

Un disque circumplanétaire autour de la planète du système binaire 2MASS J01033563-55155615(AB) ?

Soutenance de stage 30 juin 2025

Master 1 Noyaux, Particules, Univers/Agrégation

Laboratoire : *Max Planck Institut für Astronomie*, Heidelberg (Allemagne)

Tuteur : Gaël CHAUVIN Co-Tuteur : Matthieu RAVET

Etudiant : Gaël GOMMENDY

Sommaire

1

Introduction

- D'autres mondes ?
- Qu'est qu'un CPD ?
- Qu'est ce qu'une naine brune ?
- DELORME AB b

2

Méthodes et Outils

- Code ForMoSA
- Modèles de corps noirs
- Grille d'atmosphère ExoREM

3

Résultats

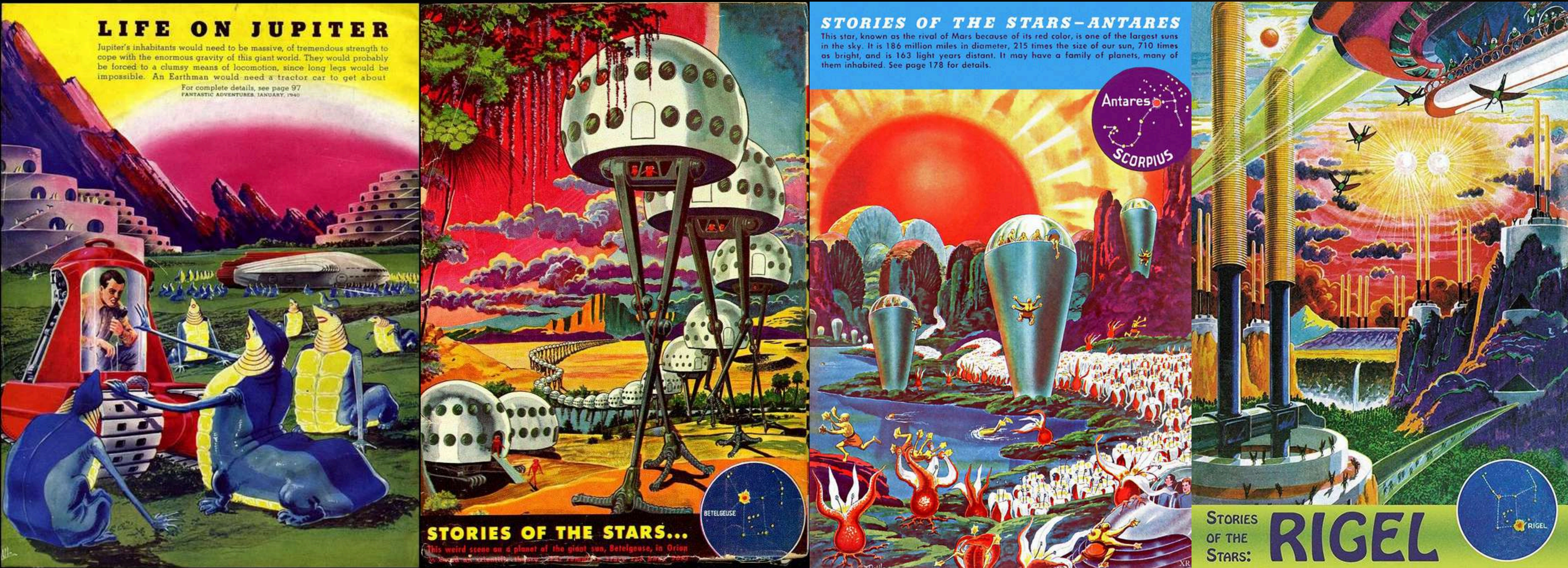
- Instruments et Spectre DELORME AB b
- Inversement du spectre sur ForMoSA

4

Conclusions et Perspectives

Introduction

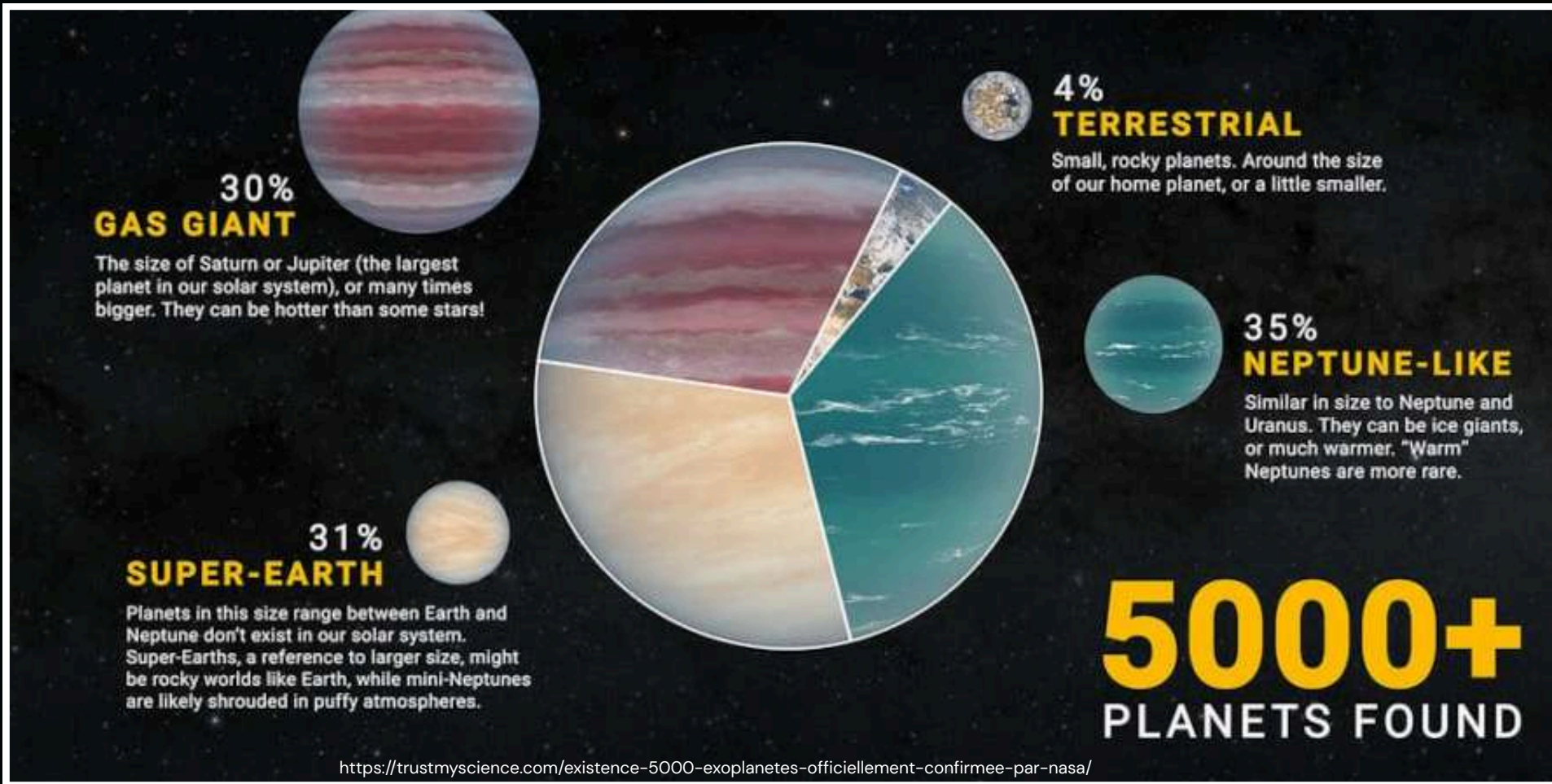
D'autres mondes ?



Illustrations de Franck R. Paul (1884-1963) pour des quatrièmes de couverture de magazine

Introduction

D'autres mondes ?



Introduction

Qu'est ce qu'un CPD (Circum Planetary Disk) ?

Géométrie

C'est un disque qui entoure une planète en formation.

- Taille : de $\sim R_{\text{jup}}$ à $100 R_{\text{jup}}$
- Température : ~ 100 à ~ 1000 K (émet dans IR)

Origine

Se forme lorsque de la matière en provenance du disque protoplanétaire principal est capturée par la gravité de la planète massive.

Composition

- Gaz (molécules $\sim \text{nm}$)
- Poussière (grains $\sim \mu\text{m}$)

Pourquoi les étudier ?

- Berceau de satellites naturels ?
- Phénomènes d'accrétion de la planète
- Explique des émissions en infrarouge non prédites par les modèles d'atmosphères (pour certaines planètes)

Introduction

Qu'est ce qu'un CPD (Circum Planetary Disk) ?

Géométrie

C'est un disque qui entoure une planète en formation.

- Taille : de $\sim R_{\text{jup}}$ à $100 R_{\text{jup}}$
- Température : ~ 100 à ~ 1000 K (émet dans IR)

Origine

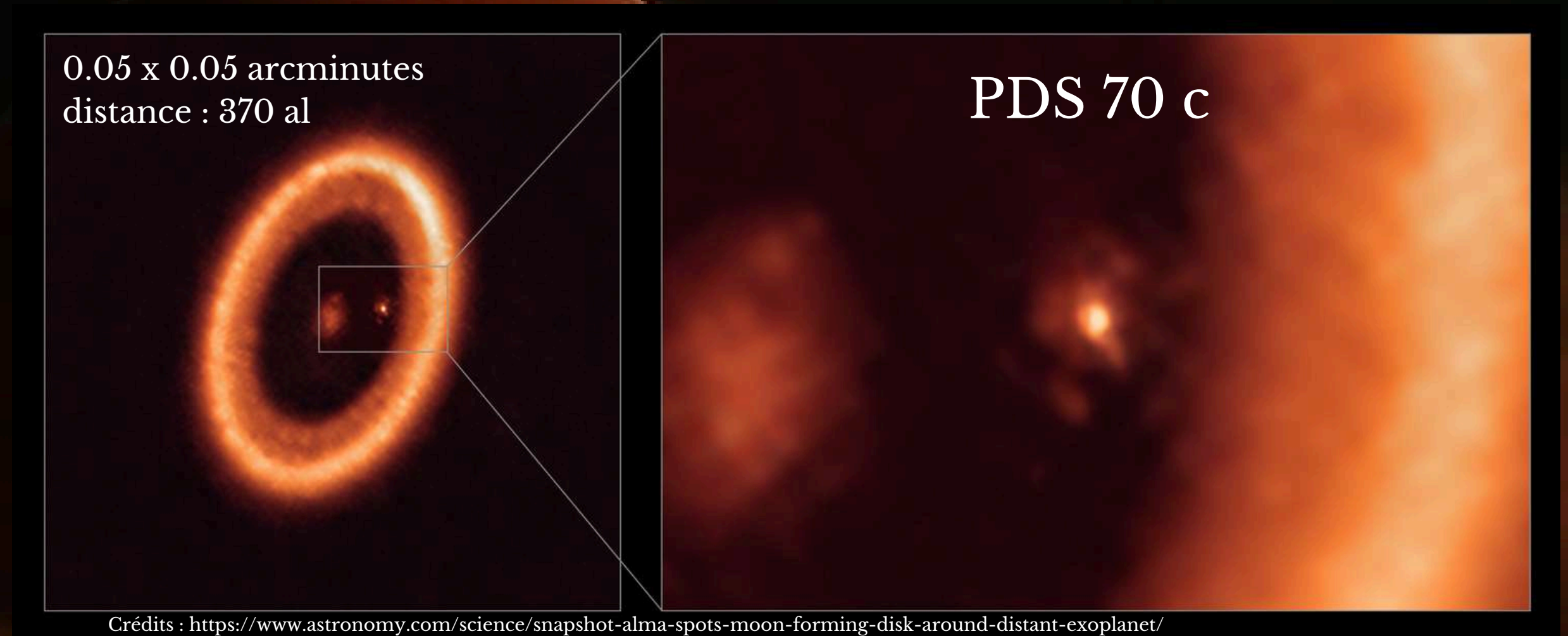
Se forme lorsque de la matière en provenance du disque protoplanétaire principal est capturée par la gravité de la planète massive.

Composition

- Gaz (molécules $\sim \text{nm}$)
- Poussière (grains $\sim \mu\text{m}$)

Pourquoi les étudier ?

- Berceau de satellites naturels ?
- Phénomènes d'accrétion de la planète
- Explique des émissions en infrarouge non prédites par les modèles d'atmosphères (pour certaines planètes)



Introduction

Qu'est ce qu'une naine brune ?

Une naine brune est un objet intermédiaire entre une planète géante et une étoile.

- Trop massive pour être une planète
- Ne fais pas de nucléosynthèse comme une étoile

Elles émettent surtout dans IR
Leur spectre présente des signatures de molécules comme H₂O, CH₄, CO, NH₃ ...

Pourquoi les étudier ?

- Composition et mécanismes de formation proches des exoplanètes géantes
- Certaines sont isolées, sans étoile hôte, ce qui permet une observation plus directe et simple
- Permettent de mieux définir la frontière planète/étoile (question débattue aujourd'hui)



Introduction

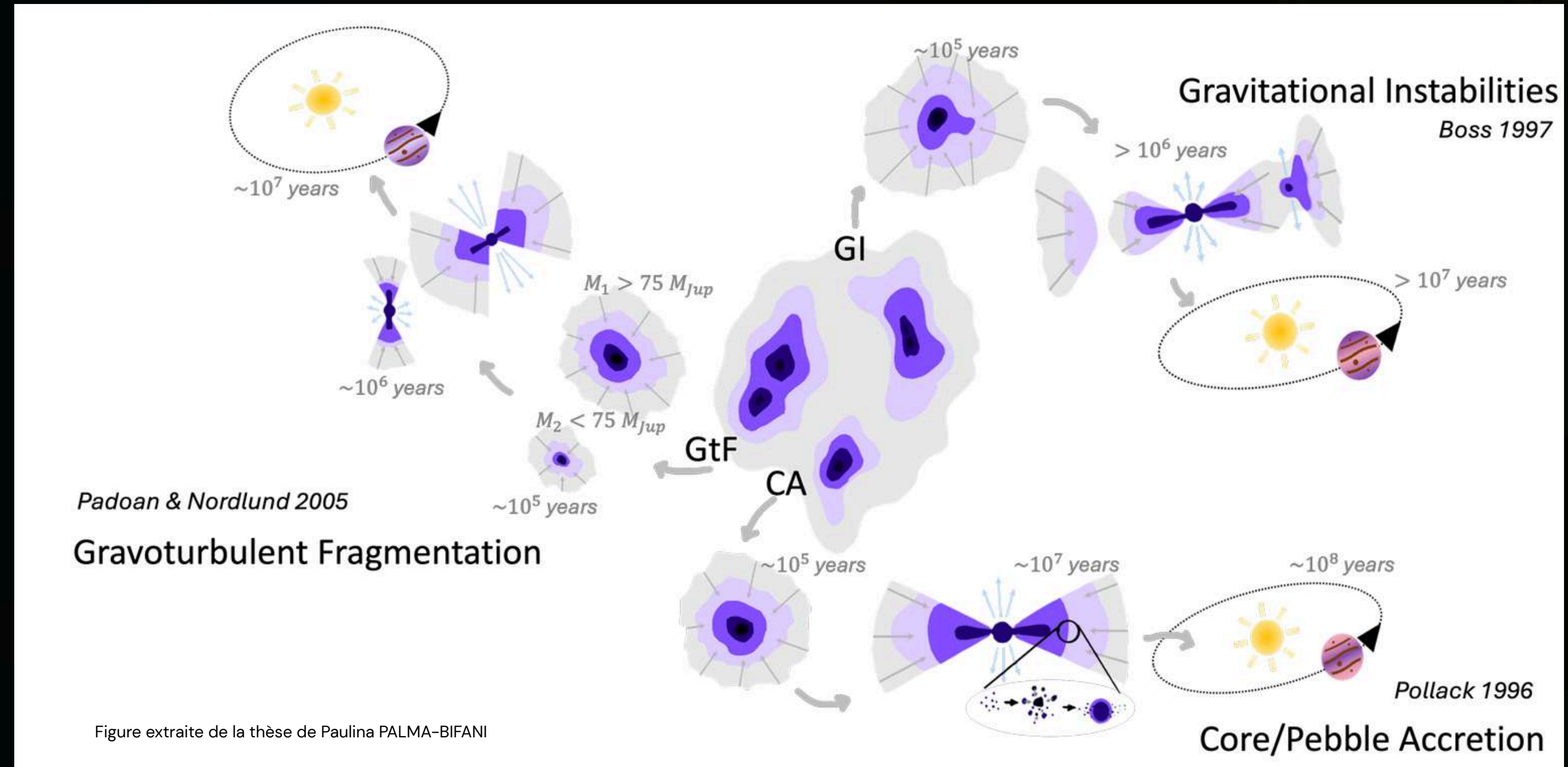
Qu'est ce qu'une naine brune ?

Comment sont-elles formées ?

Les mécanismes de formation restent assez flous aujourd'hui.

3 modèles sont utilisés :

- Fragmentation de nuage
- Accrétion de corps
- Instabilité gravitationnelle



Introduction

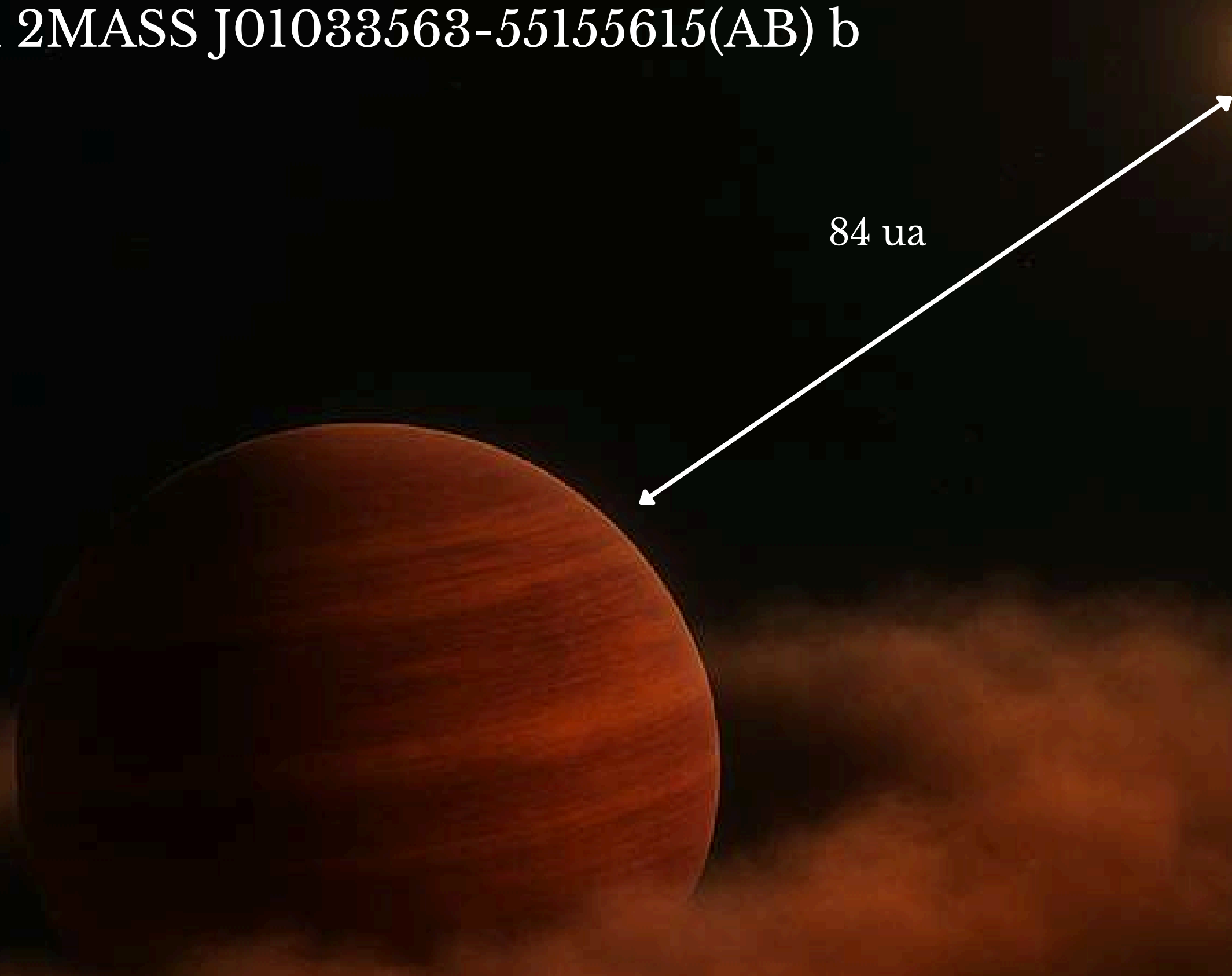
DELORME AB b ou 2MASS J01033563-55155615(AB) b

Système :

Découverte : 2013
(imagerie directe)

Distance : 47.2 pc

Séparation : 84 ua



Introduction

DELORME AB b ou 2MASS J01033563-55155615(AB) b

Système :

Découverte : 2013
(imagerie directe)

Distance : 47.2 pc

Séparation : 84 ua

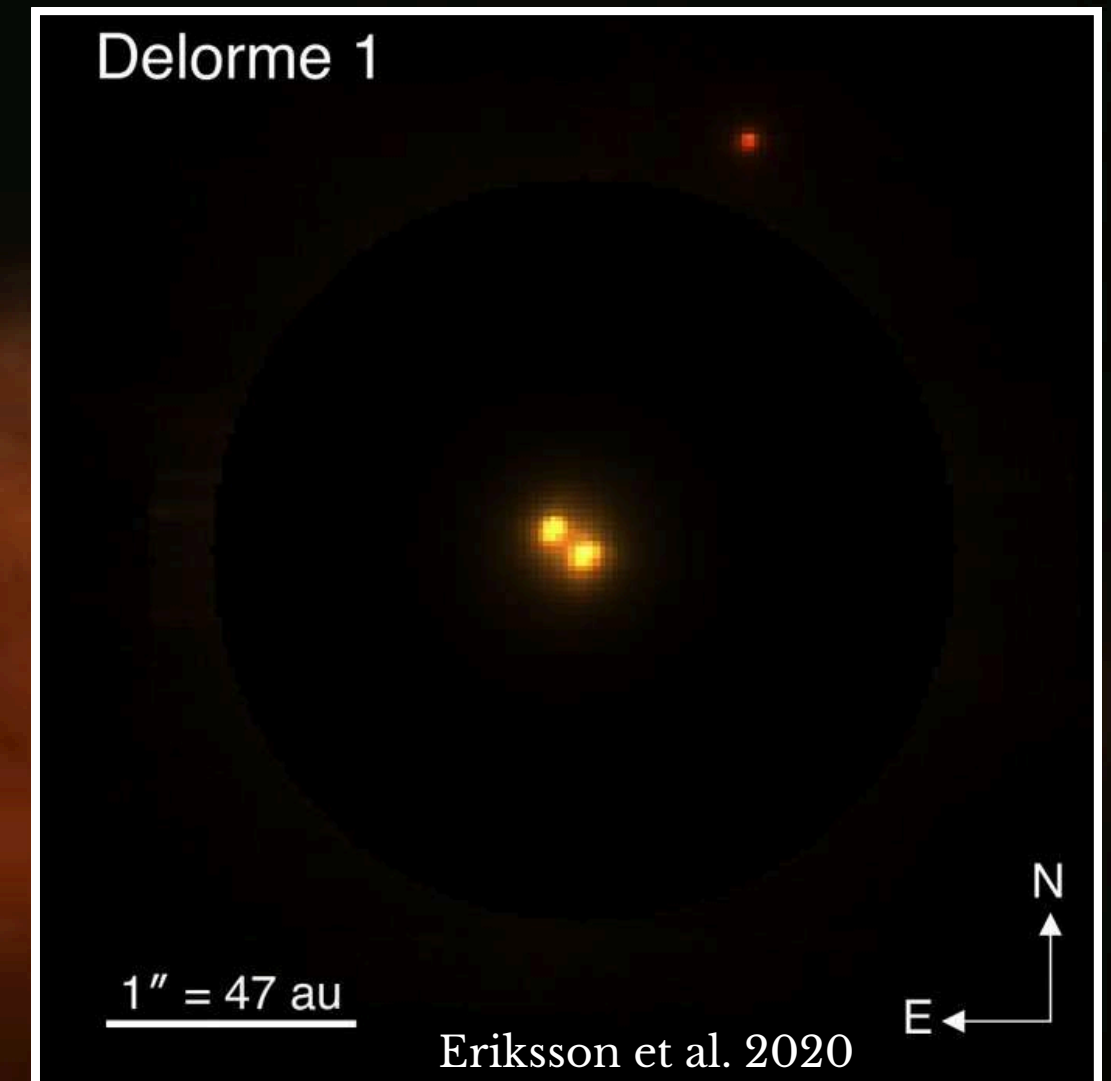
Planète :

Masse : 12-14 Mjup

Température : ~1800 K

Age : 30-45 Myr

Type spectral : L0



Introduction

DELORME AB b ou 2MASS J01033563-55155615(AB) b

Systeme :

Découverte : 2013
(imagerie directe)

Distance : 47.2 pc

Séparation : 84 ua

Planète :

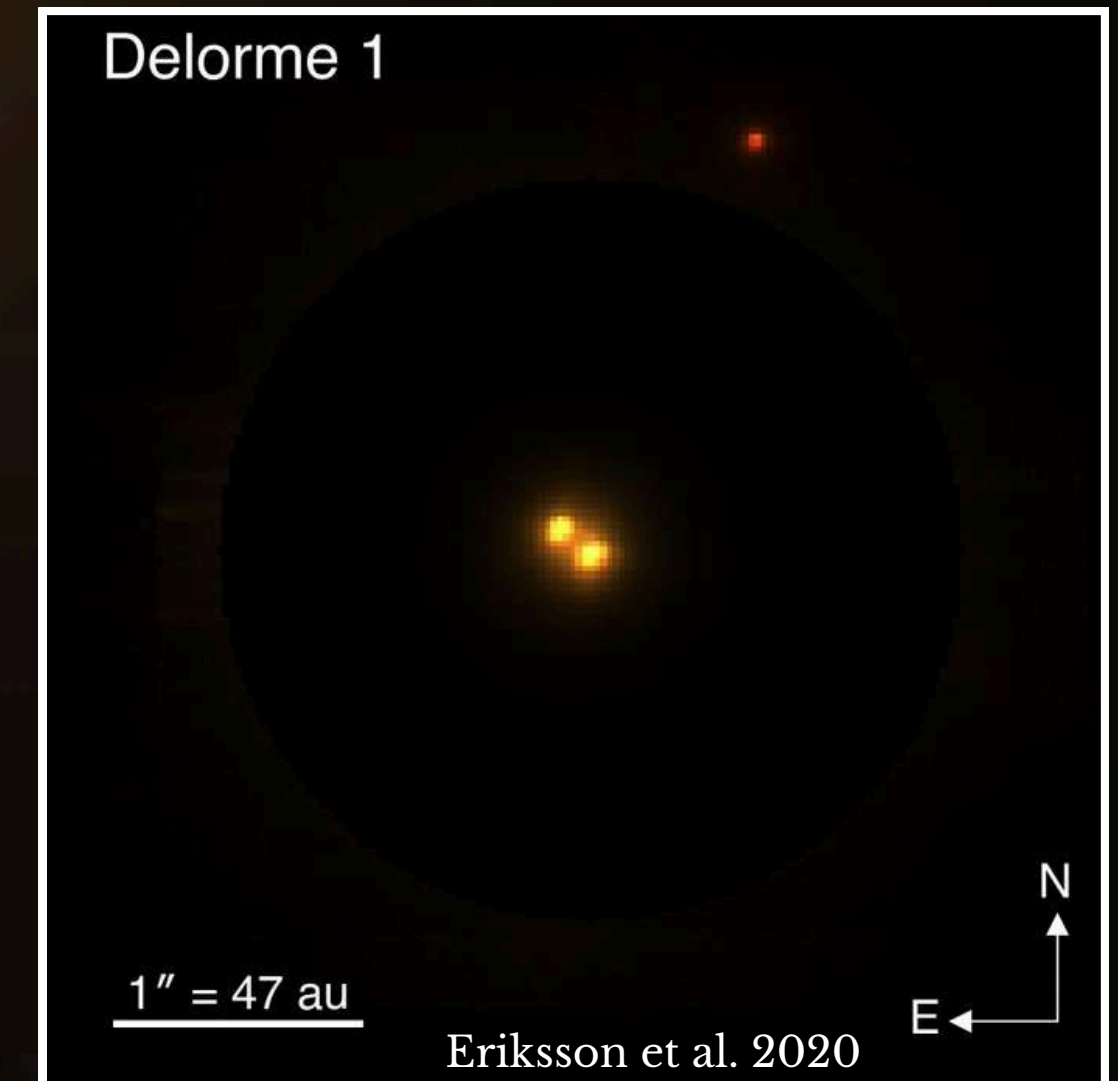
Masse : 12-14 Mjup

Température : ~1800 K

Age : 30-45 Myr

Type spectral : L0

2MASS J01033563-
55155615 AB 1



Introduction

DELORME AB b ou 2MASS J01033563-55155615(AB) b

Systeme :

Découverte : 2013
(imagerie directe)
Distance : 47.2 pc
Séparation : 84 ua

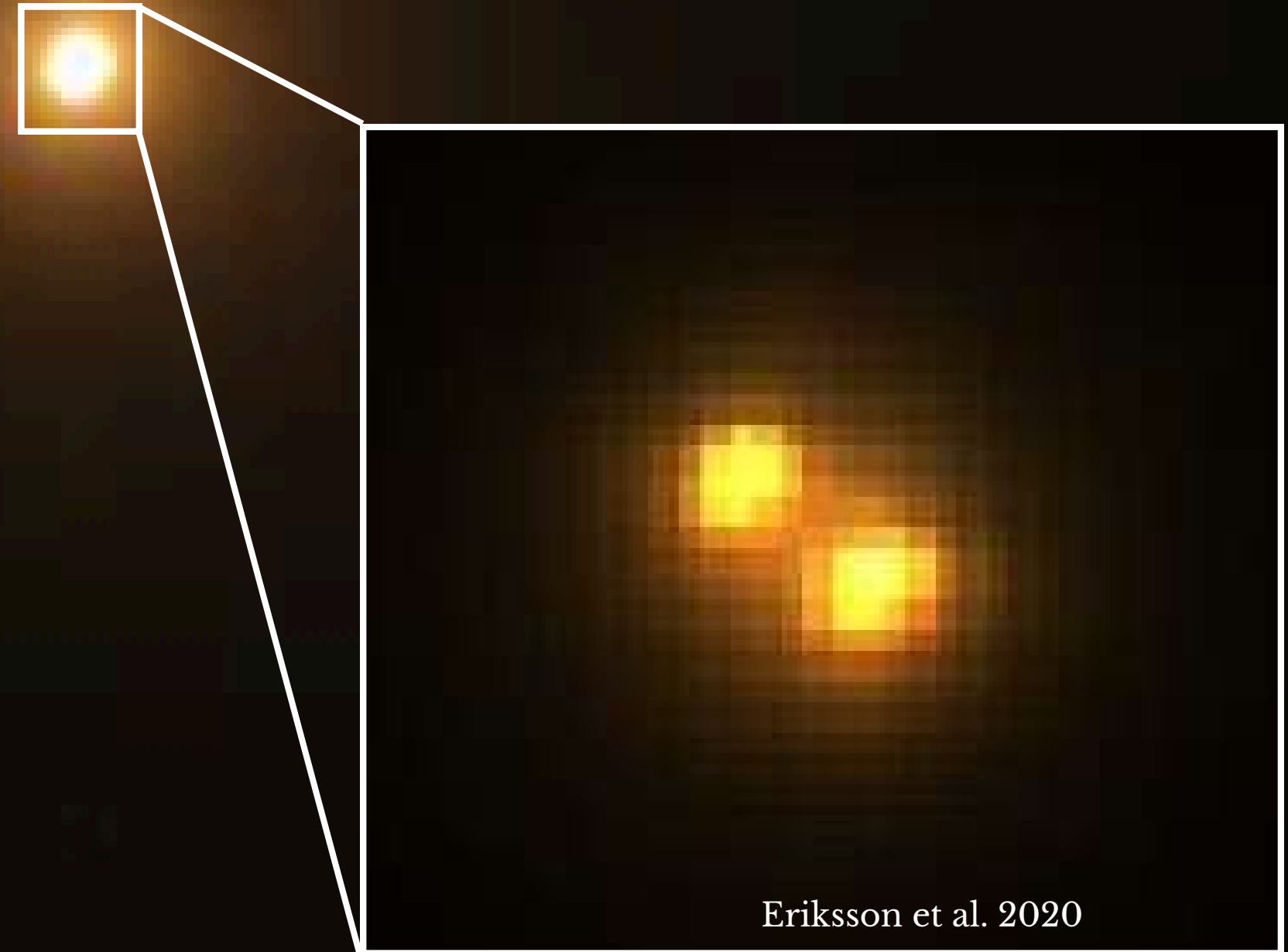
Planète :

Masse : 12-14 Mjup
Température : ~1800 K
Age : 30-45 Myr
Type spectral : L0

Etoile binaire :

Masse : 0,19 et 0,17 Msol
Séparation : 12 ua
Type spectral : M5.5

2MASS J01033563-
55155615 AB 1



Eriksson et al. 2020

Introduction

DELORME AB b ou 2MASS J01033563-55155615(AB) b

DELORME AB b

Température (K) : ~1800

Masse (M_{jup}) : 12-14

Rayon : inconnu



Mercure

Température (K) : ~440/ 100

Masse (M_{jup}) : 1.6×10^{-7}

Rayon (R_{jup}) : 0.00017

Introduction

DELORME AB b ou 2MASS J01033563-55155615(AB) b

DELORME AB b

Température (K) : ~1800

Masse (M_{jup}) : 12-14

Rayon : inconnu



Terre

Température (K) : 288
Masse (M_{jup}) : 3.15×10^{-6}
Rayon (R_{jup}) : 0.00045



Introduction

DELORME AB b ou 2MASS J01033563-55155615(AB) b

DELORME AB b

Température (K) : ~1800

Masse (M_{jup}) : 12-14

Rayon : inconnu



Jupiter

Température (K) : 110

Masse (M_{jup}) : 1

Rayon (R_{jup}) : 1

Introduction

DELORME AB b ou 2MASS J01033563-55155615(AB) b

DELORME AB b

Température (K) : ~1800

Masse (M_{jup}) : 12-14

Rayon : inconnu

Soleil

Température (K) : 5770

Masse (M_{jup}) : 1047

Rayon (R_{jup}) : 9,96

Méthodes et Outils

ForMoSA (Forward Modeling for Spectral Analysis)



- Utilise une grille pré-calculée de modèles atmosphériques
- Algorithme de “nested sampling” pour explorer l’espace.
- Déterminer les régions qui maximisent la vraisemblance par inférence bayésienne
- Affiche le spectre avec le meilleur fit

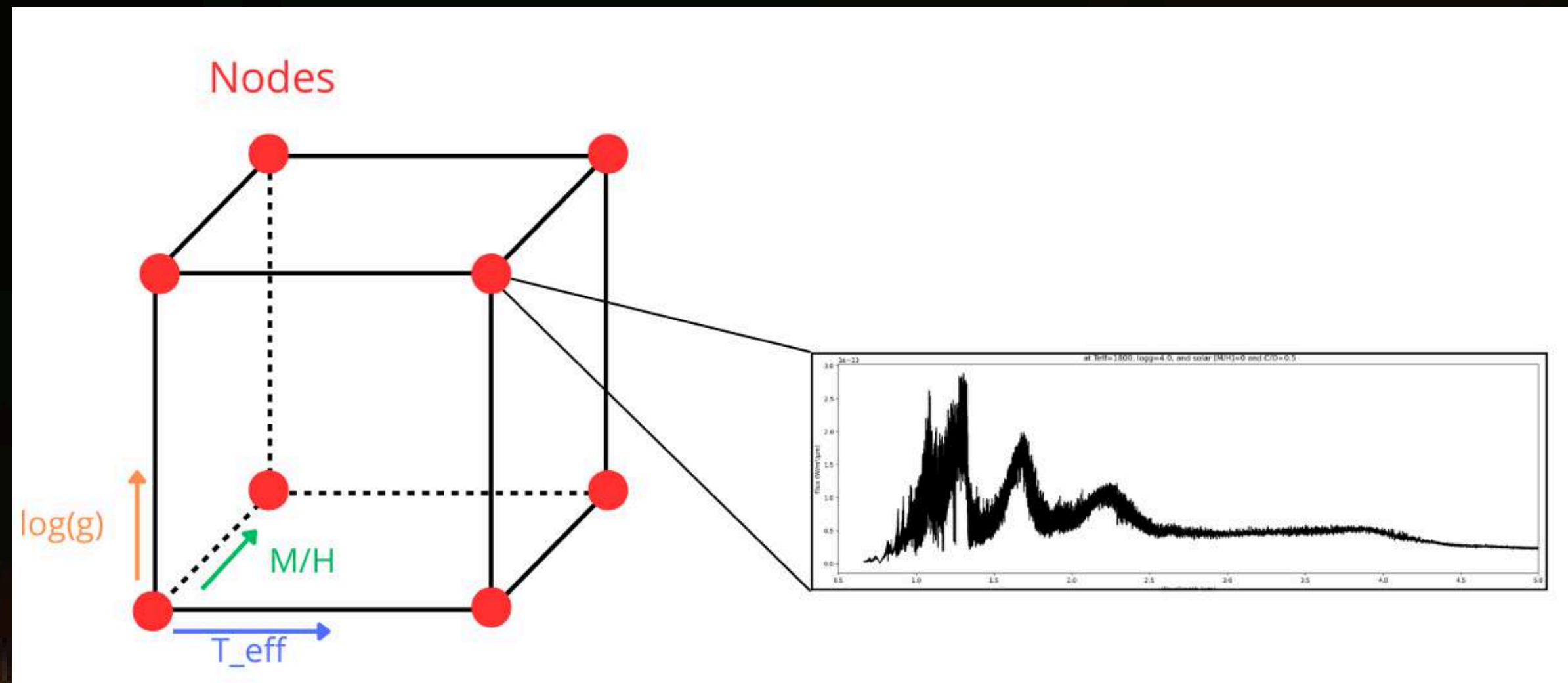
Méthodes et Outils

ForMoSA (Forward Modeling for Spectral Analysis)



Adaptation de la grille

- Interpolation des noeuds manquants de la grille atmosphérique



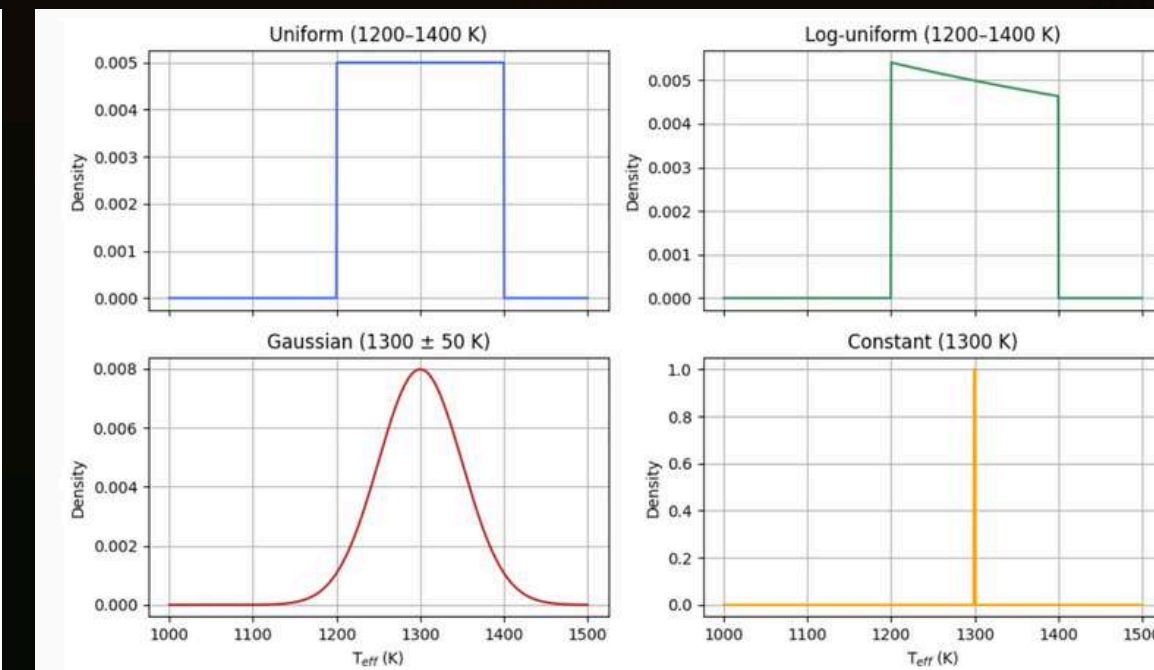
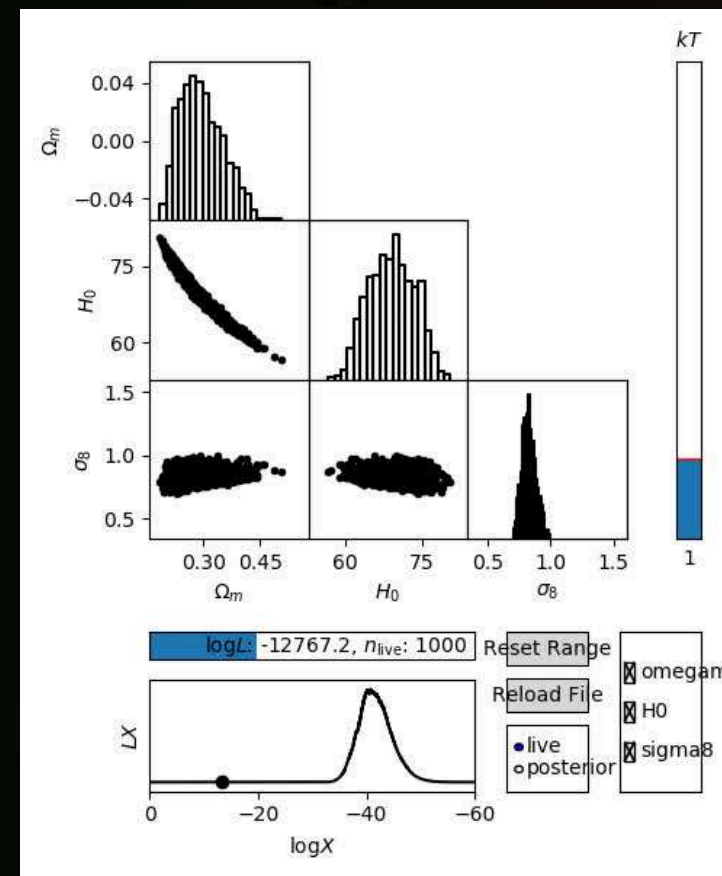
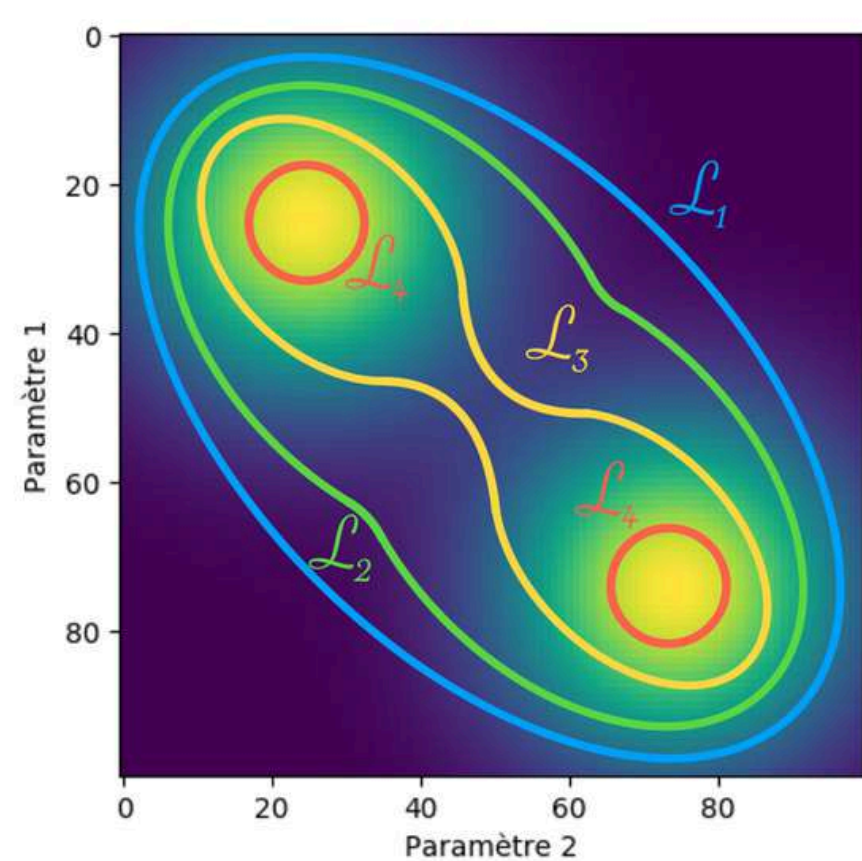
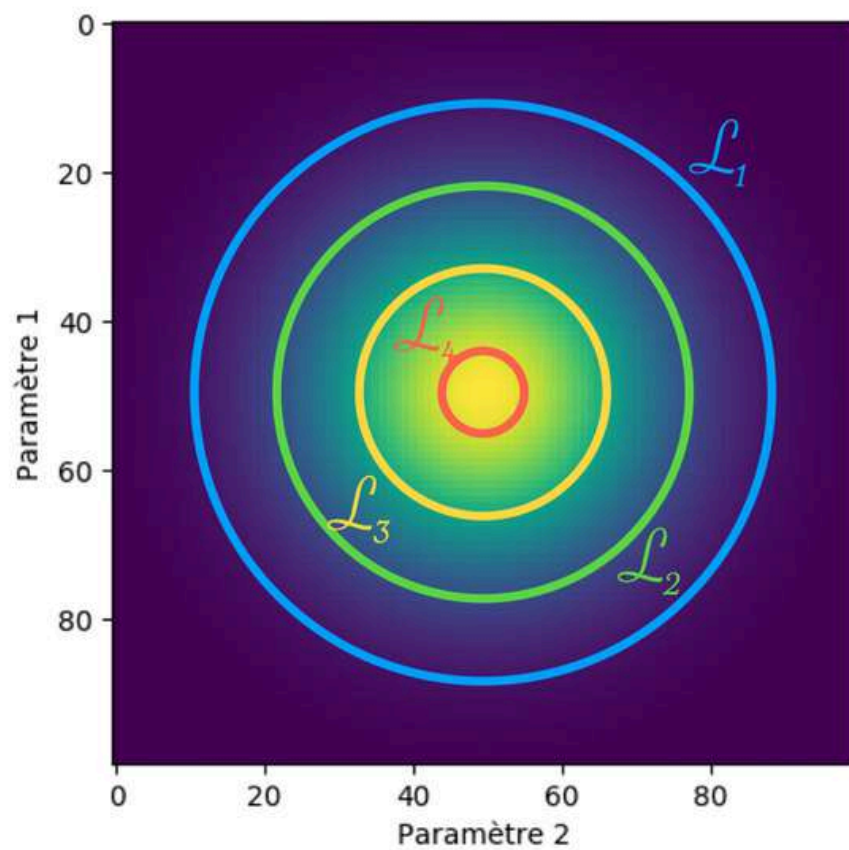
Méthodes et Outils

ForMoSA (Forward Modeling for Spectral Analysis)



Adaptation
de la grille

Nested
Sampling



$$\chi^2 = \sum \left(\frac{d - m}{\sigma} \right)^2$$

$$\log(L) = -\frac{\chi^2}{2}$$

$$Z = \int L(\theta) \pi(\theta) d\theta$$

Méthodes et Outils

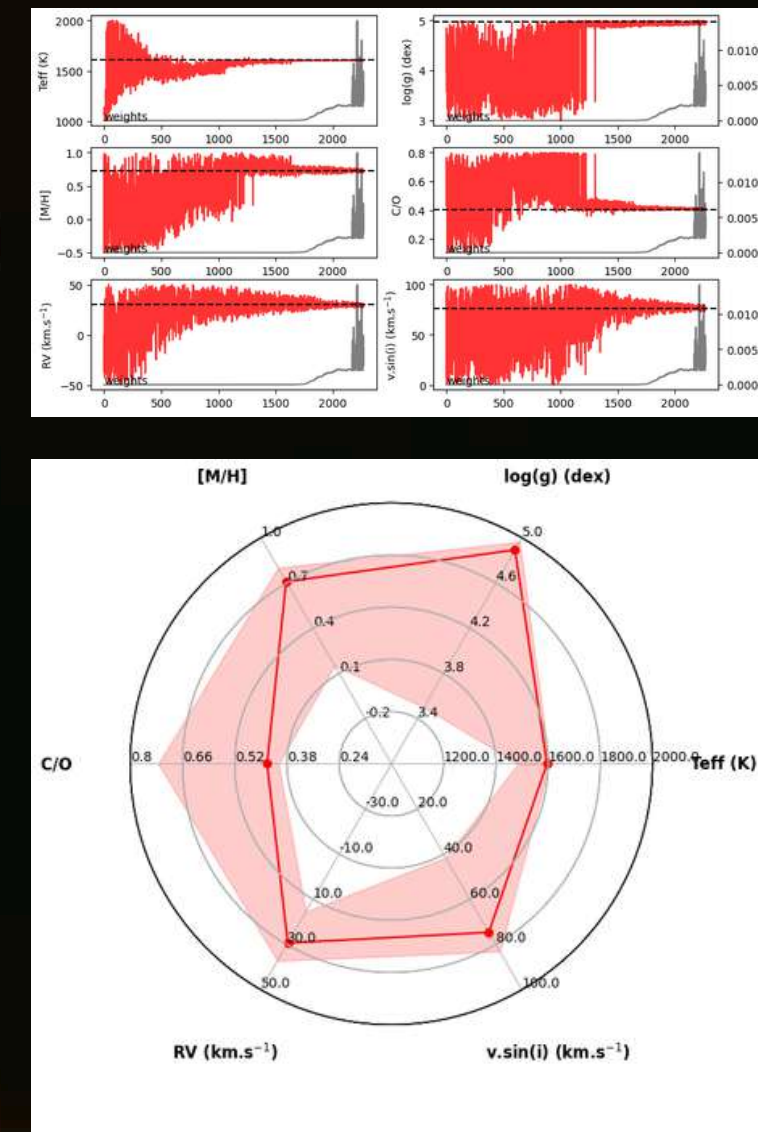
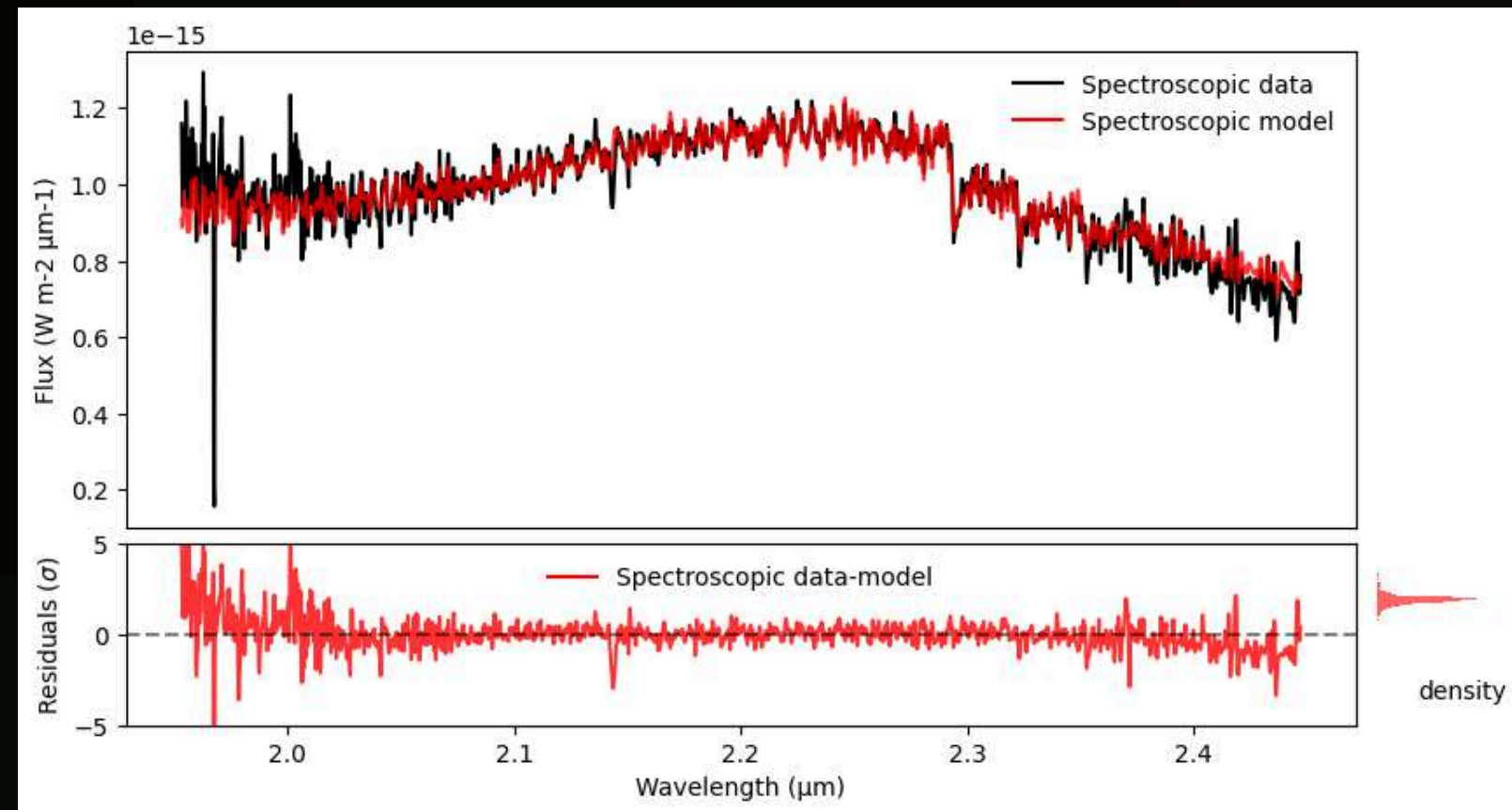
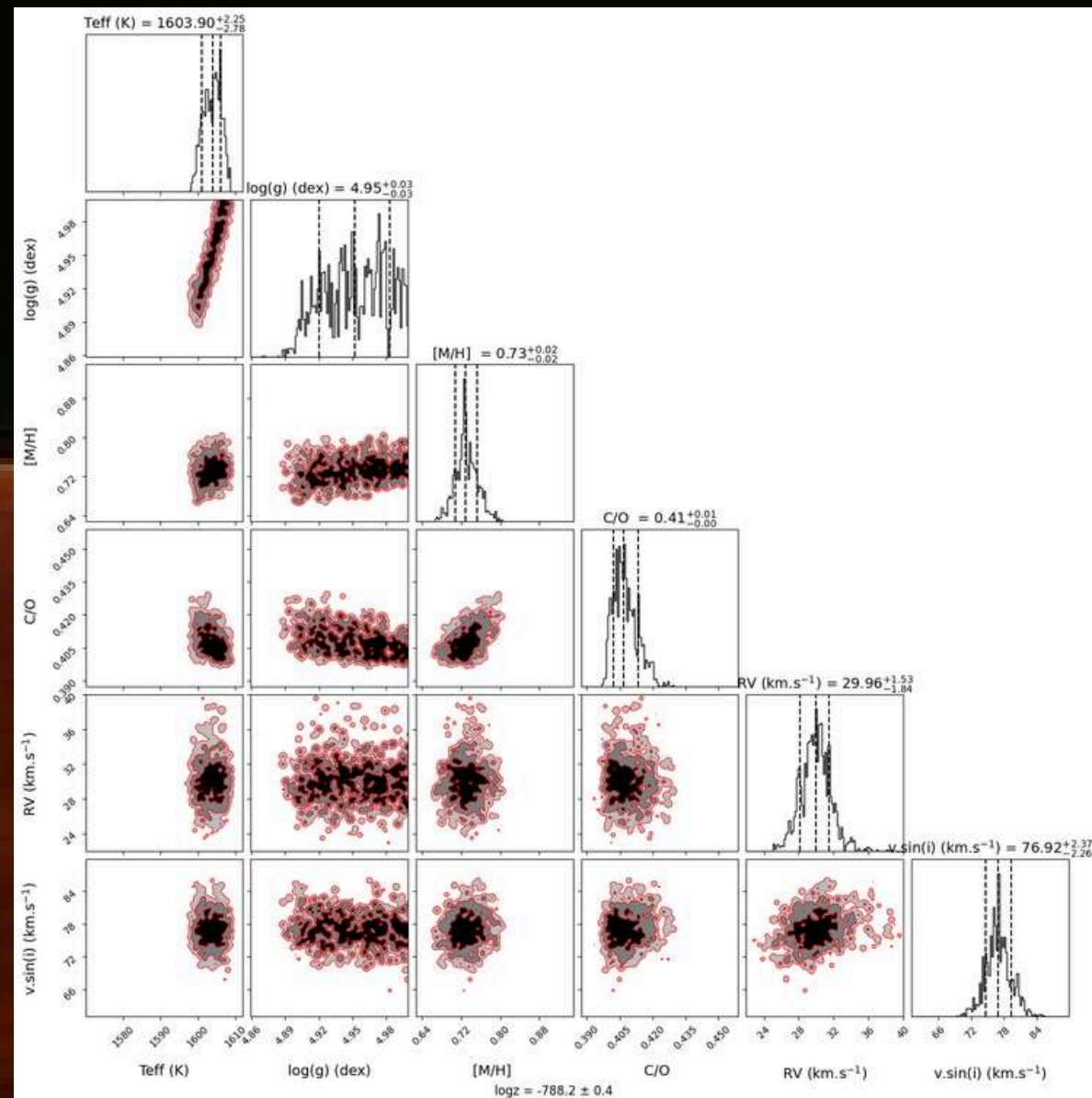
ForMoSA (Forward Modeling for Spectral Analysis)



Adaptation
de la grille

Nested
Sampling

Affichage
des graphes



Méthodes et Outils

Grille d'atmosphère ExoREM



Paramètres :

1. Résout l'équilibre radiatif-convectif en 1D
2. Absorption de certaines molécules (H_2O , CH_4 , CO , etc.)
3. Formation de nuages composé de (Fe , Si , Na_2S , KCl , and H_2O)
4. Plage de données :
 - Température : 1200-2000 K
 - $\log(g)$: 3,5 - 4,5
 - $[\text{M}/\text{H}]$: -0,5 - 1
 - $[\text{C}/\text{O}]$: 0,4 - 0,65

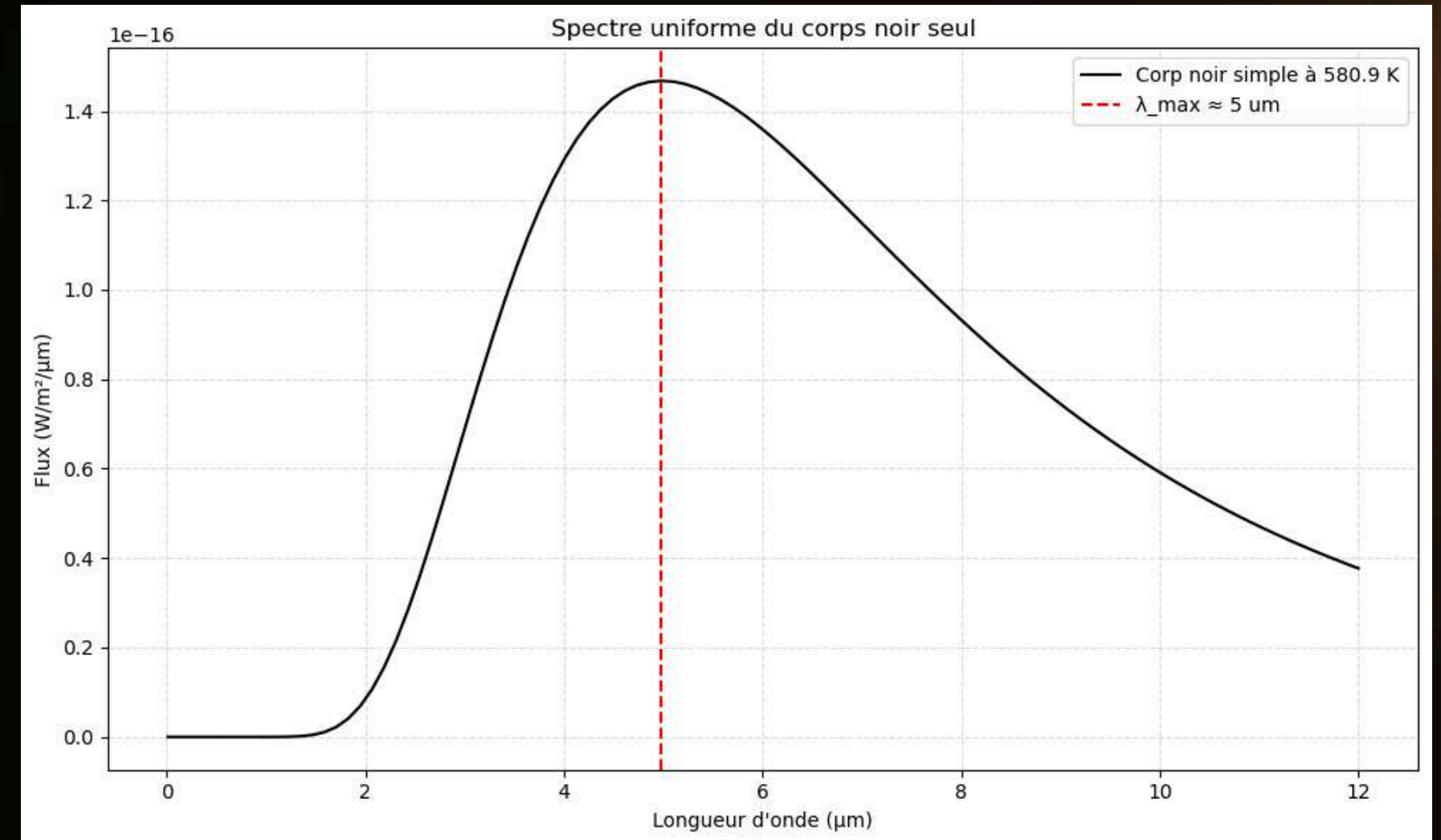
Pourquoi cete grille ?

- Plages de données correspondant à DELORME AB b
- On suppose des nuages dans l'atmosphère de cet objet
- Résolution en accord avec les instruments utilisés

Méthodes et Outils

Modèles de corps noirs (inspiré de Cugno et al 2024)

Cas 1 : Corps noir simple



Température

T = température unique

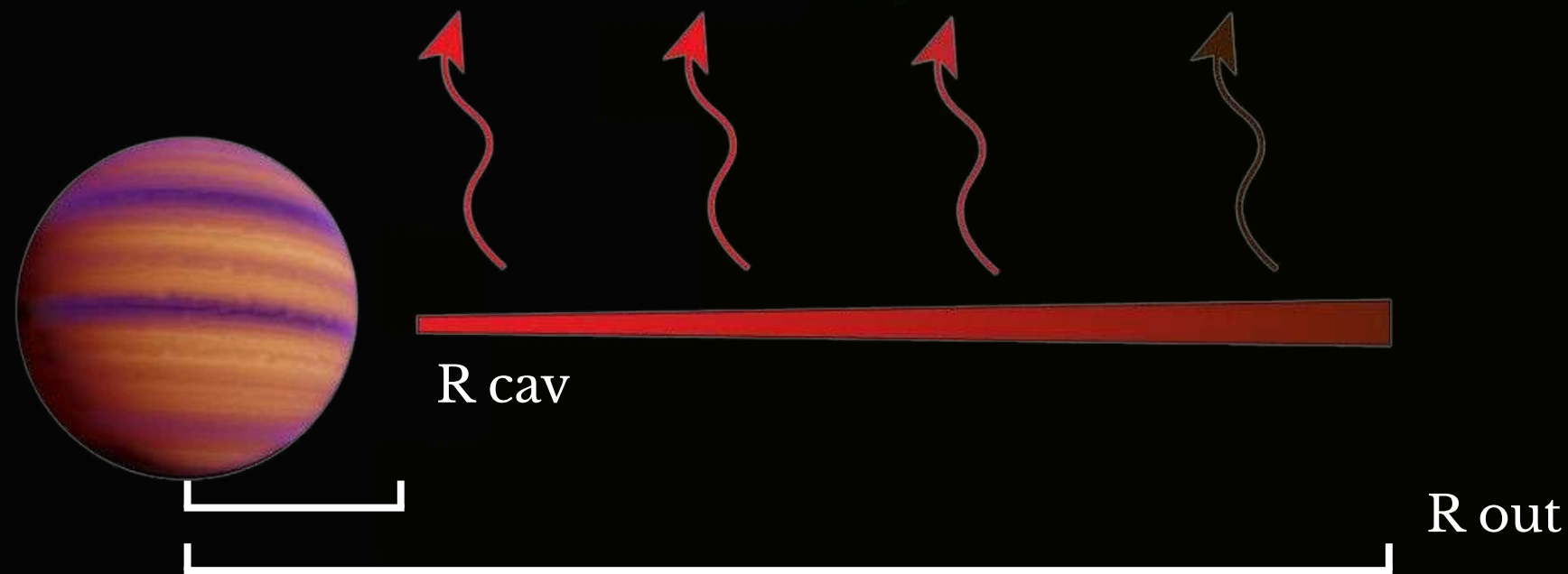
Flux

$$F_{disk}(\lambda) = \left(\frac{R_{BB}}{D}\right)^2 \pi \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T_{BB}}\right) - 1} \cos(i_{BB})$$

Méthodes et Outils

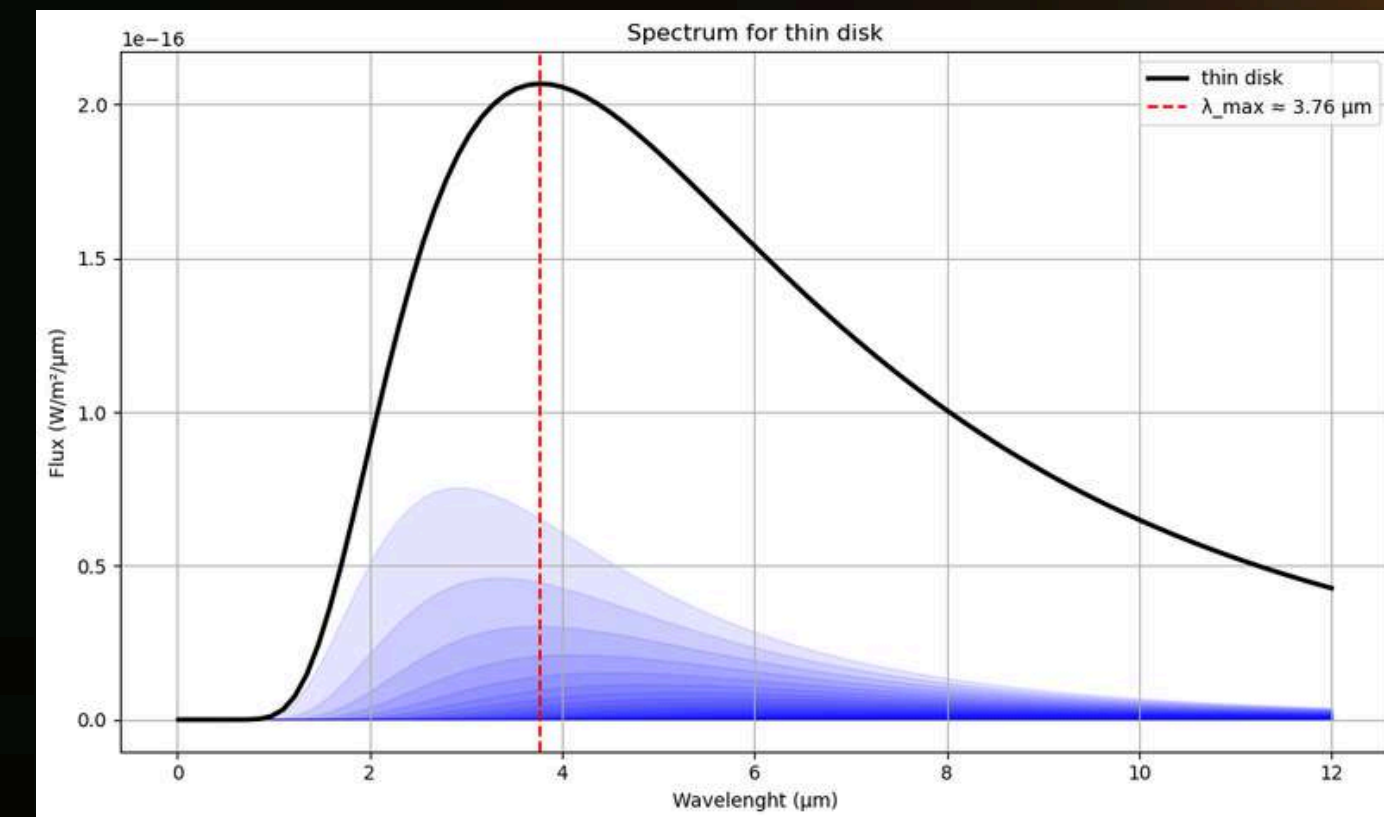
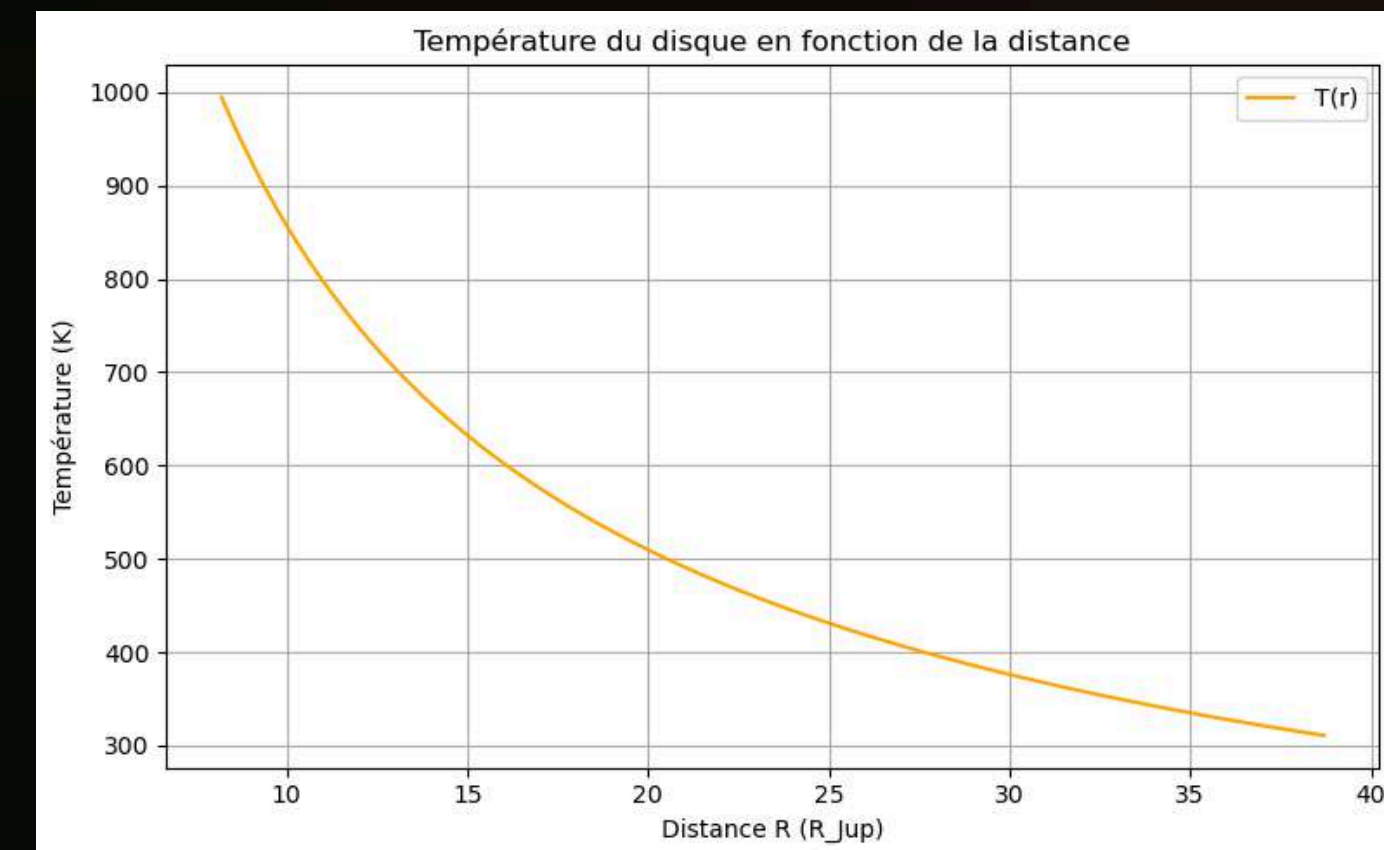
Modèles de corps noirs (inspiré de Cugno et al 2024)

Cas 2 : Somme de corps noirs dans un disque fin



Température

$$T_d(r) = T_{eff} \times \left(\frac{2}{3\pi}\right)^{1/4} \left(\frac{r}{R_p}\right)^{-3/4}$$



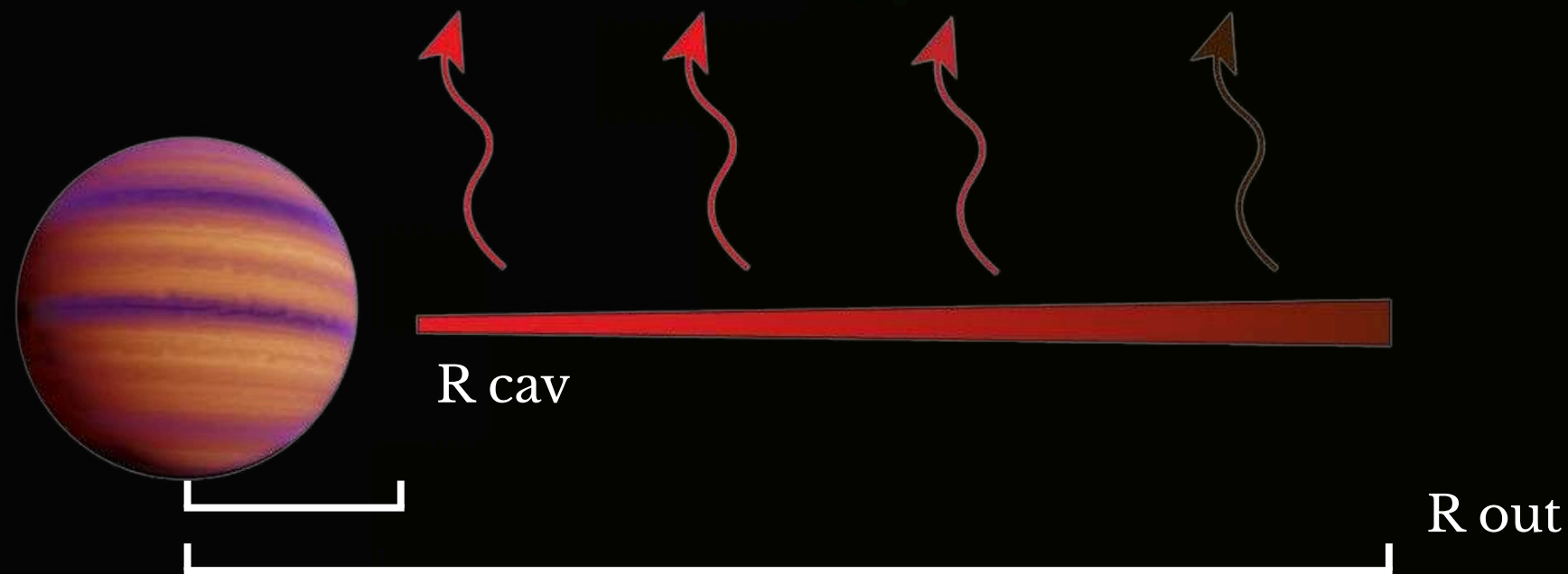
Flux

$$F_{\text{disk}}(\lambda) = \int_{R_{\text{cav}}}^{R_{\text{out}}} \frac{2\pi r dr}{D^2} B_{\lambda}(T_d(r), \lambda) \cos(i)$$

Méthodes et Outils

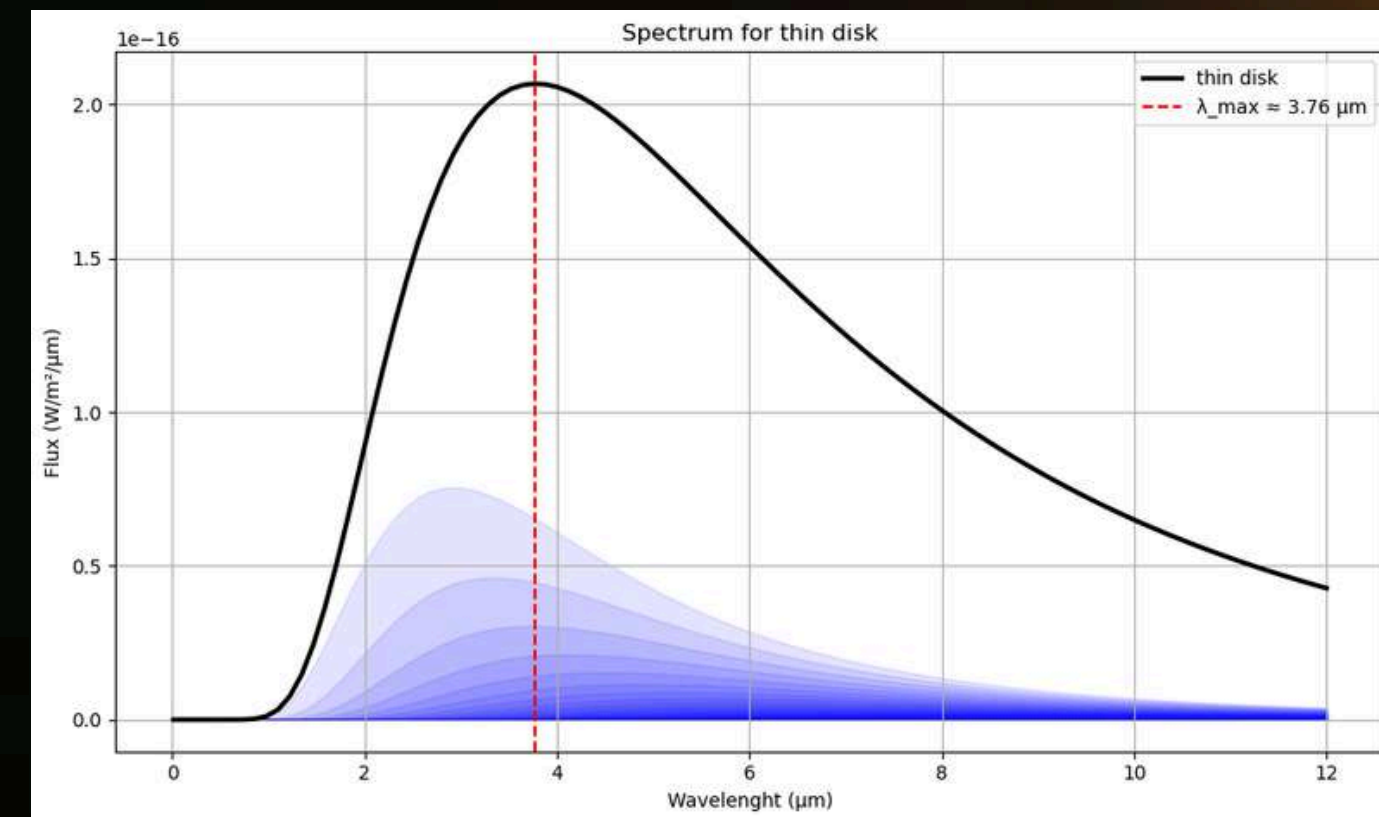
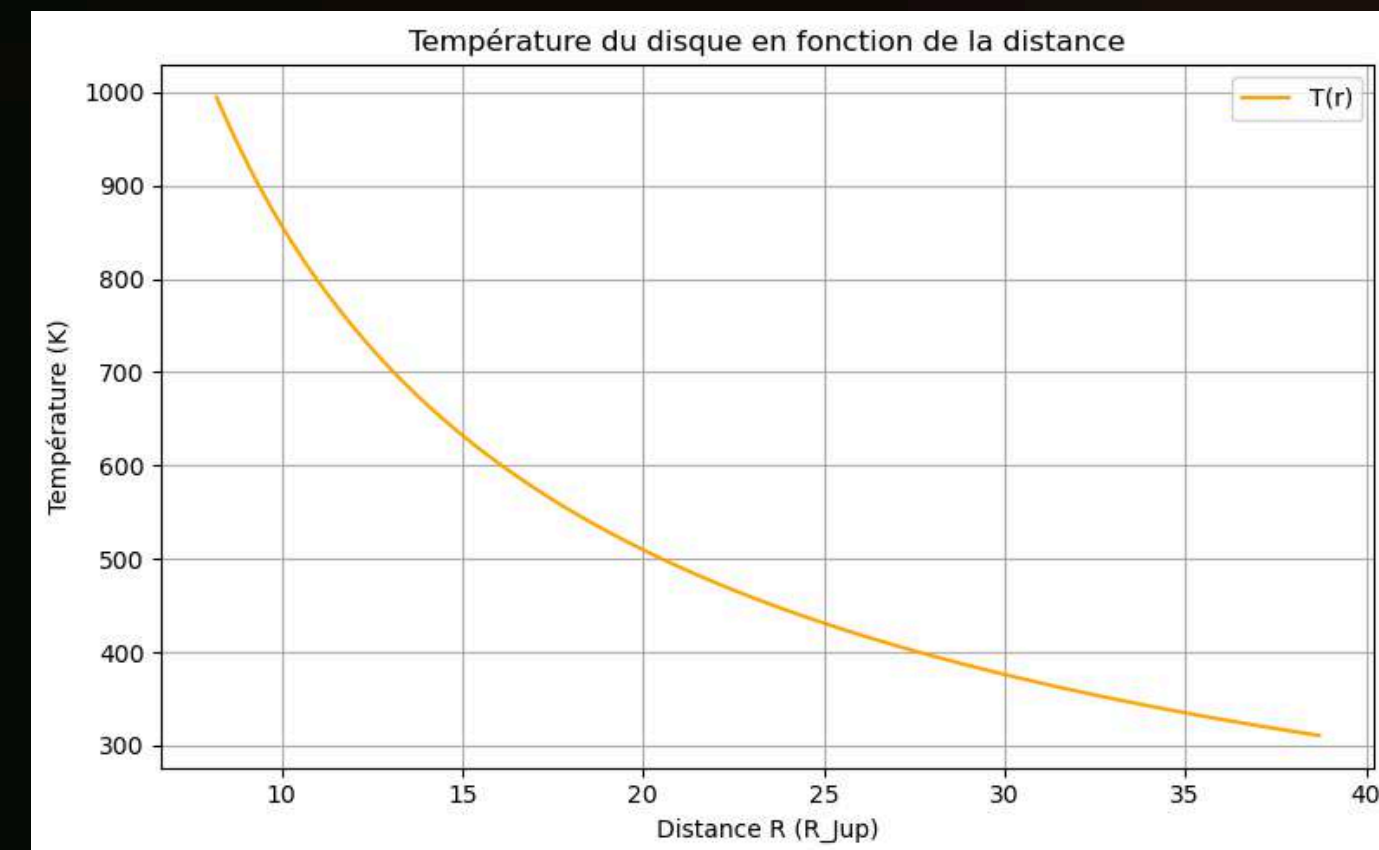
Modèles de corps noirs (inspiré de Cugno et al 2024)

Cas 2 : Somme de corps noirs dans un disque fin



Température

$$T_d(r) = T_{eff} \times \left(\frac{2}{3\pi}\right)^{1/4} \left(\frac{r}{R_p}\right)^{-3/4}$$



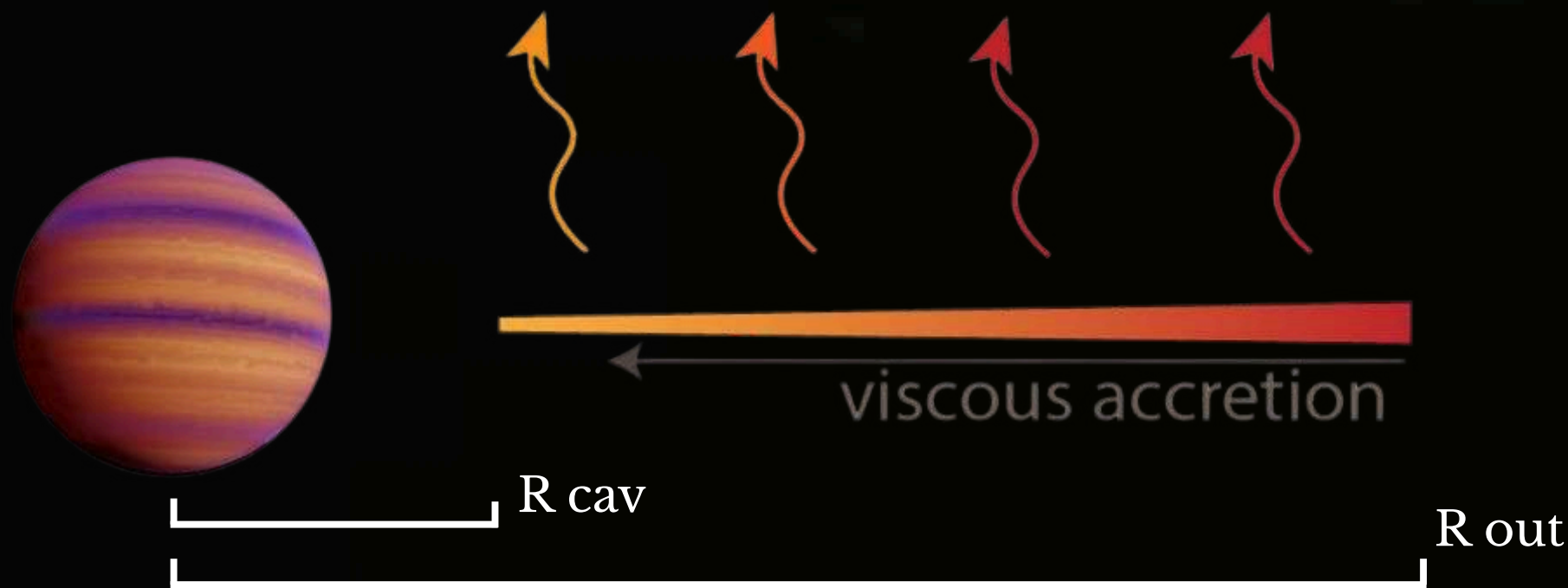
Flux

$$F_{\text{disk}}(\lambda) = \sum_{r=R_{\text{cav}}}^{R_{\text{out}}} \frac{2\pi r \Delta r}{D^2} B_{\lambda}(T_d(r), \lambda) \cos(i)$$

Méthodes et Outils

Modèles de corps noirs (inspiré de Cugno et al 2024)

Cas 3 : Somme de corps noirs dans un disque fin en accréation

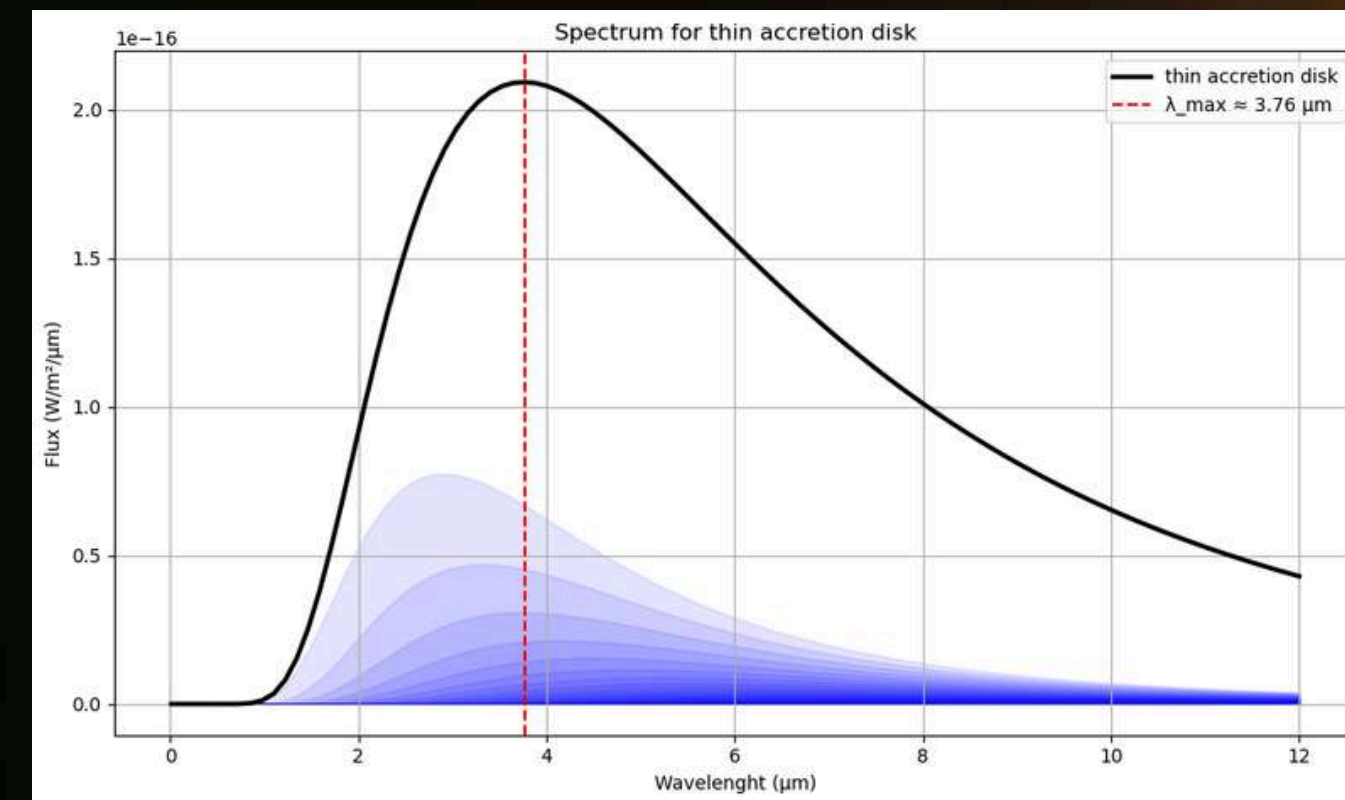
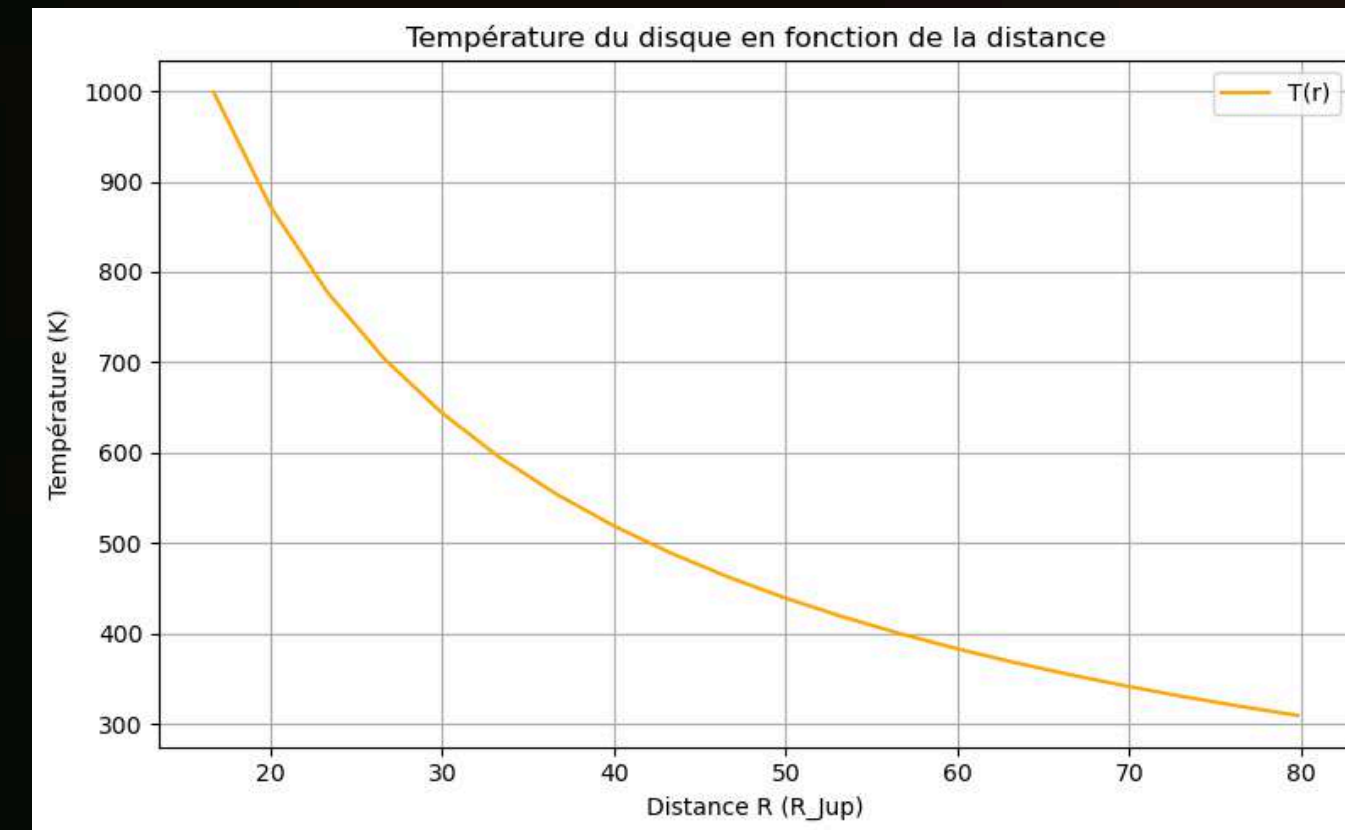


Température

$$T_d(r) = T_{\star} \times \left(\frac{2}{3\pi} \right)^{1/4} \left(\frac{r}{R_p} \right)^{-3/4} + \left(\frac{GM_p \dot{M}}{8\pi\sigma r^3} \right)^{1/4}$$

Flux

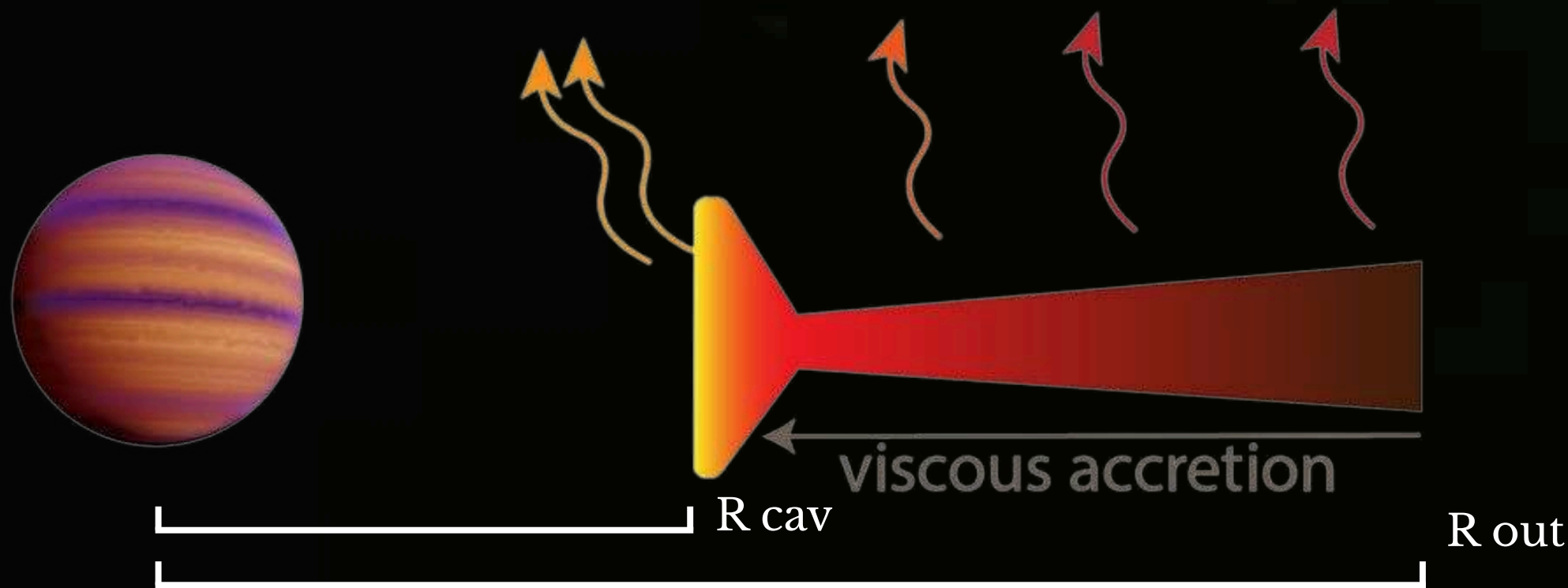
$$F_{\text{disk}}(\lambda) = \sum_{r=R_{\text{cav}}}^{R_{\text{out}}} \frac{2\pi r \Delta r}{D^2} B_{\lambda}(T_d(r), \lambda) \cos(i)$$



Méthodes et Outils

Modèles de corps noirs (inspiré de Cugno et al 2024)

Cas 4 : Corps noir simple + somme de corps noirs dans un disque accrétant

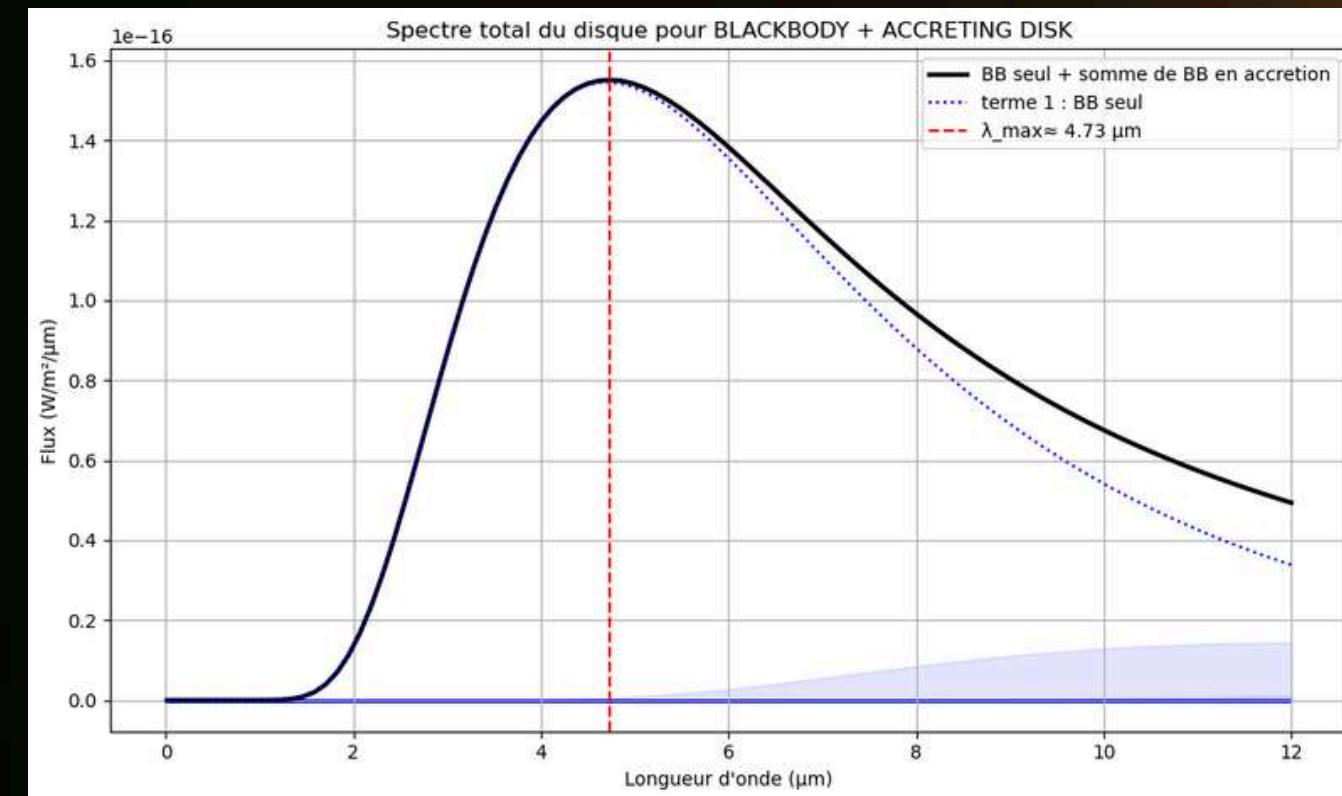
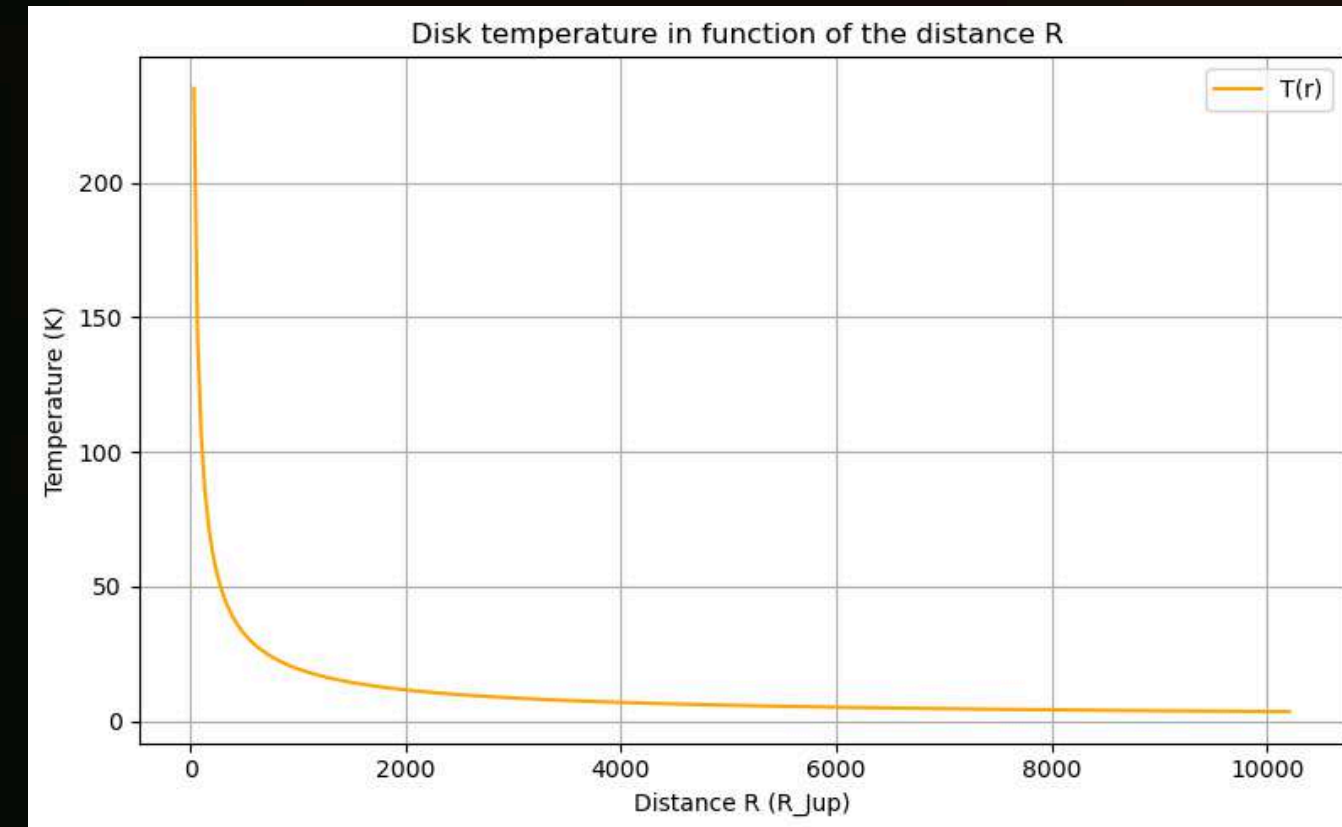


Température

Flux

$$T_d(r) = \left(\frac{GM_p \dot{M}}{8\pi\sigma r^3} \right)^{1/4}$$

$$F_{disk}(\lambda) = B_\lambda(T_{disk}^{BB}(r), \lambda) \times \frac{R_{BB}^2}{D^2} \cos(i_{BB}) + \int_{R_{cav}^{BB}}^{R_{out}} \frac{2\pi r dr}{D^2} B_\lambda(T_d(r), \lambda) \cos(i)$$

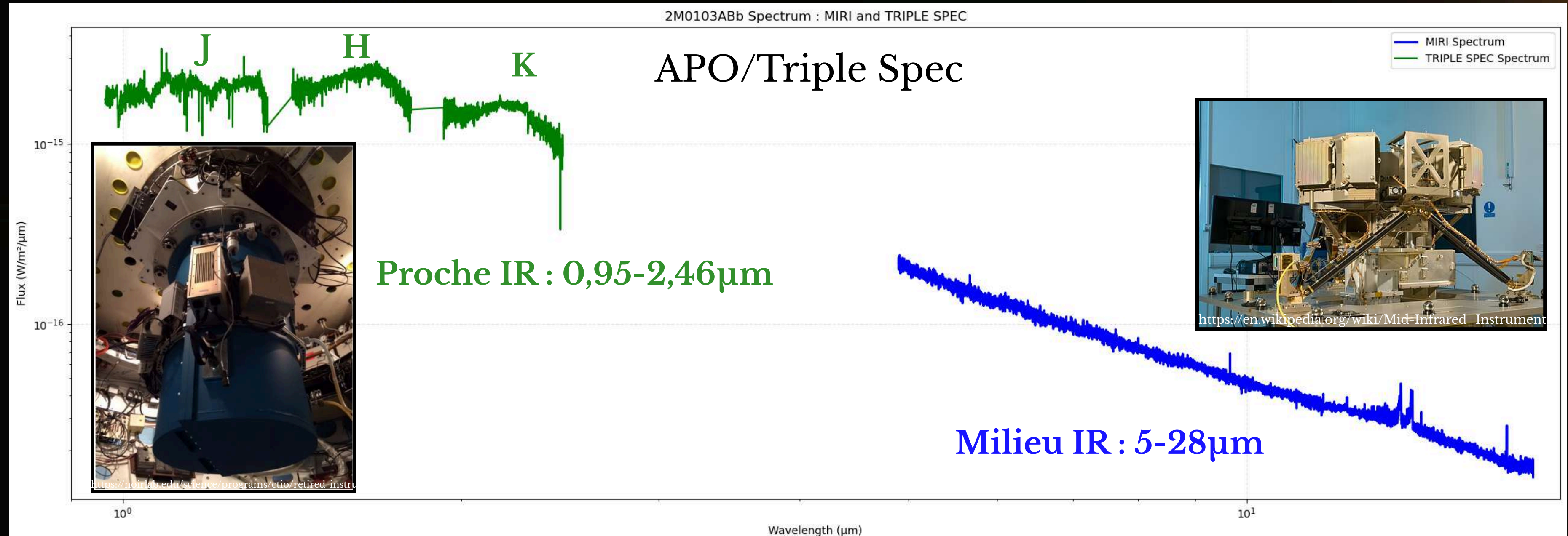


Résultats

Spectre DELORME AB b avec JWST/MIRI et APO/Triple Spec

Triple Spec est un spectrographe dans le proche infrarouge installé sur le télescope de 3,5 mètres de l'observatoire d'Apache Point (APO).

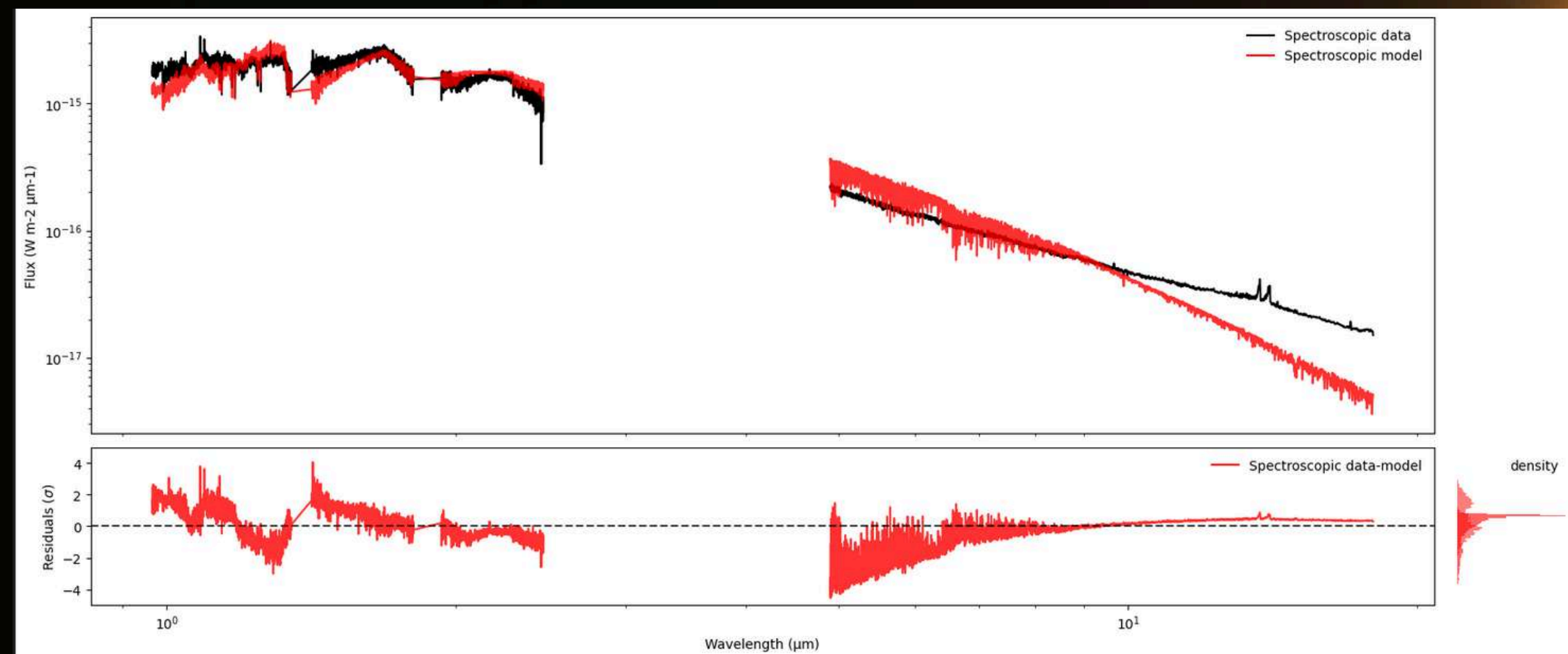
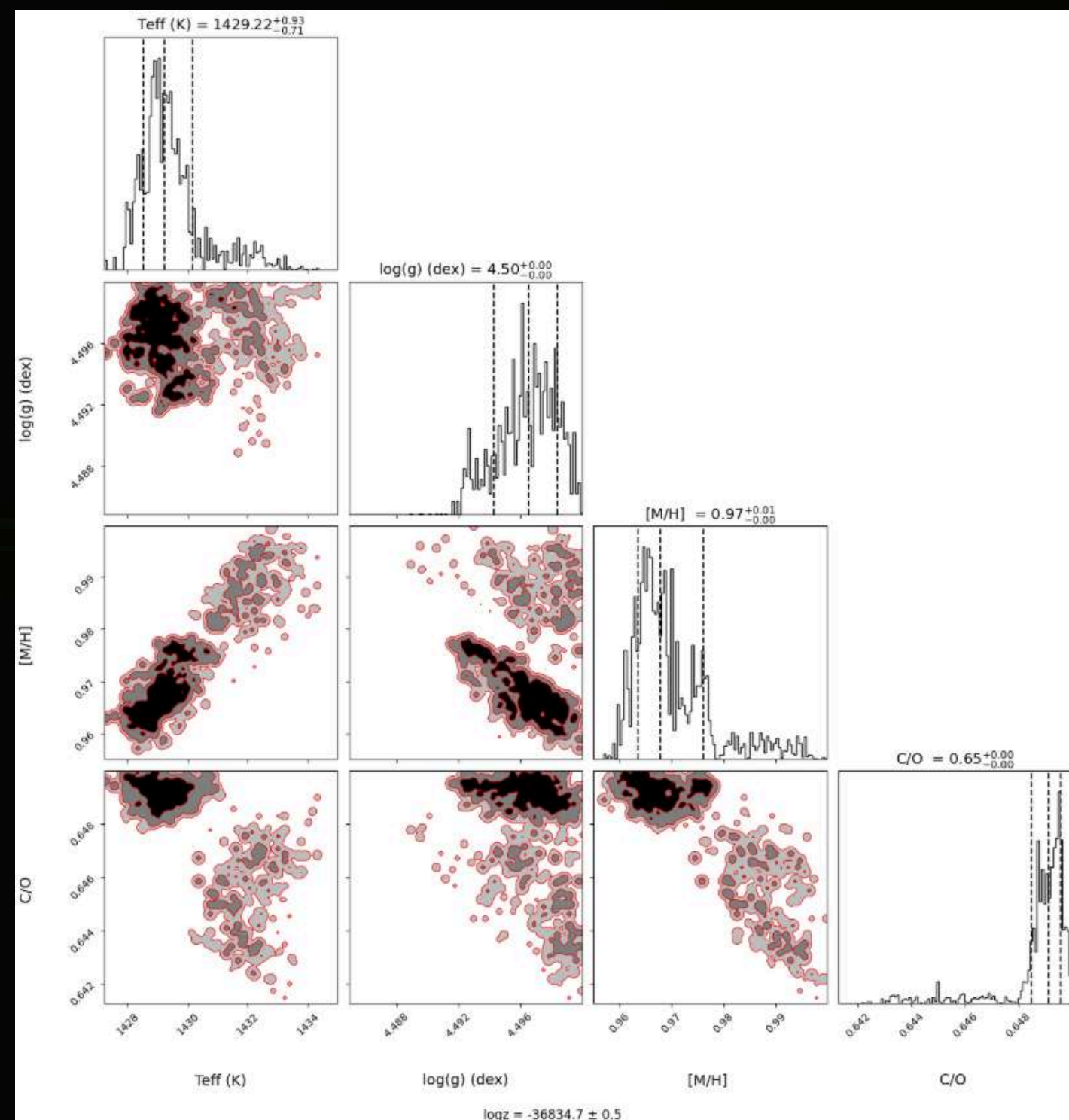
Mid-Infrared Instrument combine une caméra et un spectrographe à champ intégral. Il est installé sur le télescope spatial James Webb (JWST).



Résultats

Inversion de DELORME AB b avec ForMoSA

Sans CPD

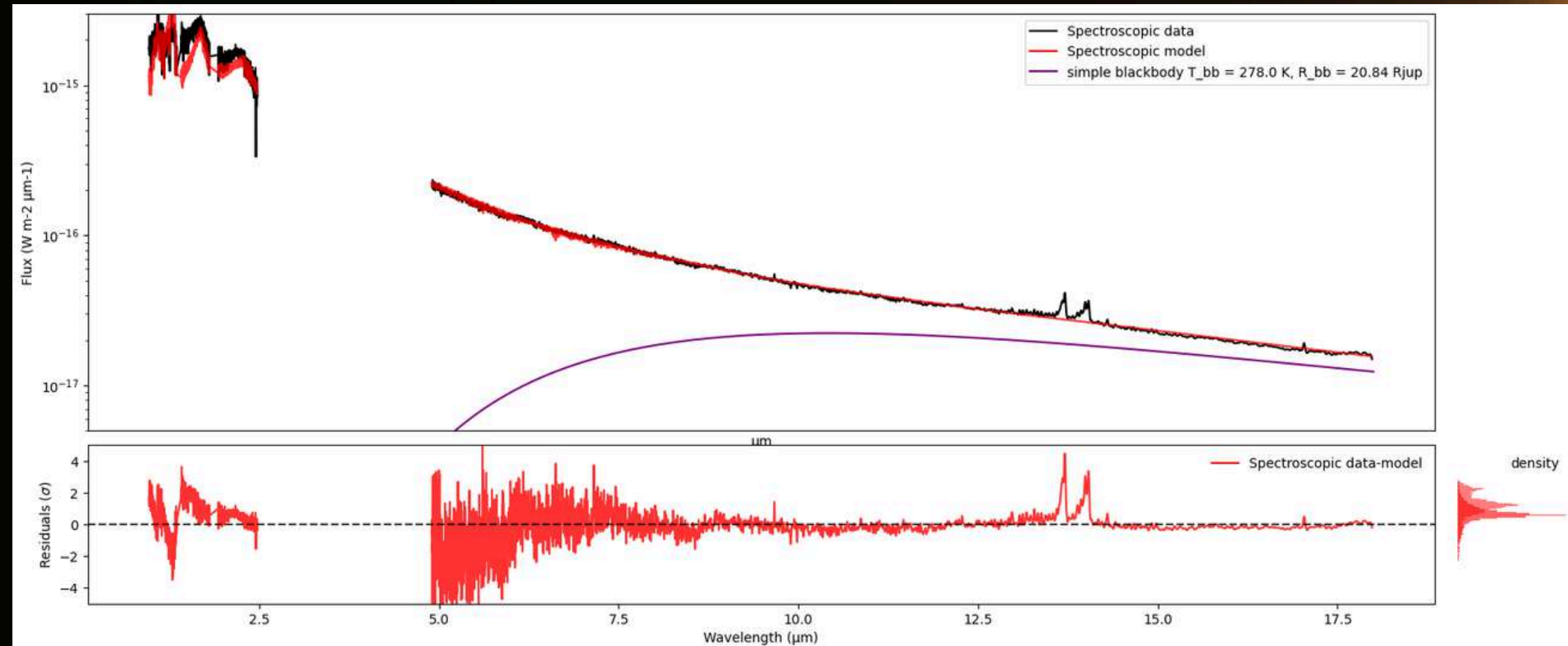
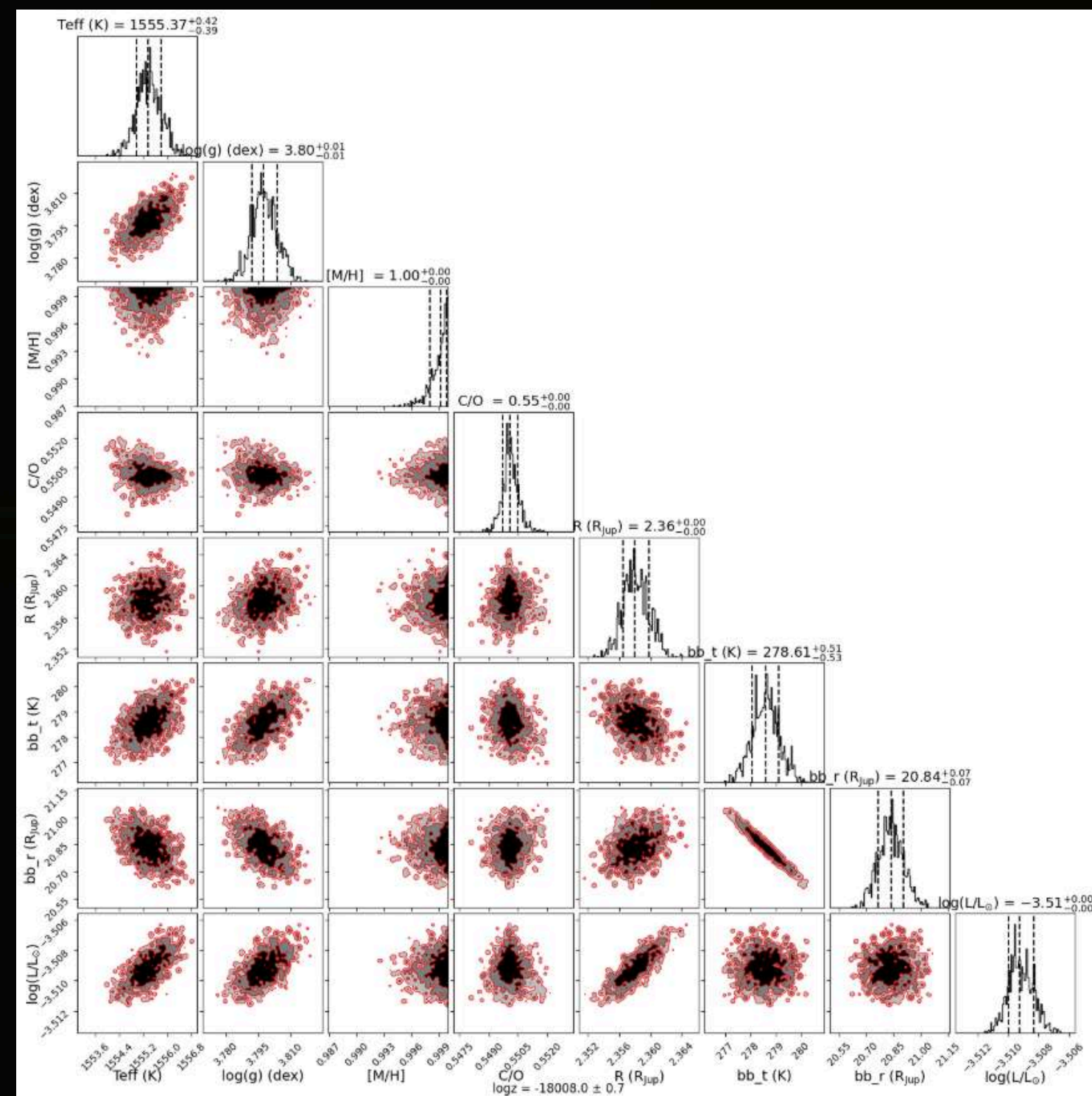


→ $\log(z) = -36\ 835$

Résultats

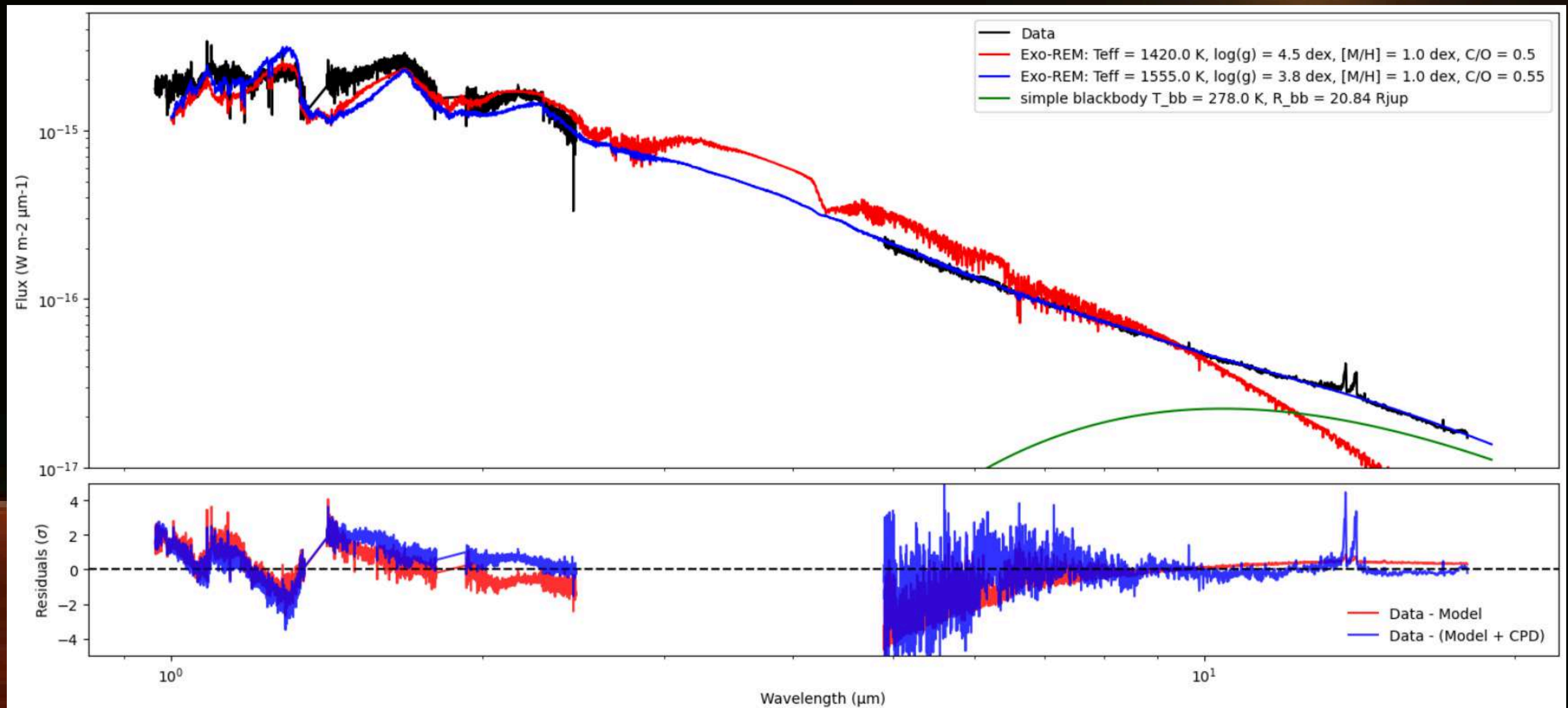
Inversion de DELORME AB b avec ForMoSA

Avec CPD (cas 1 : corps noir simple)



→ $\log(z) = -18\ 808$

Résultats



$\log(z)$ amélioré d'un facteur 2 !

Répartition du temps

Semaine 1 à 2 :

- Bibliographie

Semaine 3 à 8 :

- Création des modèles de corps noirs
- Résolution de problèmes informatiques aux débuts de ForMoSA

Semaine 9 :

- Implémentation des corps noirs dans ForMoSA (pas fini)

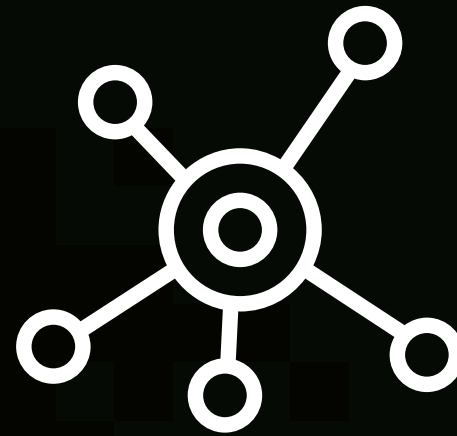
Semaine 9-10 :

- Rédaction rapport
- Rédaction slides

Conclusions & Perspectives

Conclusions

- 4 modèles de corps noirs développés considérant un gradient de température et de l'accrétion
- Spectre de DELORME AB b traité et complété avec Triple Spec et MIRI
- Ajouter un CPD (corps noir) améliore significativement l'évidence



Perspectives

- Utiliser une grille d'atmosphérique plus complète (avec d'autres paramètres)
- Implémenter les 3 autres modèles de corps noir
- Tester avec la partie Gaz développée par Damien BORJA
- Compléter le spectre de l'objet sur d'autres longueurs d'onde
- Appliquer l'inversement sur d'autres objets avec CPD confirmés
- Utiliser les données des futurs instruments VLT/SPHERE + (2027) et ELT/METIS (2030)

Retour personnel

Très bonne expérience humaine et scientifique, participation à des conférences au MPIA et à l'international (METIS)

Amélioration de mon anglais

Amélioration en programmation Python

Futur stage et thèse à l'étranger ?

Remerciements

Tuteurs de stage :

Gaël CHAUVIN
Matthieu Ravet

Equipe ExoWorld Imaging

Collègues/Amis

Remerciements

Tuteurs de stage :

Gaël CHAUVIN
Matthieu Ravet

Equipe ExoWorld Imaging

Collègues/Amis





Merci pour votre écoute !

Annexes

Comparaison de deux modèles avec des évidences $\log(Z)$

- 1** logarithme du facteur de Bayes : $\log(B) = | \log(Z1) - \log(Z2) |$
 - 2** facteur de Bayes : $B = 10^{\log(B)}$
 - 3** Niveau de confiance $\sigma \approx 2 \sqrt{\log(B)}$
- ➔ Valeur de σ élevée signifie que le modèle préféré est significativement meilleur que l'autre.

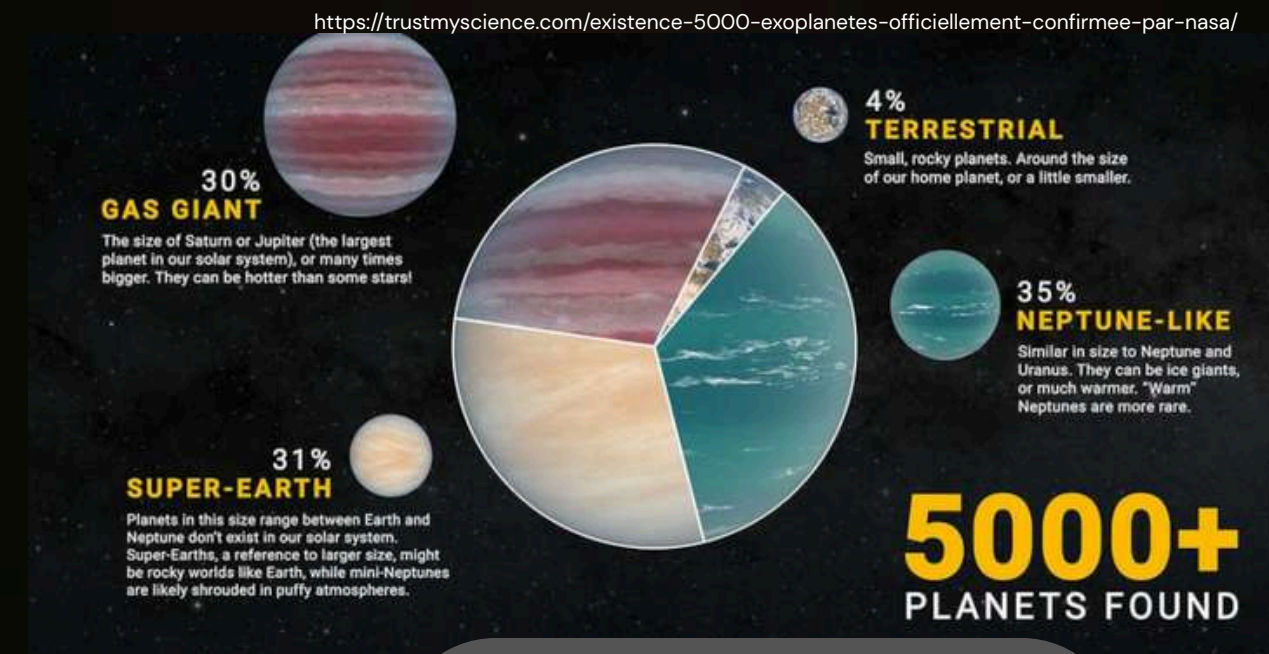
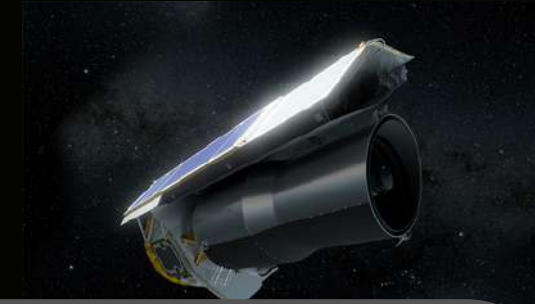
Annexe

Histoire exoplanète

- Concept naines brunes proposé par l'américain Shiv Kumar (américain) et Chushiro Hayashi et Takenori Nakano (japonais)



- Nouvelles méthodes :
Transits (photométrie)
Imagerie directe
Microlentille gravitationnelle
- Lancement du télescope Spitzer (2003)



- +5 600 exoplanètes confirmées
- JWST, HST, Gaia ...
- compréhension de la formation, composition, évolution des exoplanètes

Antiquité

1963

1995

Années 2000

2009-2018

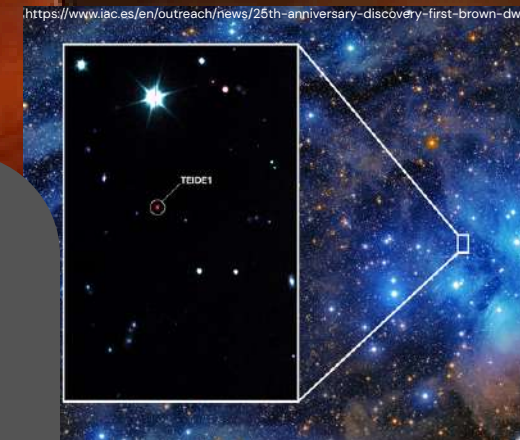
Temps

Aujourd'hui

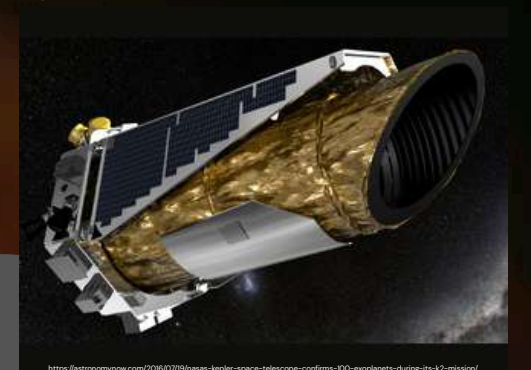
- Existence d'autres mondes prédite depuis l'Antiquité
- Modèles de formation stellaire suggérant d'autres systèmes planétaires (Table Ptolémée)
- Pas de détection directe



- Découverte de Teide 1, Première naine brune confirmée
Découverte par Mayor & Queloz (vitesse radiale)
- 1ère exoplanète autour d'une étoile de type solaire



- Mission Kepler :
Plus de 2 600 exoplanètes confirmées



Annexes

Paramètres modèles Cugno et al. 2024 sur GQ Lup B

Table 1. Summary of the parameters used for the SED fit of GQ Lup B.

Parameter	Range	No disk	Blackbody	Geom. thin opt. thick disk	Geom. thin opt. thick accr. disk	Blackbody+ accr. disk
T_{eff}	2500 – 2900	2700 ± 18	2718 ± 16	2717 ± 14	2717 ± 14	2719 ± 14
$\log(g)$	3.3 – 4.9	4.85 ± 0.13	4.86 ± 0.12	4.93 ± 0.09	4.93 ± 0.09	4.91 ± 0.11
$R_{\text{p}} [R_{\text{J}}]$	0.7 – 4.0	3.71 ± 0.02	3.68 ± 0.02	3.60 ± 0.03	3.60 ± 0.03	3.67 ± 0.02
$A_{\text{V}} [\text{mag}]$	0.0 – 5.0	2.60 ± 0.06	2.55 ± 0.06	2.43 ± 0.08	2.42 ± 0.08	2.53 ± 0.06
a_{J}	0.5 – 1.5	1.27 ± 0.01	1.26 ± 0.01	1.24 ± 0.01	1.24 ± 0.01	1.26 ± 0.01
a_{H}	0.5 – 1.5	1.07 ± 0.01	1.06 ± 0.01	1.04 ± 0.01	1.04 ± 0.01	1.06 ± 0.01
b_{MUSE}	(*)	-31.71 ± 0.06	-31.70 ± 0.06	-31.69 ± 0.06	-31.69 ± 0.06	-31.70 ± 0.06
b_{SINFONI}	(*)	-31.88 ± 0.05	-31.90 ± 0.05	-31.93 ± 0.05	-31.93 ± 0.04	-31.91 ± 0.04
$T_{\text{BB}} [\text{K}]$	200 – 900	–	580.9 ± 4.2	–	–	616.6 ± 11.4
$R_{\text{BB}} [R_{\text{J}}]$	1 – 100	–	27.6 ± 0.3	–	–	24.4 ± 0.9
$R_{\text{cav}} [R_{\text{J}}]$	3 – 100	–	$40.3 \pm 0.7^{\dagger}$	8.2 ± 0.8	16.7 ± 1.6	$35.7 \pm 1.4^{\dagger}$
$R_{\text{out}} [R_{\text{J}}]^{\ddagger}$	20 – 21000	–	–	38.7 ± 5.2	79.8 ± 10.8	10209 ± 4649
$i [^{\circ}]$	0 – 90	–	–	71.2 ± 2.0	85.6 ± 0.5	24.7 ± 17.8
χ^2_{MRS}		970	1.81	1.64	1.64	1.66

Annexes

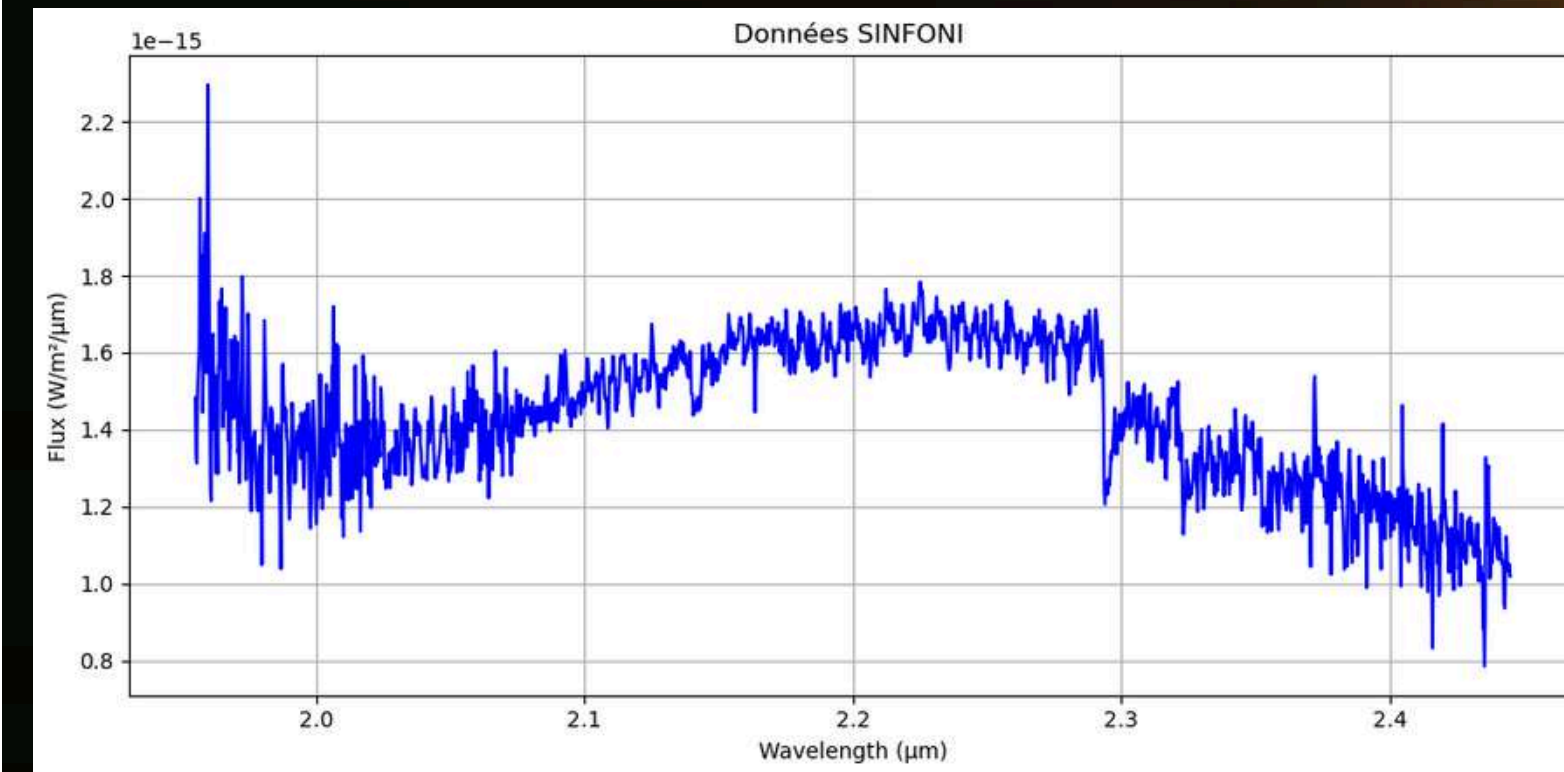
Spectre DELORME AB b

VLT/SINFONI

JWST/MIRI

VLT/UVES

APO/Triple Spec



Proche IR : 1,95-2,44μm

Résultats

Spectre DELORME AB b

VLT/SINFONI

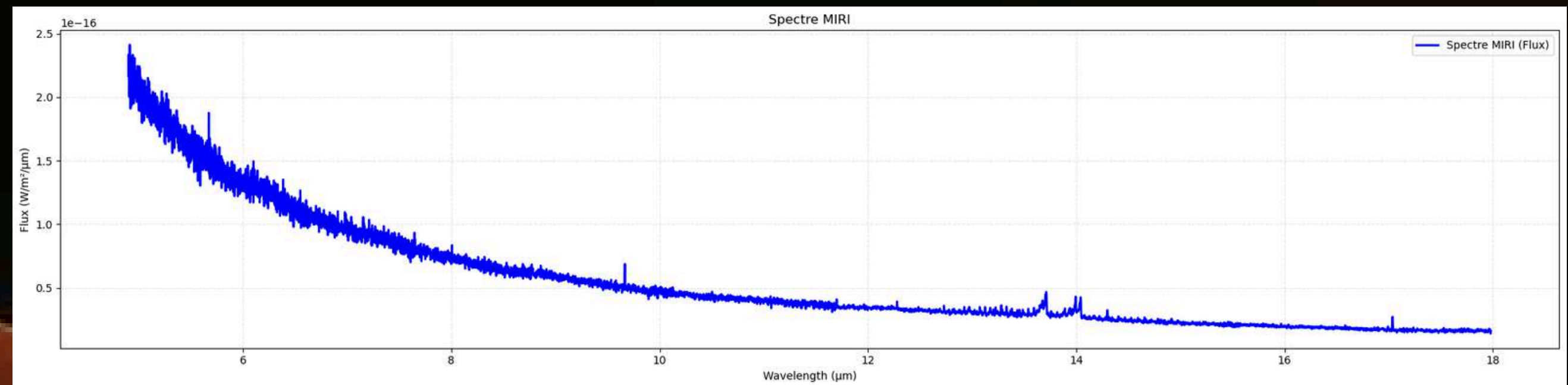
JWST/MIRI

VLT/UVES

APO/Triple Spec



Milieu IR : 5-28 μ m



Résultats

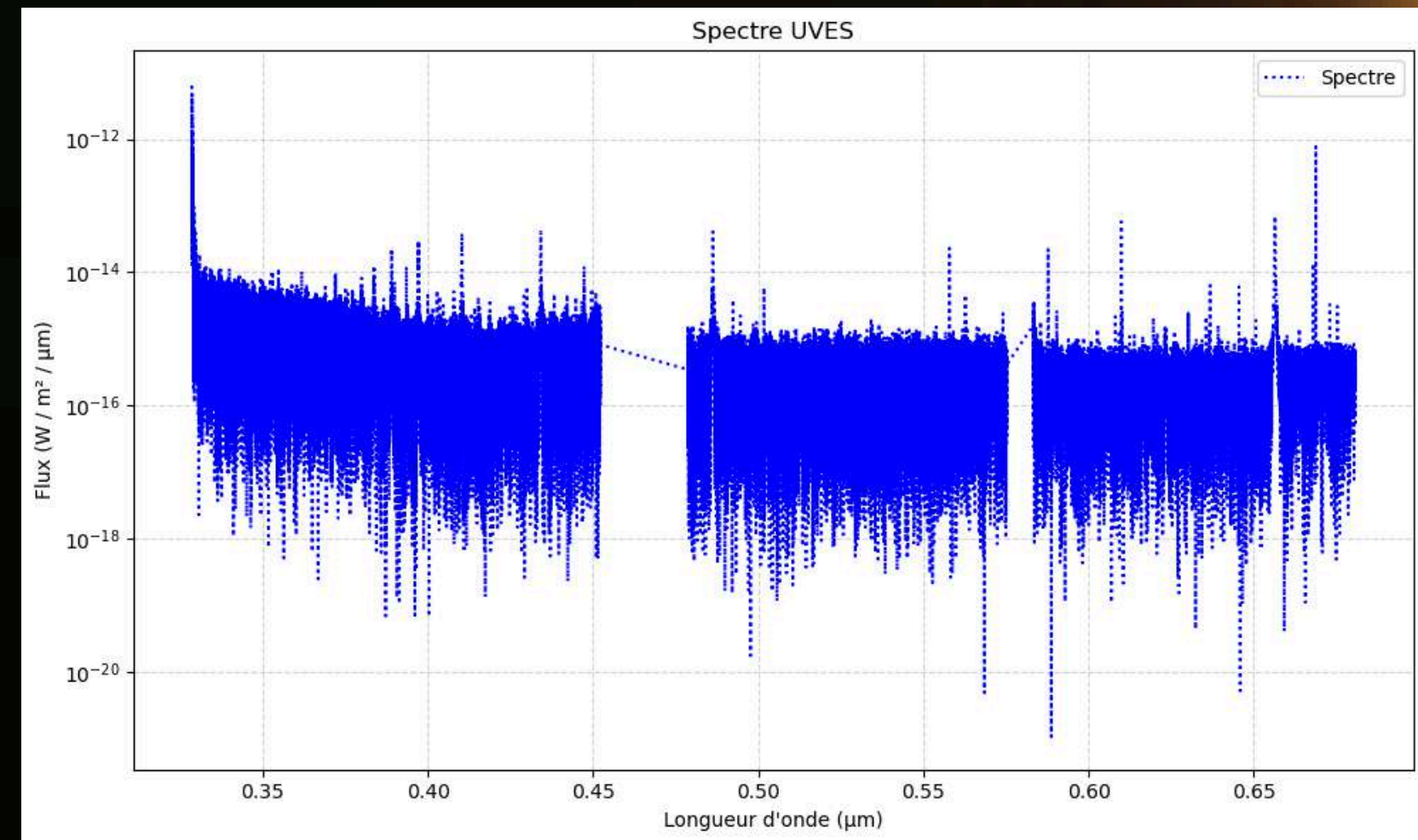
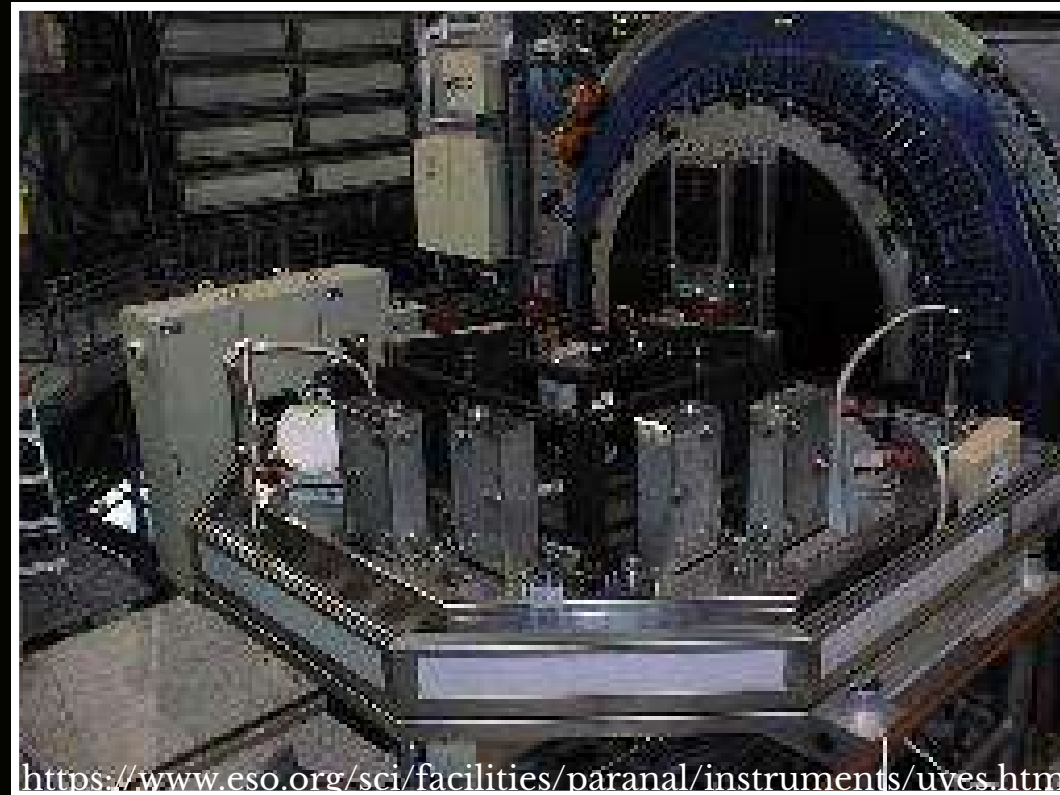
Spectre DELORME AB b

VLT/SINFONI

JWST/MIRI

VLT/UVES

APO/Triple Spec



NIR/UV : 0,28-0,68μm

Résultats

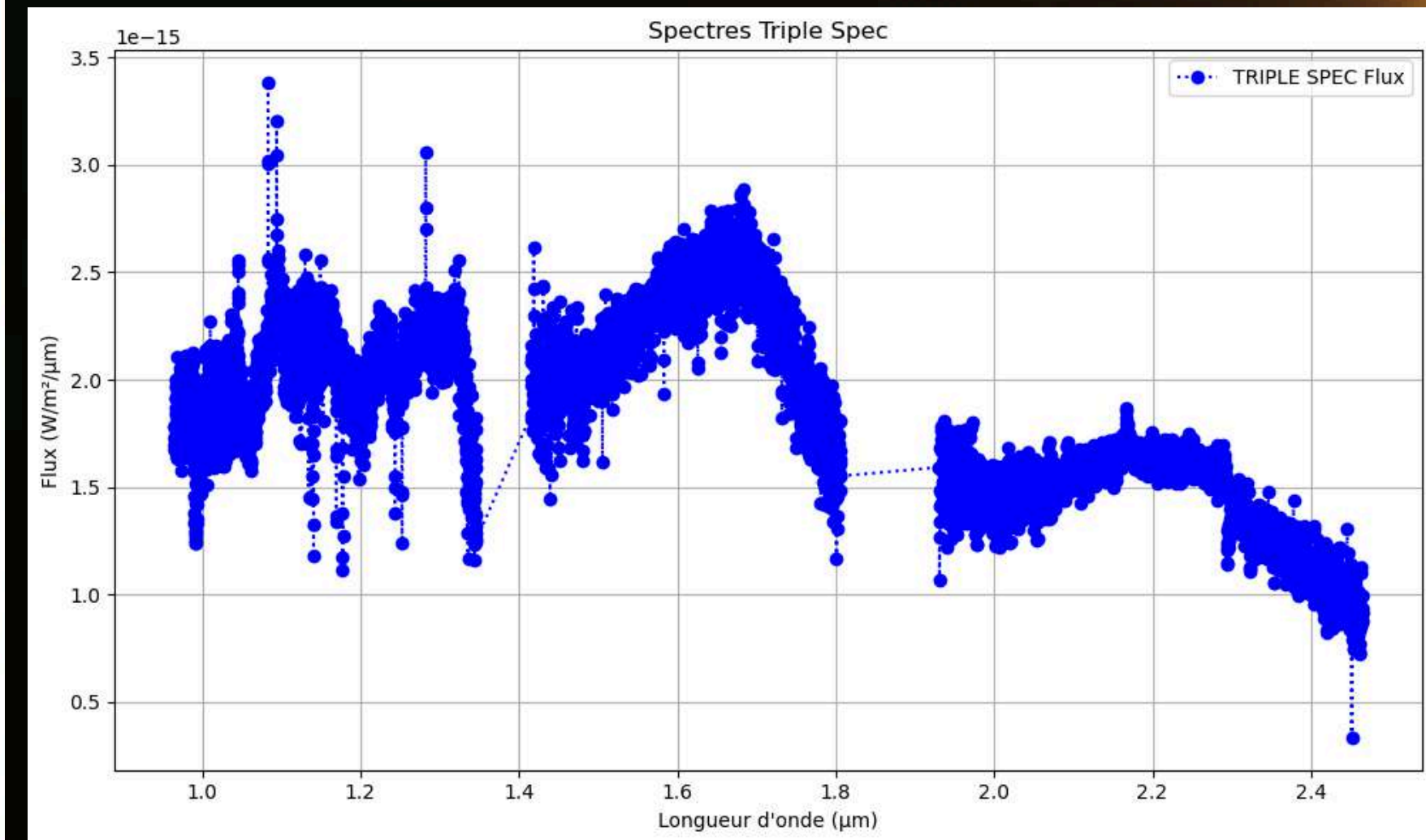
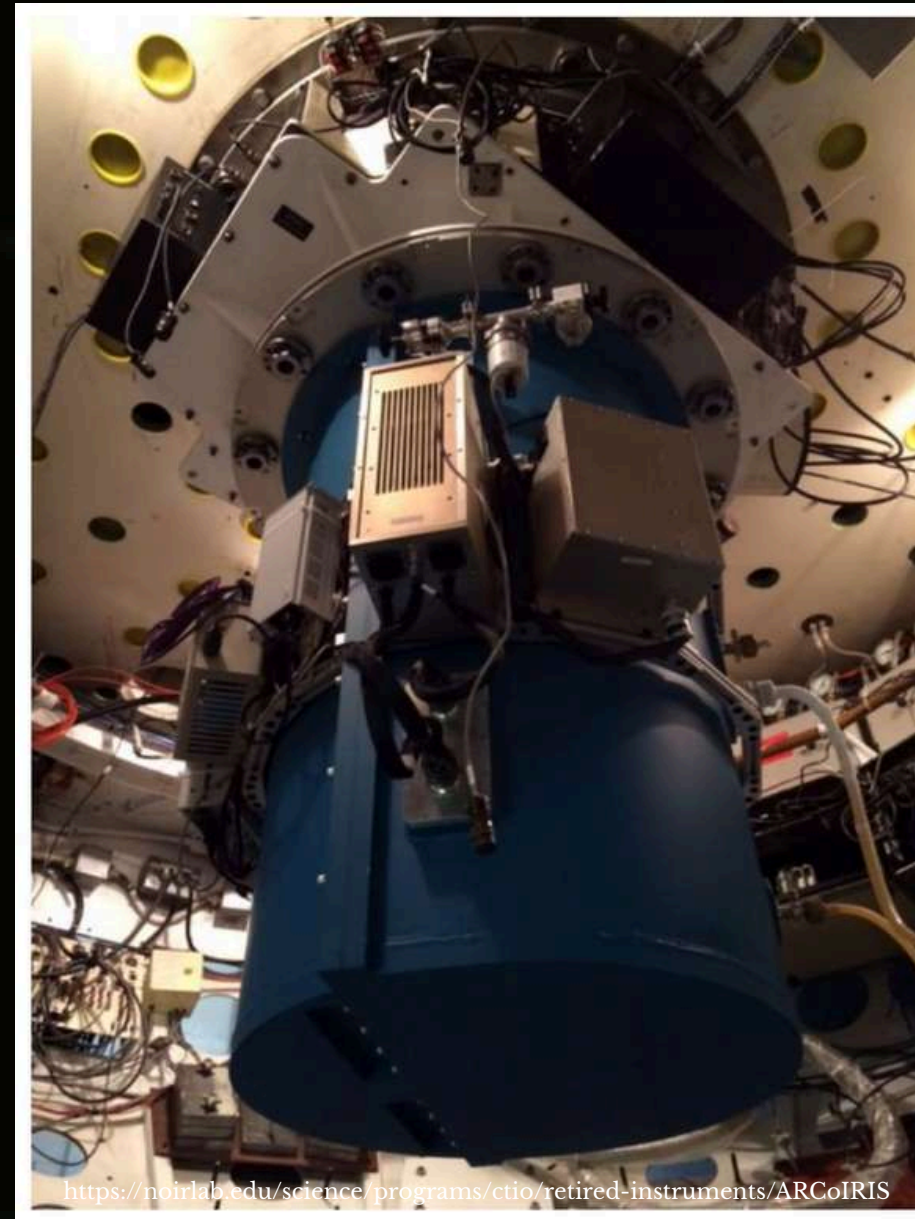
Spectre DELORME AB b

VLT/SINFONI

JWST/MIRI

VLT/UVES

APO/Triple Spec



Near IR : 0,95-2,46 μm