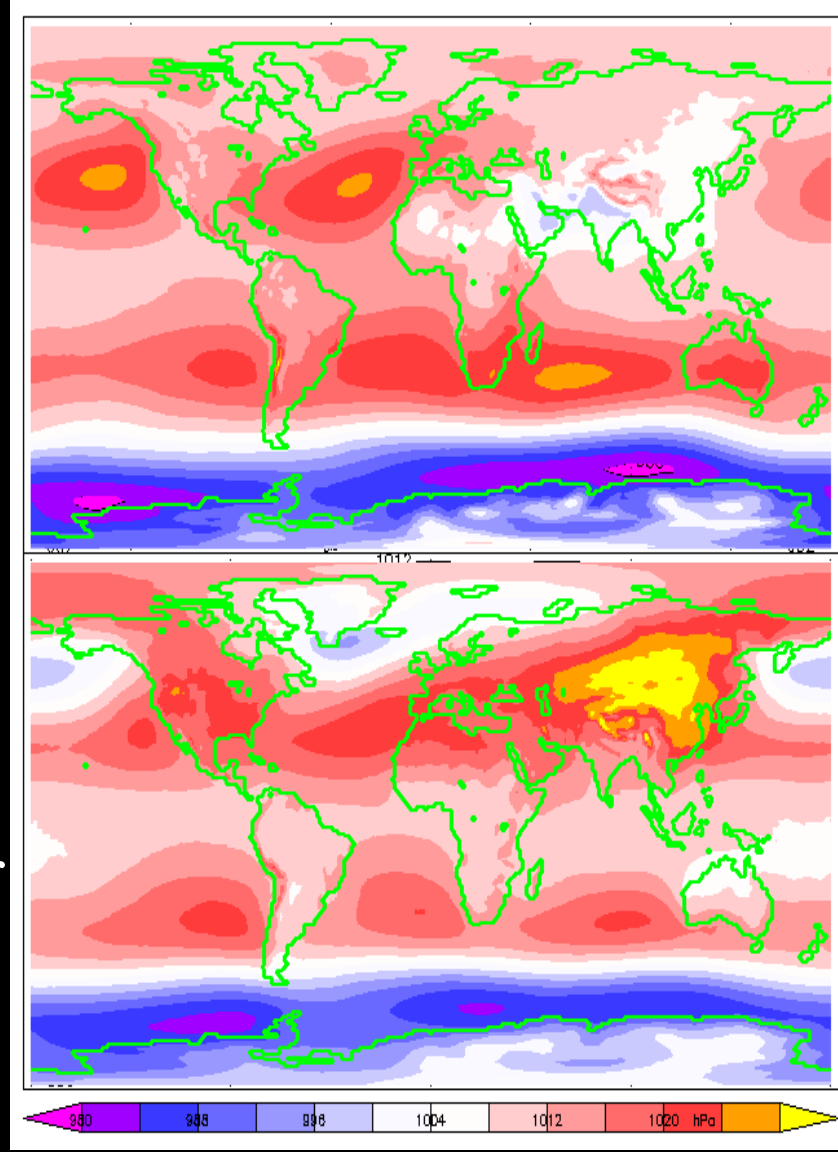
Data: NCEP/NCAR Reanalysis Project, 1959-1997 Climatologies
Air Temperature

Jan



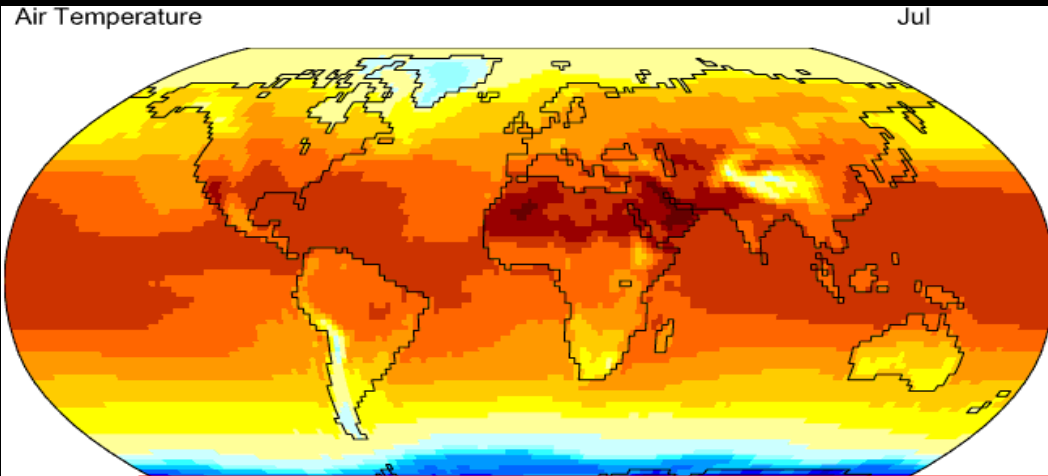
Data: NCEP/NCAR Reanalysis Project, 1959-1997 Climatologies

Été

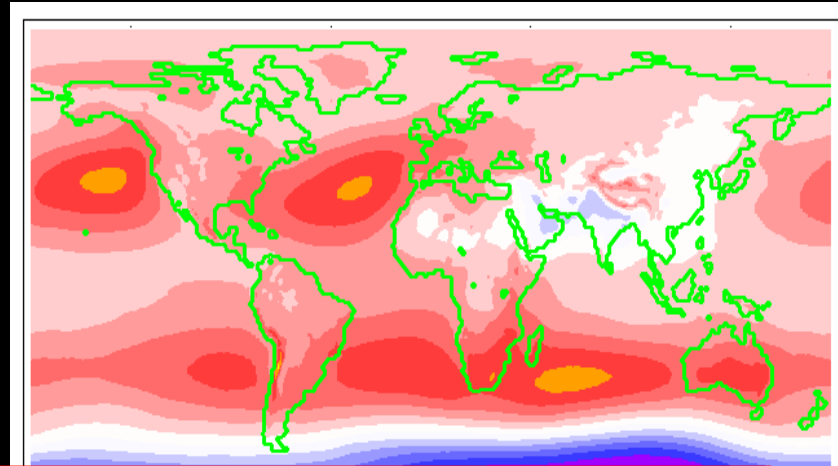


Hiver

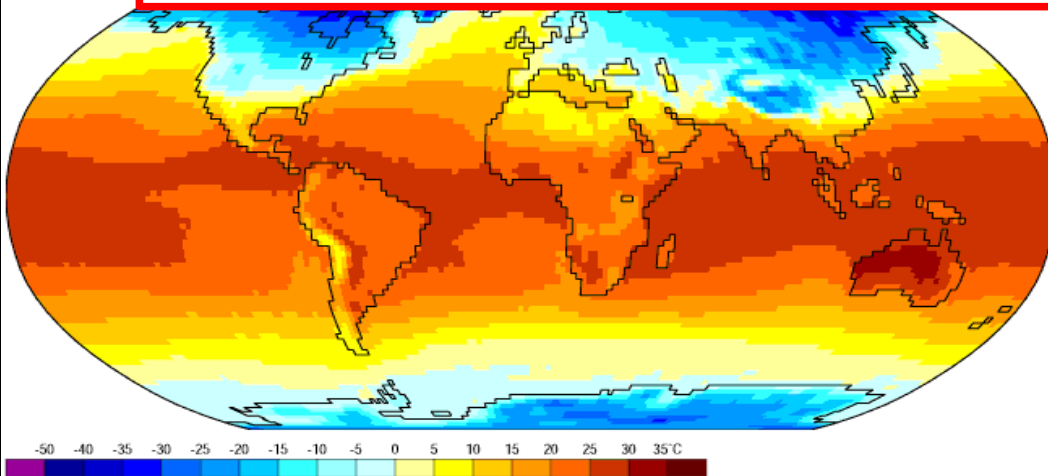
Cartes de T et de P



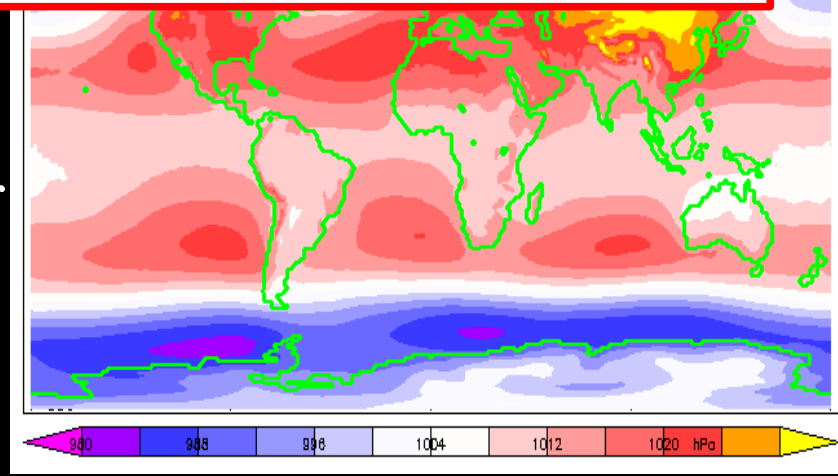
Été



Mais modèles très sensibles à certains paramètres !

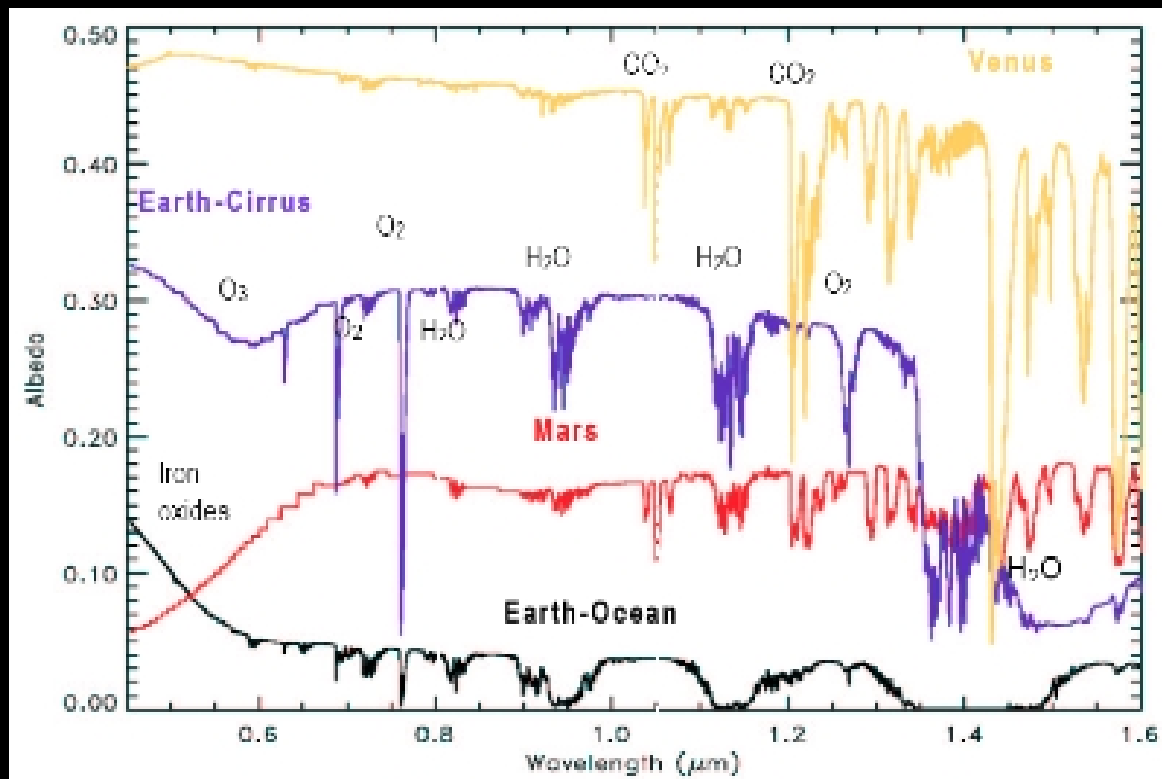


Hiver

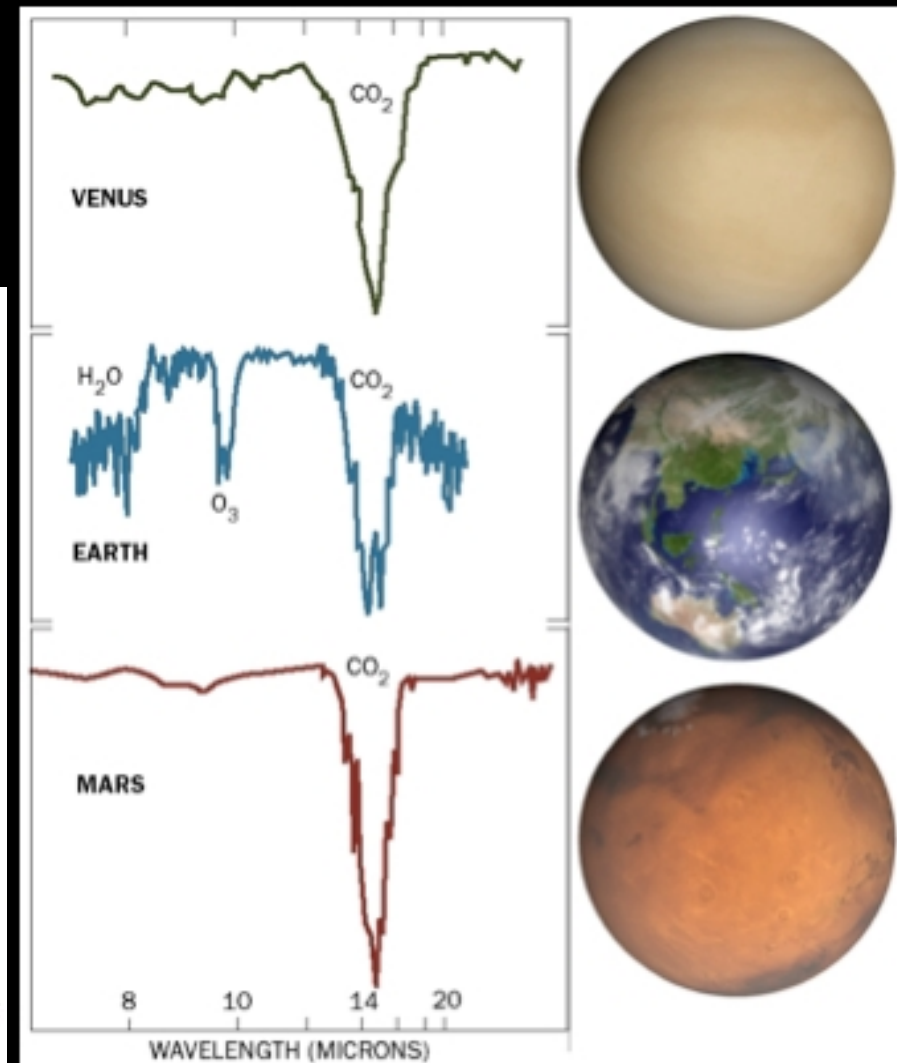


Data: NCEP/NCAR Reanalysis Project, 1959-1997 Climatologies

Observables : spectres

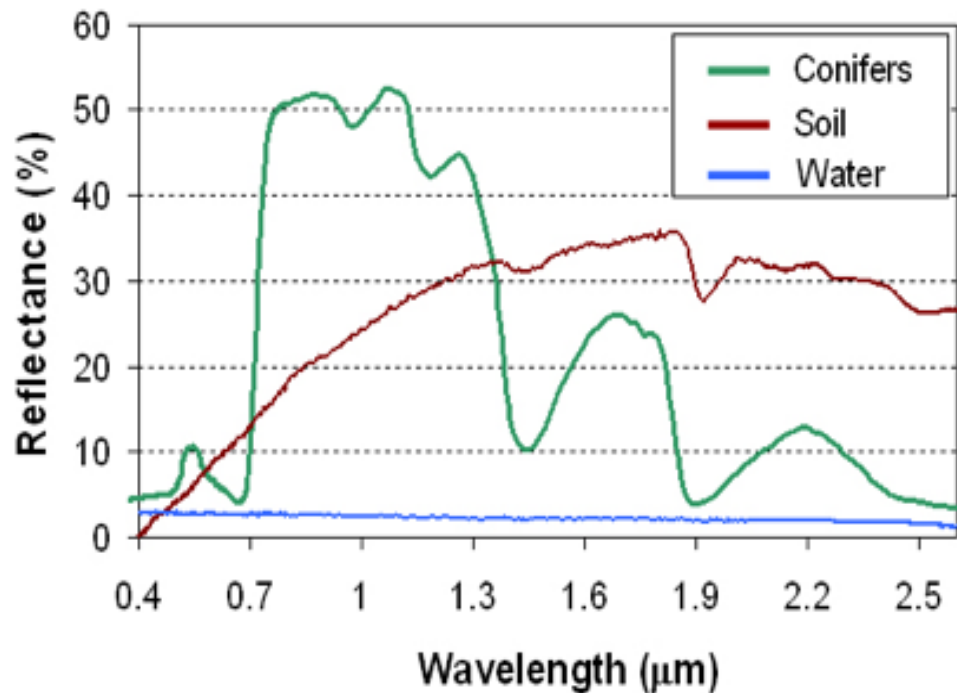


Visible



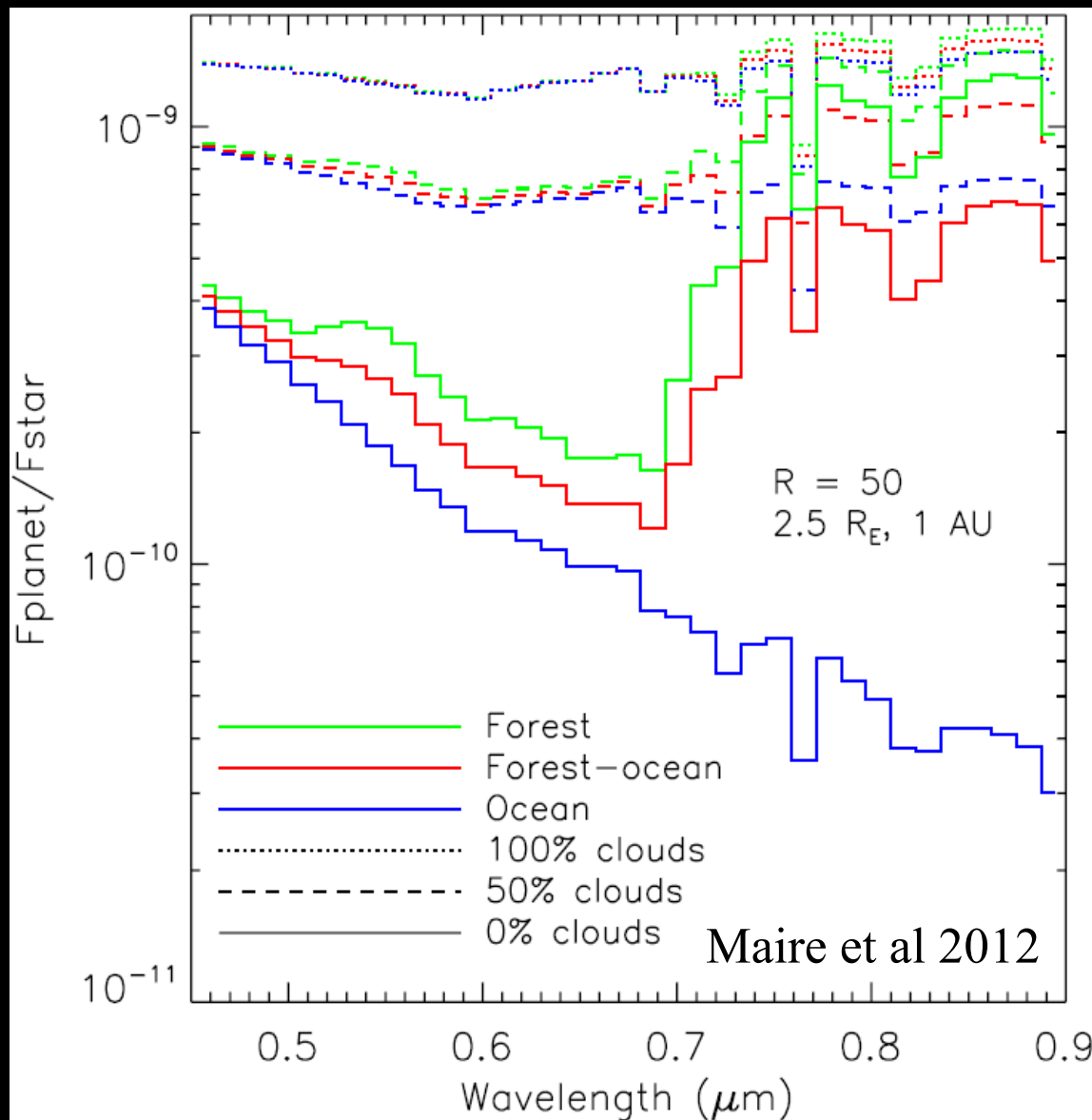
Infrarouge

spectres et végétation



- Réflectance chlorophylle augmente à 0,7microns
- Pour Terre : difficile à observer
- dépend beaucoup de la quantité de océan/végétation/nuage
- peut-être décalé vers le rouge pour étoiles plus froides

Exemples de spectres simulés

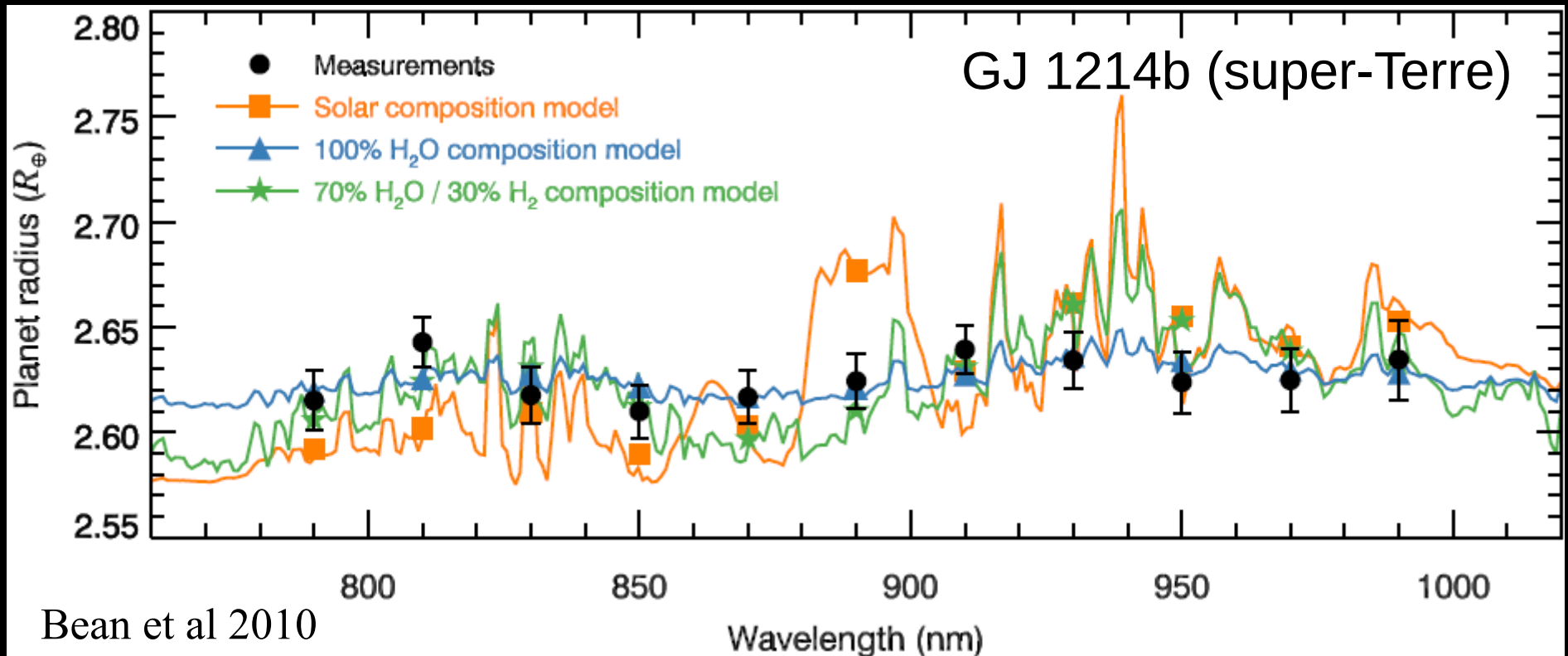


Exemples de spectres qu'on pourrait mesurer avec un télescope spatial

Importance des nuages !

Résolution spectrale !

Exemple d'un spectre mesuré



Généralement dans les articles : qq modèles qui expliquent les données sont montrés
MAIS il en existe souvent (beaucoup) d'autres

Atmosphères des planètes géantes

Différents types de modèles

Modèles auto-consistants

Paramètres (R , $\log g$, flux incident, composition, S_{init})

Simulent “toute” la physique de l'atmosphère.

Rq : “toute” car besoin d'hypothèses $\pm$ fortes

Modèles d'évolution

Simulent l'évolution de M , R , S , L .

Modèles paramétriques

Cherche les paramètres (nuages, T_{eff} , $\log g$, R) qui expliquent les observations
« sans savoir si la solution a un sens physique » (vérification a posteriori).

Différents types de spectres mesurés

**Transmission
lumière stellaire
à travers atmosphère**

Transit primaire

**Lumière stellaire
réfléchie par
atmosphère**

**Imagerie directe
(pas de mesure
à ce jour)**

**Lumière émise
par planète**

**Imagerie directe
Transit secondaire**

Différents types de spectres mesurés

**Transmission
lumière stellaire
à travers atmosphère**

Transit primaire

**Lumière stellaire
réfléchi par
atmosphère**

**Imagerie directe
(pas de mesure
à ce jour)**

**Lumière émise
par planète**

**Imagerie directe
Transit secondaire**

Planètes $> \sim 1\text{UA}$

Planètes $< \sim 1\text{UA}$

Différents types de spectres mesurés

**Transmission
lumière stellaire
à travers atmosphère**

Transit primaire

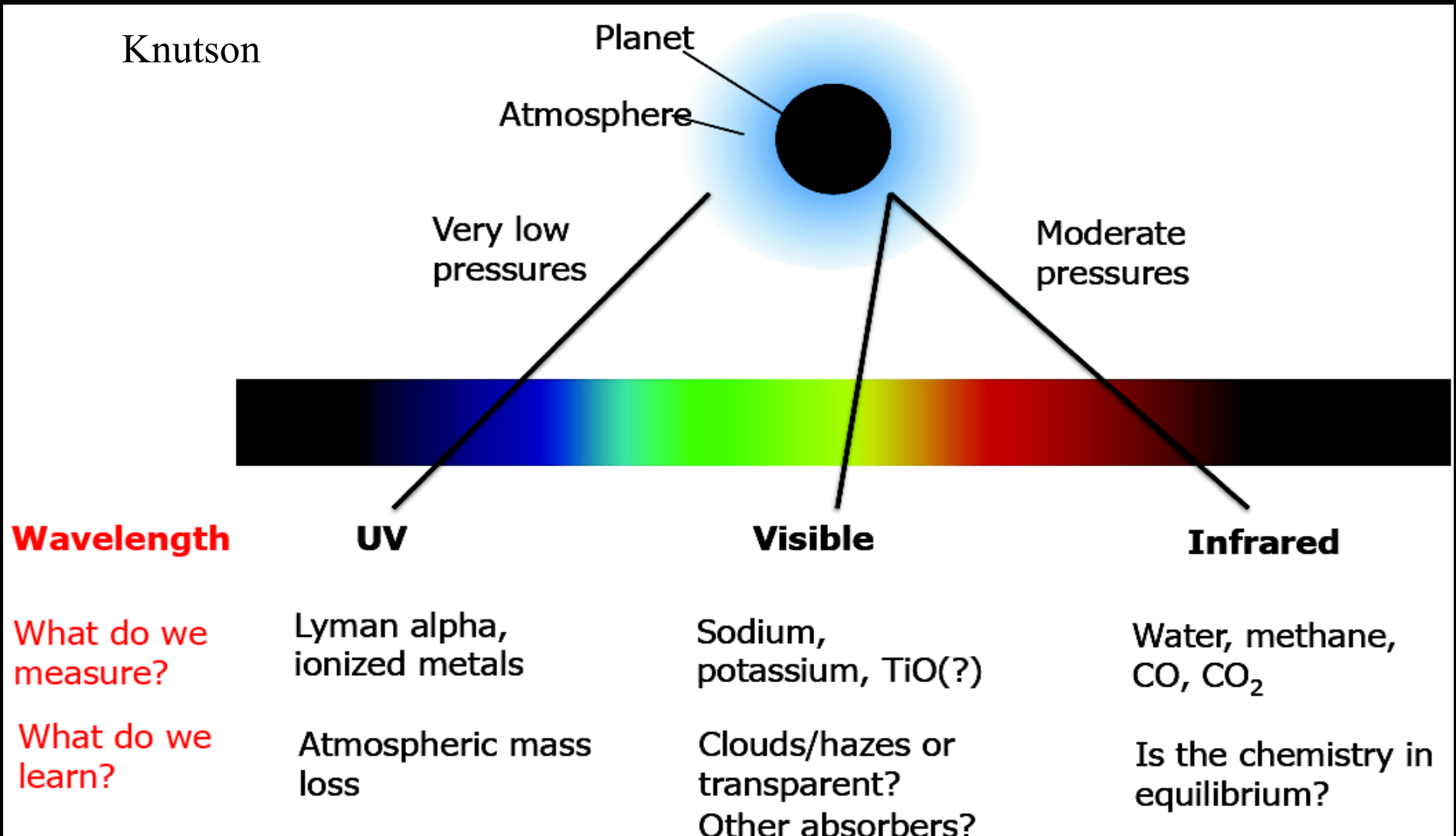
**Lumière stellaire
réfléchie par
atmosphère**

**Imagerie directe
(pas de mesure
à ce jour)**

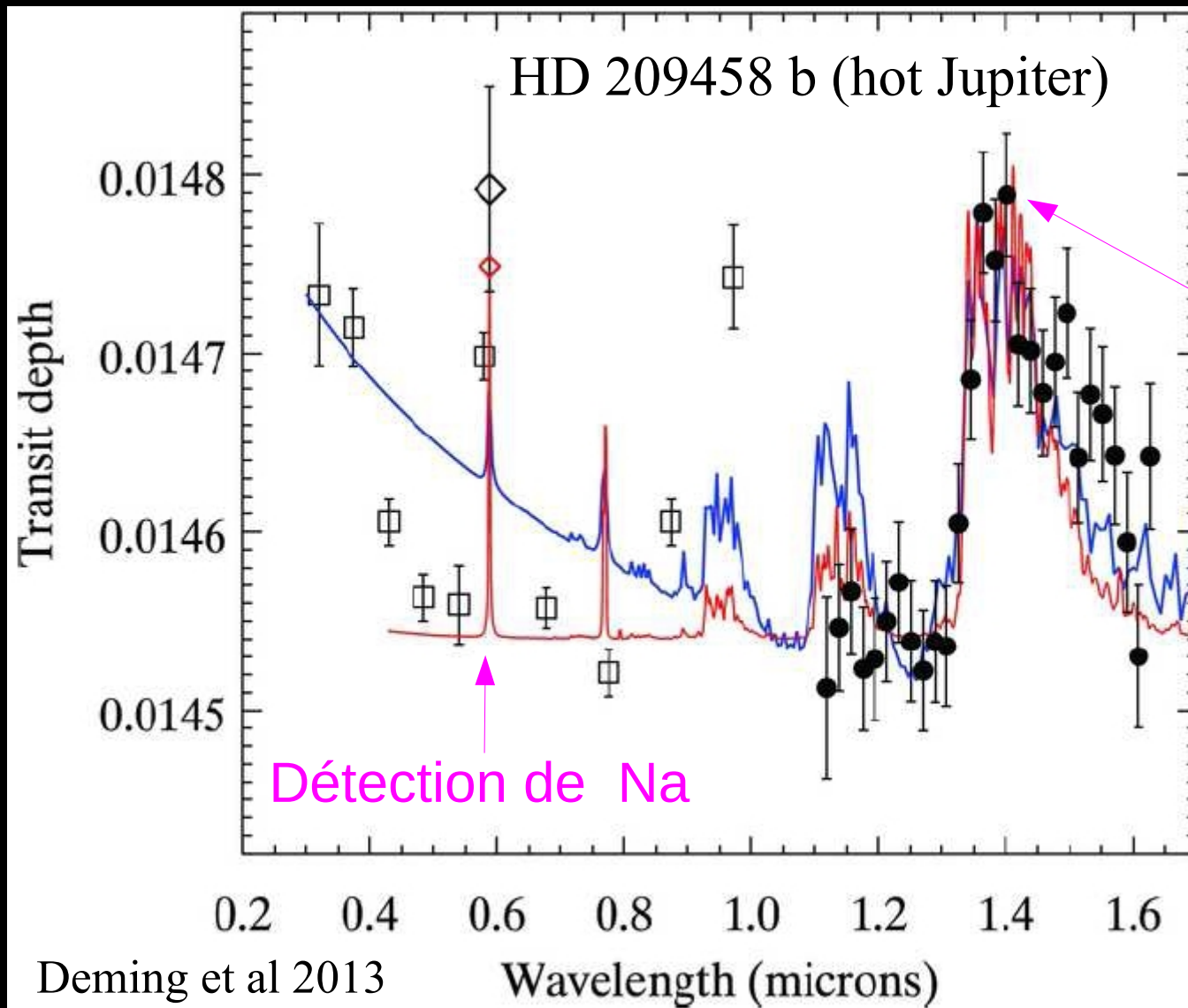
**Lumière émise
par planète**

**Imagerie directe
Transit secondaire**

spectres transmis : quelle information ?



Exemple d'un spectre par transmission



Détection de H_2O

Mais absence de signal
à 1.15mic
→ brumes d'altitude ?

Différents types de spectres mesurés

**Transmission
lumière stellaire
à travers atmosphère**

Transit primaire

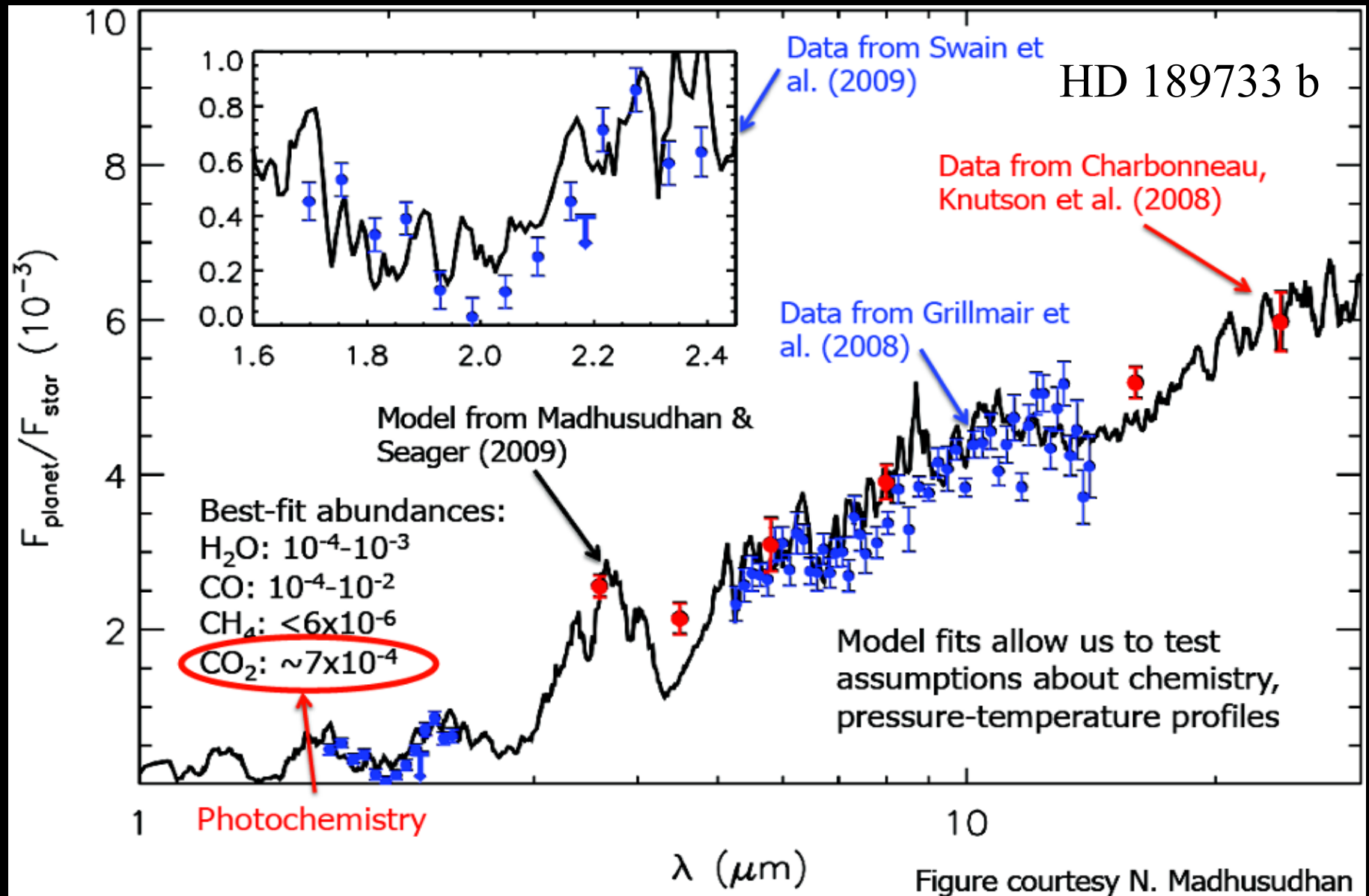
**Lumière stellaire
réfléchie par
atmosphère**

**Imagerie directe
(pas de mesure
à ce jour)**

**Lumière émise
par planète**

**Imagerie directe
Transit secondaire**

spectre par transit secondaire



Différents types de spectres mesurés

**Transmission
lumière stellaire
à travers atmosphère**

Transit primaire

**Lumière stellaire
réfléchie par
atmosphère**

**Imagerie directe
(pas de mesure
à ce jour)**

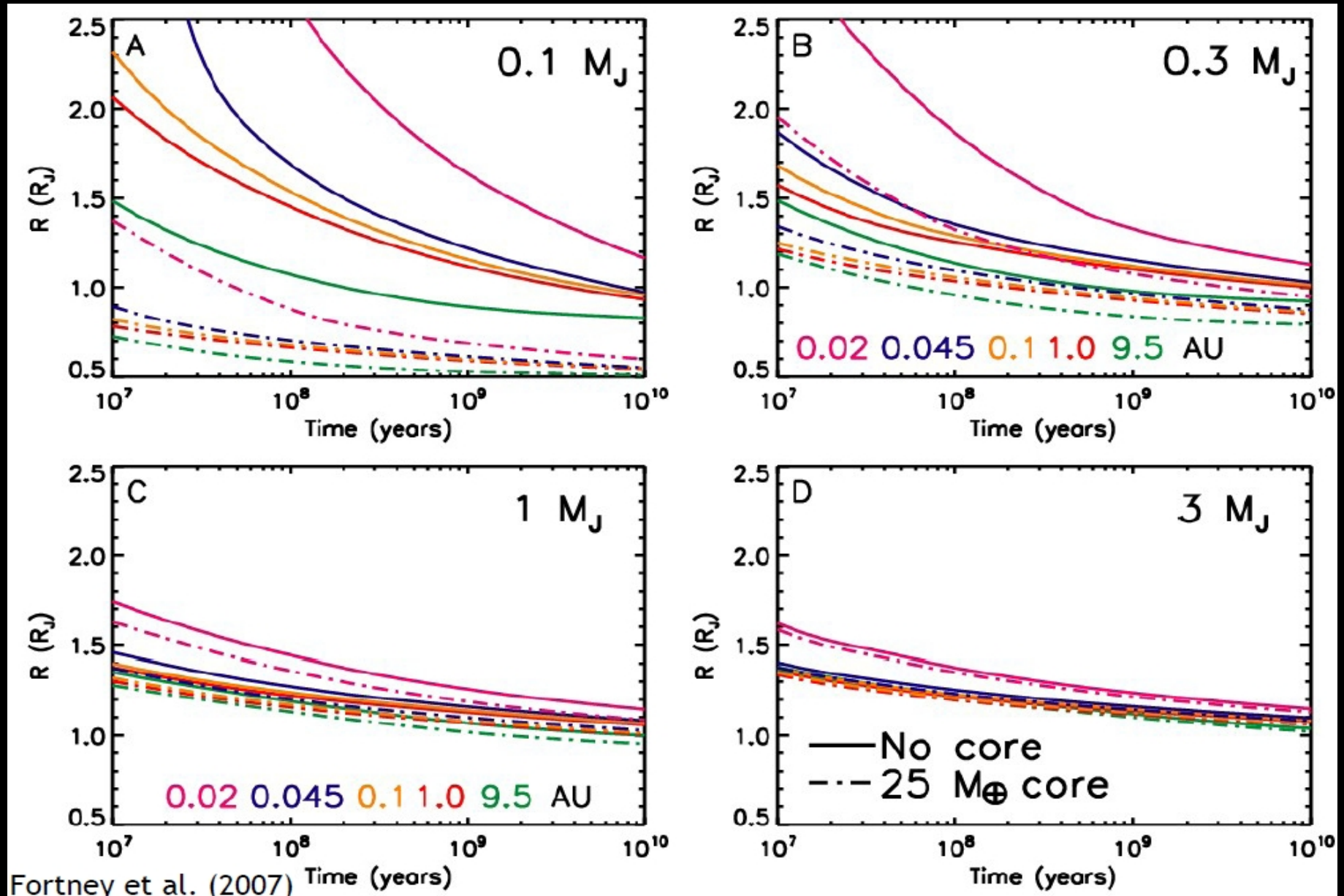
**Lumière émise
par planète**

**Imagerie directe
Transit secondaire**

Aujourd'hui planètes jeunes, voire très jeunes
($< 10^8$ ans) ($< 10^6 - 10^7$ ans)

On ne mesure ni rayon, ni masse... seulement le flux.

Modèles : contraction avec âge



Objectifs

Mesure d'un flux $\rightarrow$ masse de la planète

Mesures de plusieurs flux ou d'un spectre $\rightarrow$ physico-chimie de l'atmosphère

Comment faire ?

1/ magnitude de l'étoile

2/ distance du système (ie de l'étoile) $\rightarrow \sim \text{ok}$

3/ âge du système (ie de l'étoile) $\rightarrow$ (très) compliqué

Tables de prédictions des magnitudes des exoplanètes géantes et naines brunes

t (Gyr) = 0.120															
M _M	M _M	M _M	M/M _s	Teff	L/L _s	g	R	M _v	M _r	M _i	M _j	M _h	M _k	M _{ll}	M _m
0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	227.	-7.526	3.032	0.113	43.82	39.25	35.63	29.59	27.43	39.50	20.03	18.03
0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	295.	-7.043	3.307	0.116	33.54	29.61	26.78	23.06	22.92	30.33	17.71	15.92
0.0020	0.0020	0.0020	0.0020	403.	-6.481	3.588	0.119	29.96	25.94	23.13	20.41	20.14	23.91	16.18	14.75
0.0030	0.0030	0.0030	0.0030	475.	-6.183	3.753	0.120	28.93	24.74	21.93	19.17	18.88	21.55	15.42	14.09
0.0040	0.0040	0.0040	0.0040	537.	-5.970	3.876	0.121	28.29	24.00	21.19	18.29	18.03	19.95	14.84	13.66
0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	599.	-5.781	3.974	0.121	27.81	23.44	20.64	17.53	17.32	18.69	14.30	13.31
0.0060	0.0060	0.0060	0.0060	665.	-5.602	4.055	0.120	27.48	23.06	20.24	16.94	16.75	17.67	13.85	12.97
0.0070	0.0070	0.0070	0.0070	716.	-5.477	4.127	0.120	27.25	22.79	19.97	16.51	16.35	16.95	13.53	12.73
0.0080	0.0080	0.0080	0.0080	783.	-5.326	4.188	0.119	26.95	22.46	19.65	16.02	15.90	16.18	13.17	12.48
0.0090	0.0090	0.0090	0.0090	835.	-5.219	4.243	0.119	26.71	22.22	19.43	15.67	15.58	15.68	12.92	12.31
0.0100	0.0100	0.0100	0.0100	900.	-5.088	4.290	0.119	26.41	21.93	19.16	15.26	15.18	15.09	12.60	12.11
0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	1273.	-4.432	4.314	0.126	24.05	19.88	17.26	13.45	13.25	13.03	11.11	11.29
0.0150	0.0150	0.0150	0.0150	1298.	-4.436	4.450	0.121	24.12	19.95	17.25	13.43	13.27	13.07	11.15	11.34
0.0200	0.0200	0.0200	0.0200	1484.	-4.218	4.590	0.119	22.95	19.01	16.31	12.87	12.65	12.51	10.75	11.13
0.0300	0.0300	0.0300	0.0300	1905.	-3.764	4.745	0.122	20.43	17.19	14.87	11.75	11.44	11.17	9.98	10.56
0.0400	0.0400	0.0400	0.0400	2204.	-3.472	4.831	0.127	18.90	15.94	13.60	11.08	10.72	10.40	9.54	10.03
0.0500	0.0500	0.0500	0.0500	2441.	-3.244	4.878	0.135	17.51	15.05	12.78	10.60	10.20	9.89	9.19	9.55
0.0600	0.0600	0.0600	0.0600	2606.	-3.083	4.909	0.142	16.44	14.38	12.22	10.26	9.84	9.54	8.93	9.20
0.0700	0.0700	0.0700	0.0700	2733.	-2.944	4.921	0.152	15.60	13.81	11.78	9.97	9.54	9.25	8.69	8.91
0.0720	0.0720	0.0720	0.0720	2753.	-2.922	4.923	0.153	15.47	13.72	11.71	9.92	9.49	9.20	8.65	8.86
0.0750	0.0750	0.0750	0.0750	2783.	-2.886	4.923	0.157	15.27	13.57	11.60	9.84	9.41	9.12	8.58	8.78
0.0800	0.0800	0.0800	0.0800	2824.	-2.838	4.929	0.161	15.01	13.38	11.45	9.74	9.30	9.02	8.50	8.68
0.0900	0.0900	0.0900	0.0900	2894.	-2.753	4.937	0.169	14.56	13.03	11.20	9.56	9.11	8.83	8.34	8.50
0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	2949.	-2.673	4.936	0.178	14.19	12.73	10.97	9.38	8.93	8.66	8.18	8.33

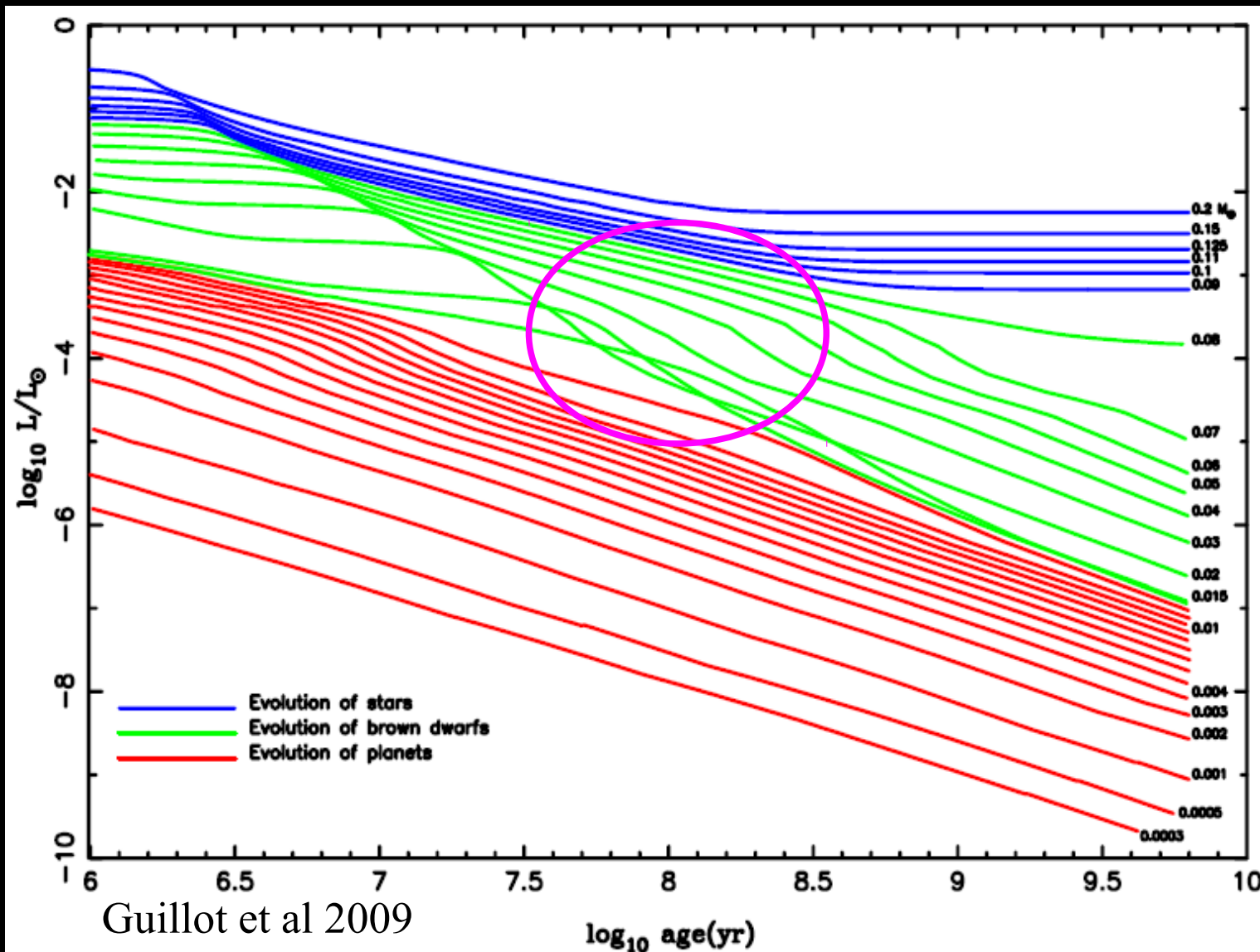
Tables de prédictions des magnitudes des exoplanètes géantes et naines brunes

t (Gyr) = 0.120

M/M _J	M/M _s	Teff	L/L _s	g	R	Mv	Mr	Mi	Mj	Mh	Mk	Mll	Mm
0.0005	0.0005	227.	-7.526	3.032	0.113	43.82	39.25	35.63	29.59	27.43			13.03
0.0010	0.0010	295.	-7.043	3.307	0.116	33.54	29.61	26.78	23.06				12.92
0.0020	0.0020	403.	-6.481	3.588	0.119	29.96	25.94	23.37					12.75
0.0030	0.0030	475.	-6.183	3.753	0.120	28.93	24.94						12.69
0.0040	0.0040	537.	-5.970	3.876	0.121	28.00							12.56
0.0050	0.0050	599.	-5.781	3.974									13.31
0.0060	0.0060	665.	-5.602										12.97
0.0070	0.0070	716.											12.73
0.0080	0.0080												12.48
0.0100	0.0100												12.31
0.0120	0.0120												12.11
0.0150	0.0150												11.29
0.0200	0.0200												11.34
0.0250	0.0250												11.13
0.0300	0.0300												10.56
0.0400	0.0400												10.03
0.0500	0.0500												9.55
0.0600	0.0600												9.20
0.0700	0.0700												8.91
0.0720	0.0720												8.86
0.0750	0.0750												8.78
0.0800	0.0800												8.68
0.0900	0.0900												8.50
0.1000	0.1000												8.33

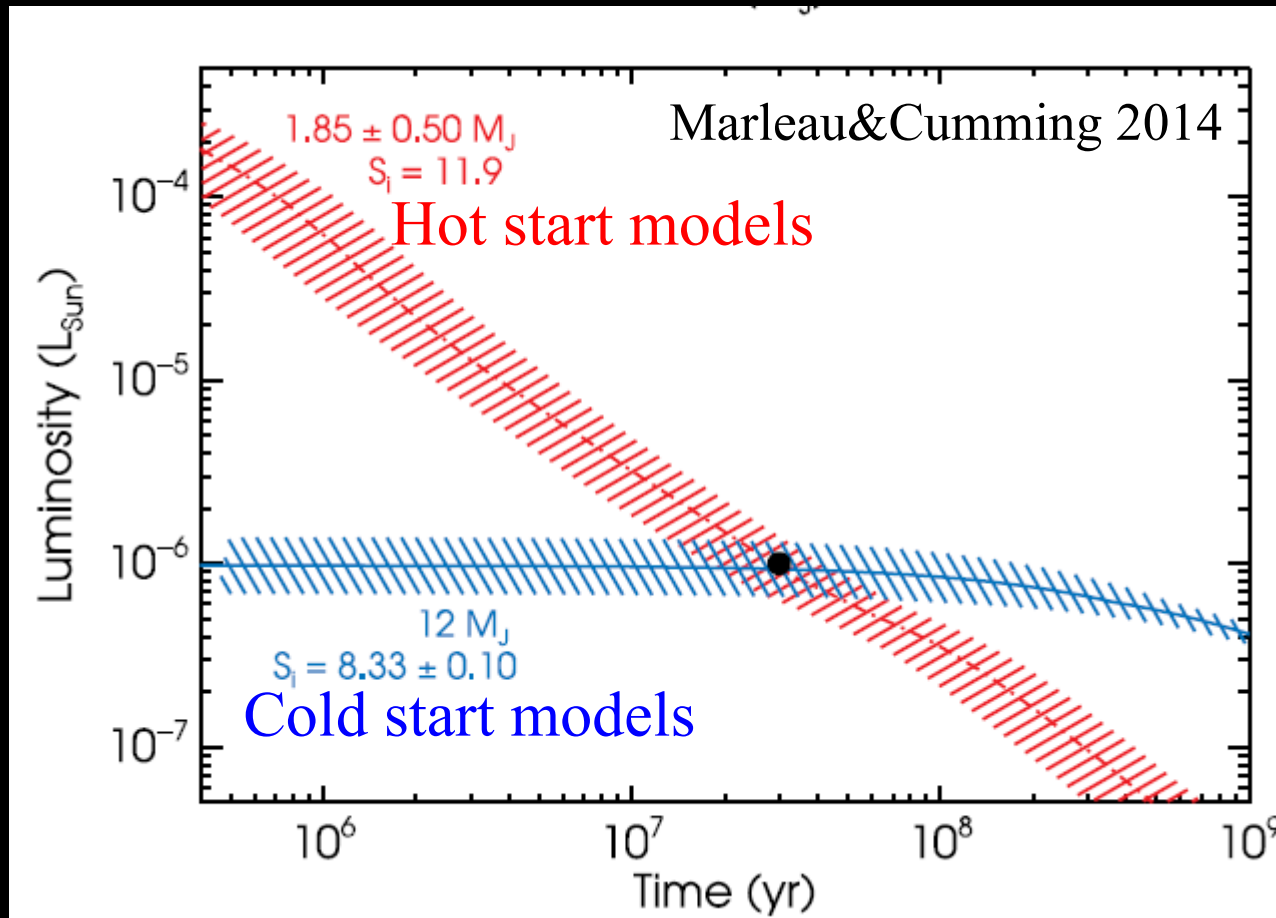
Autant de tables que de modèles !

Modèles : luminosité diminue âge



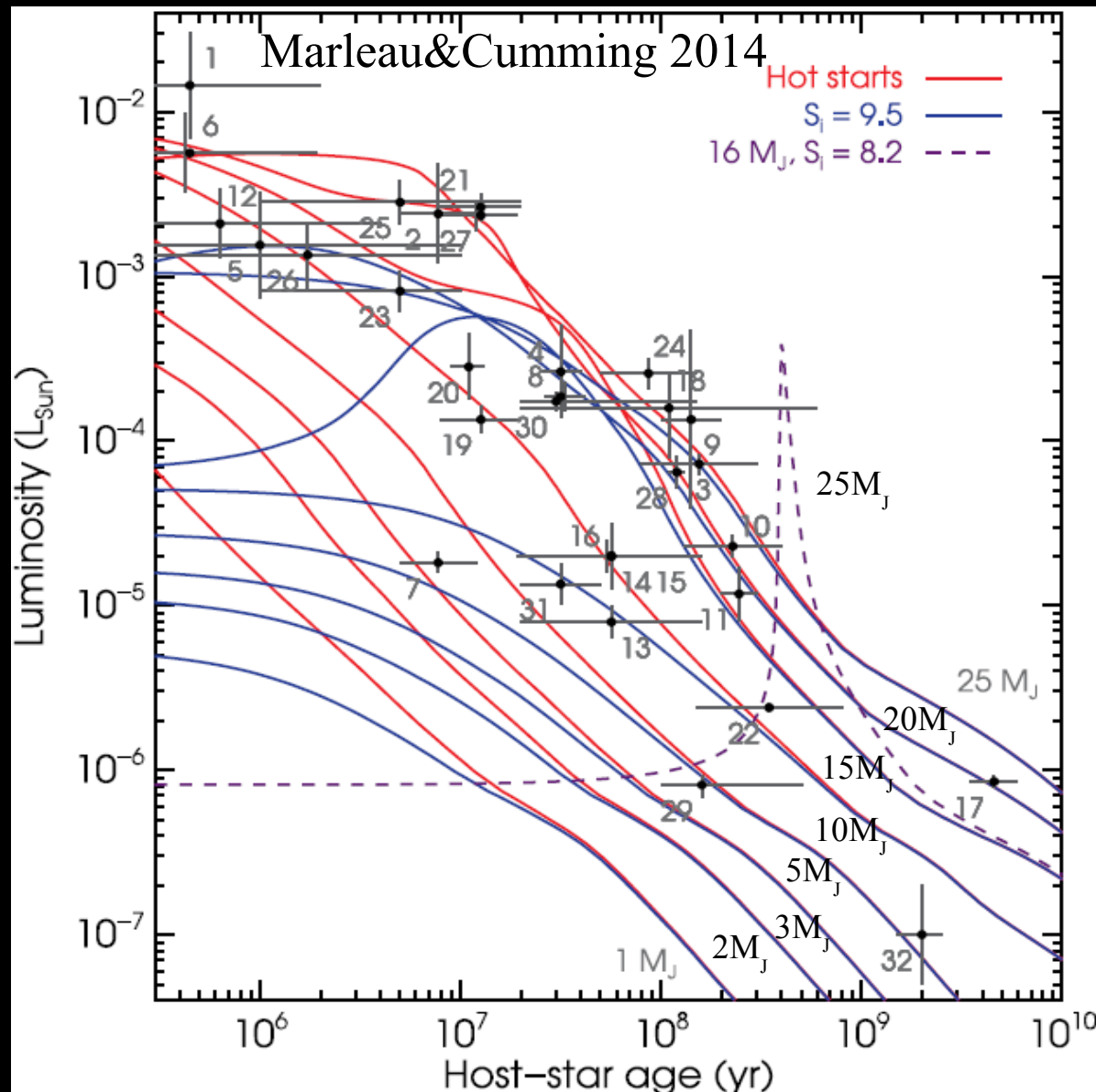
Il y a des
dégénérescences
pour les naines
brunes

Modèles : luminosité diminue âge



Dégénérescences des couples (S_{init} , M)

Détermination de la masse planétaire

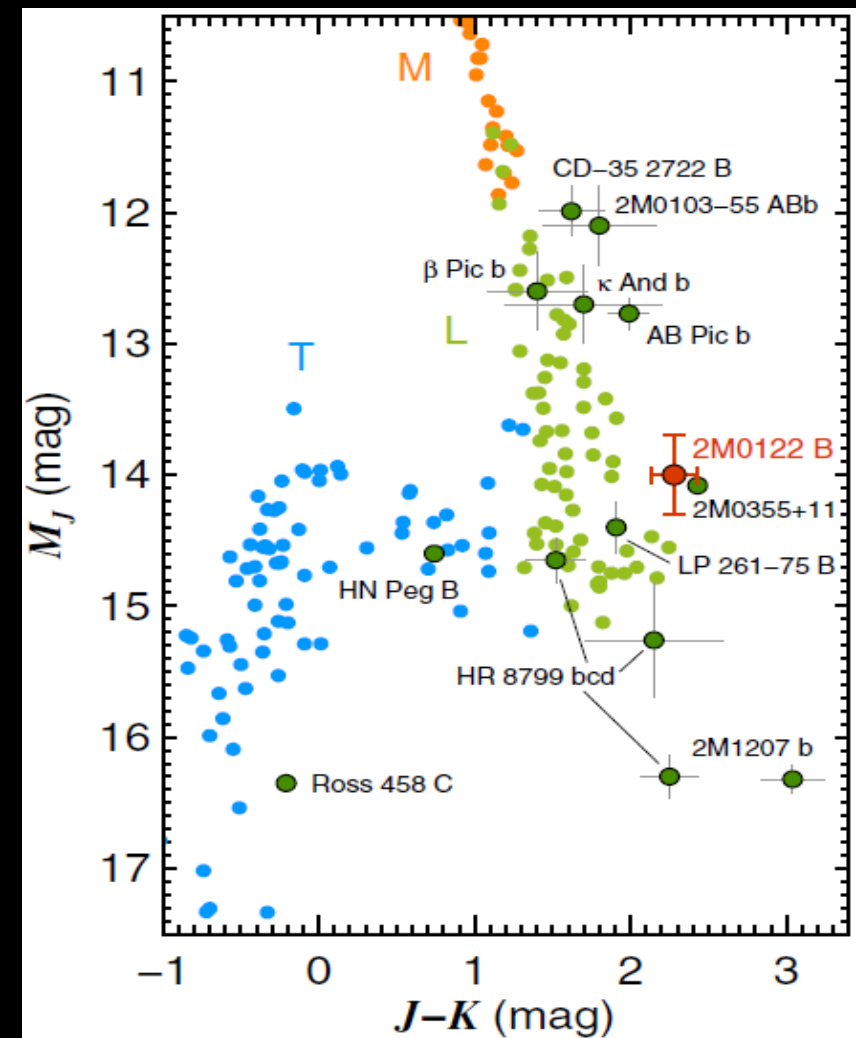
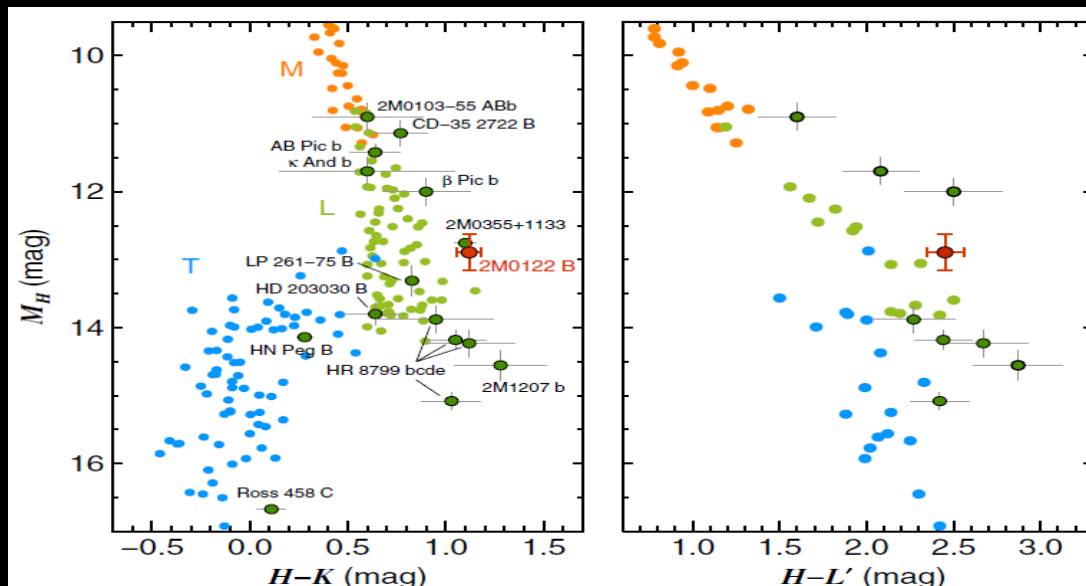
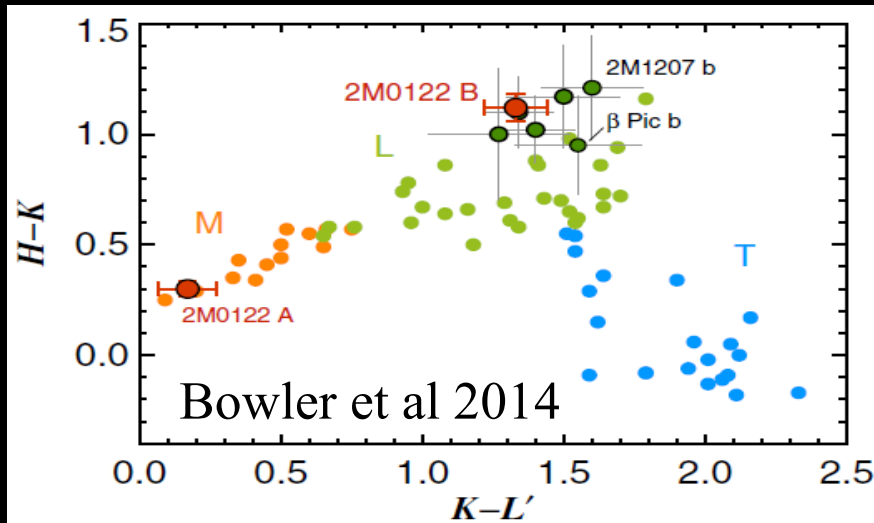


Tous les modèles ne
sont pas en accord

→ détermination de
l'orbite : masse
dynamique

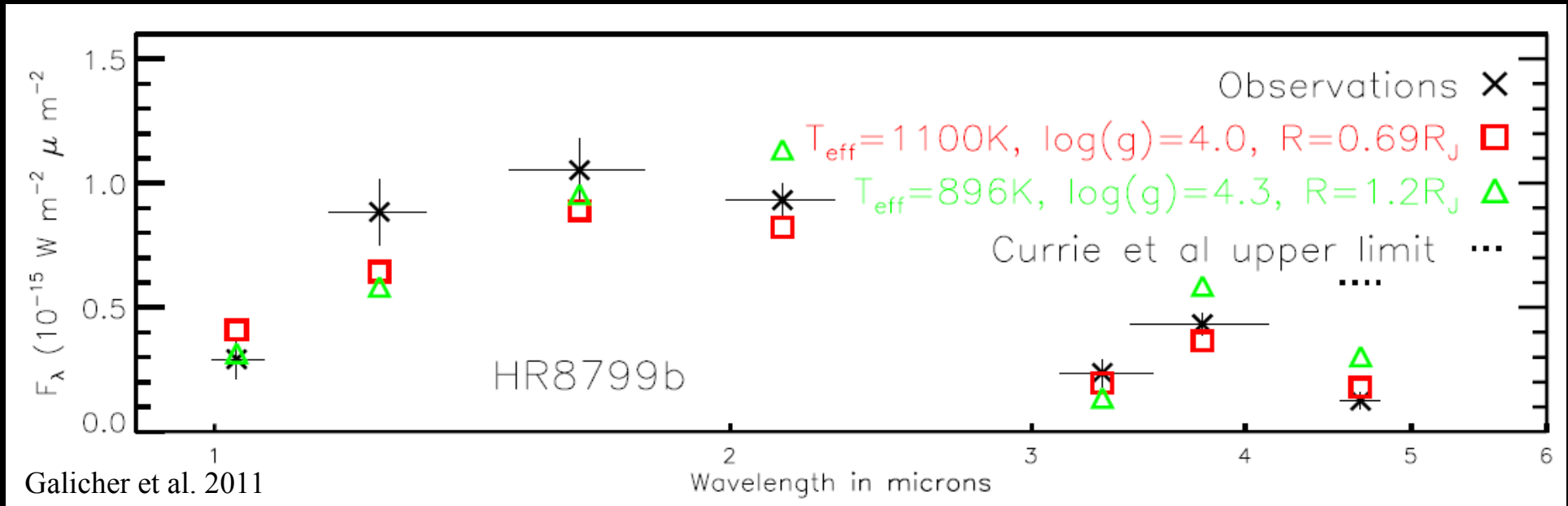
Caractérisation d'atmosphères (1/3)

Les diagrammes couleur-couleur ou magnitude-couleur
→ nuages, métallicité, équilibre thermodynamique local, ...

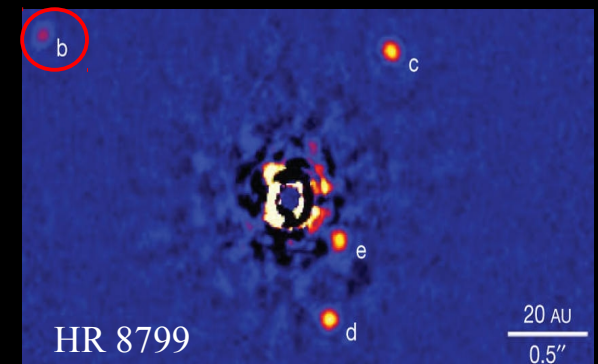


Caractérisation d'atmosphères (2/3)

Les SED (spectral energy distribution)

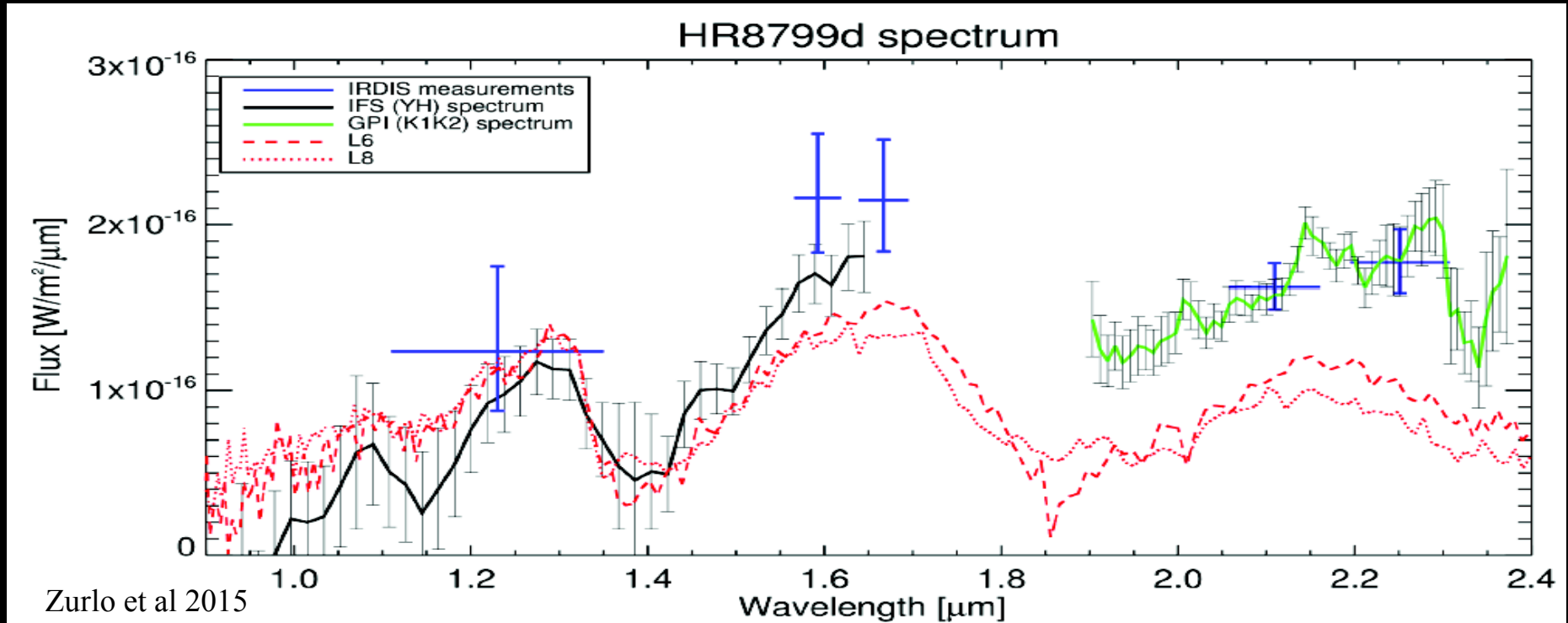


Premières contraintes mais manque de
résolution spectrale !

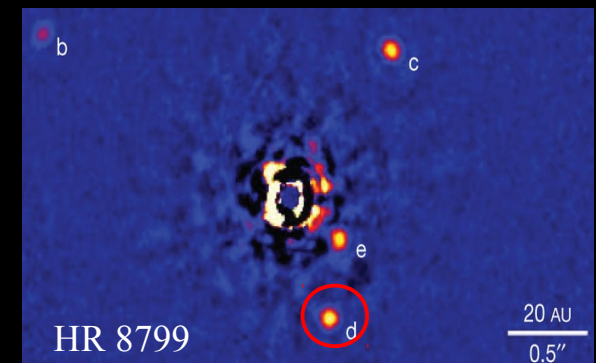


Caractérisation d'atmosphères (3/3)

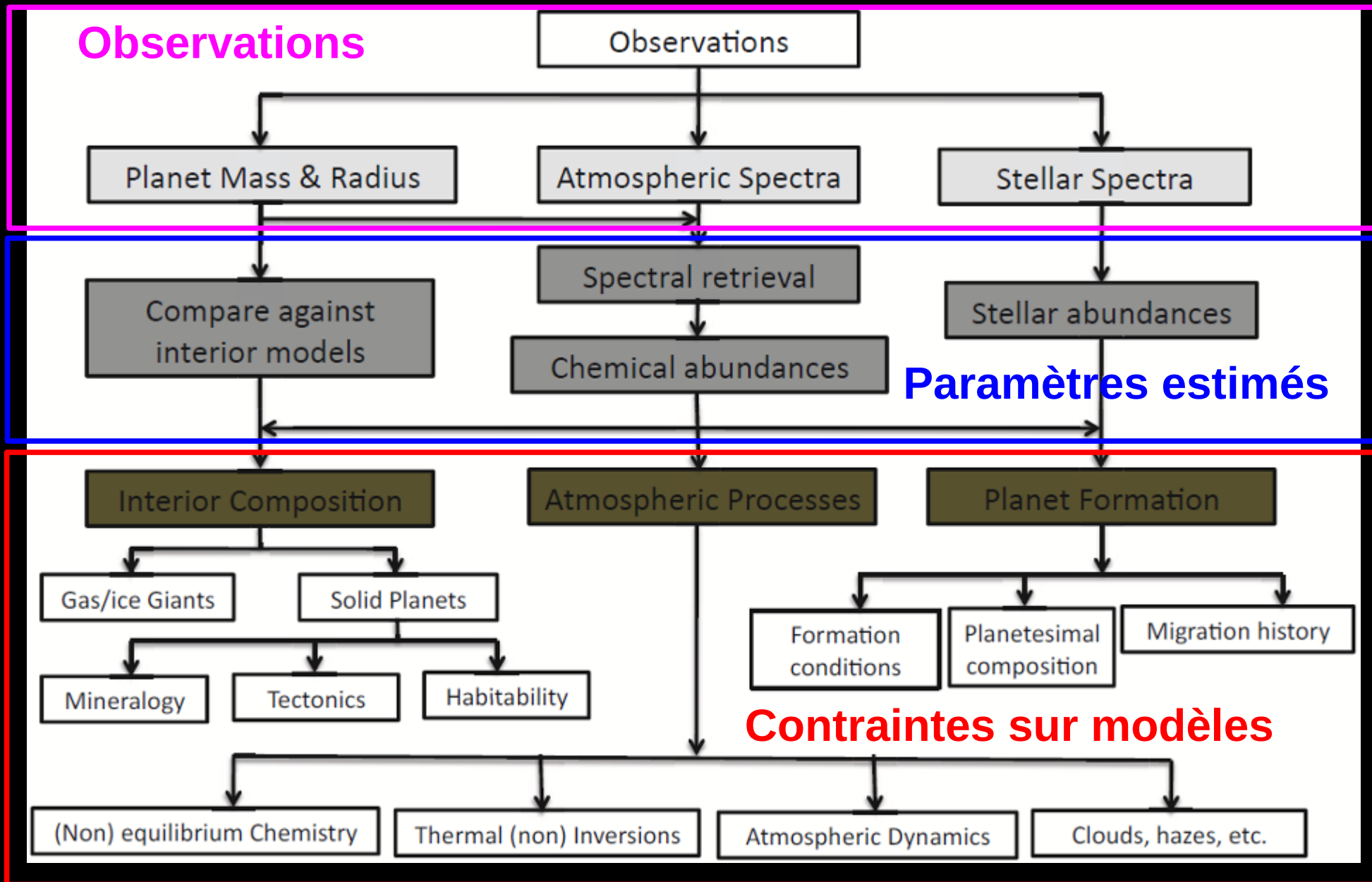
Premiers spectres



Résolution spectrales faibles mais informations sur type spectral, nuages, métallicité, ...



Conclusions



Madhusudhan et al 2014