

Des proto-étoiles aux trous noirs : l'histoire mouvementée des étoiles et de leurs planètes

Valérie Van Grootel

valerie.vangrootel@uliege.be



L'histoire mouvementée des étoiles et de leurs planètes

- La naissance des étoiles et des planètes
- La longue vie des étoiles et de leurs planètes
- Et vers la fin...que deviennent les étoiles et leurs planètes ?



L'histoire mouvementée des étoiles et de leurs planètes

- La naissance des étoiles et des planètes
- La longue vie des étoiles et de leurs planètes
- Et vers la fin...que deviennent les étoiles et leurs planètes ?

Les seuls endroits où les étoiles se forment sont les **nuages moléculaires**, constitués de gaz (~99% en masse) et de poussières (~1%). Ils sont (assez) denses: 10^2 à 10^6 particules par cm^3 et froids: 10-20K (-253°C à -263°C).



Les Piliers de la Création, Hubble Space Telescope (image visible)



Zoom sur la Gabriela
Mistral Nebula (NGC3324),
Télescope James Webb
(proche infrarouge)

Zoom sur les Piliers
de la Création,
Télescope James
Webb (proche
infrarouge)



Les nuages moléculaires et les filaments



Herschel Space Telescope (IR lointain)

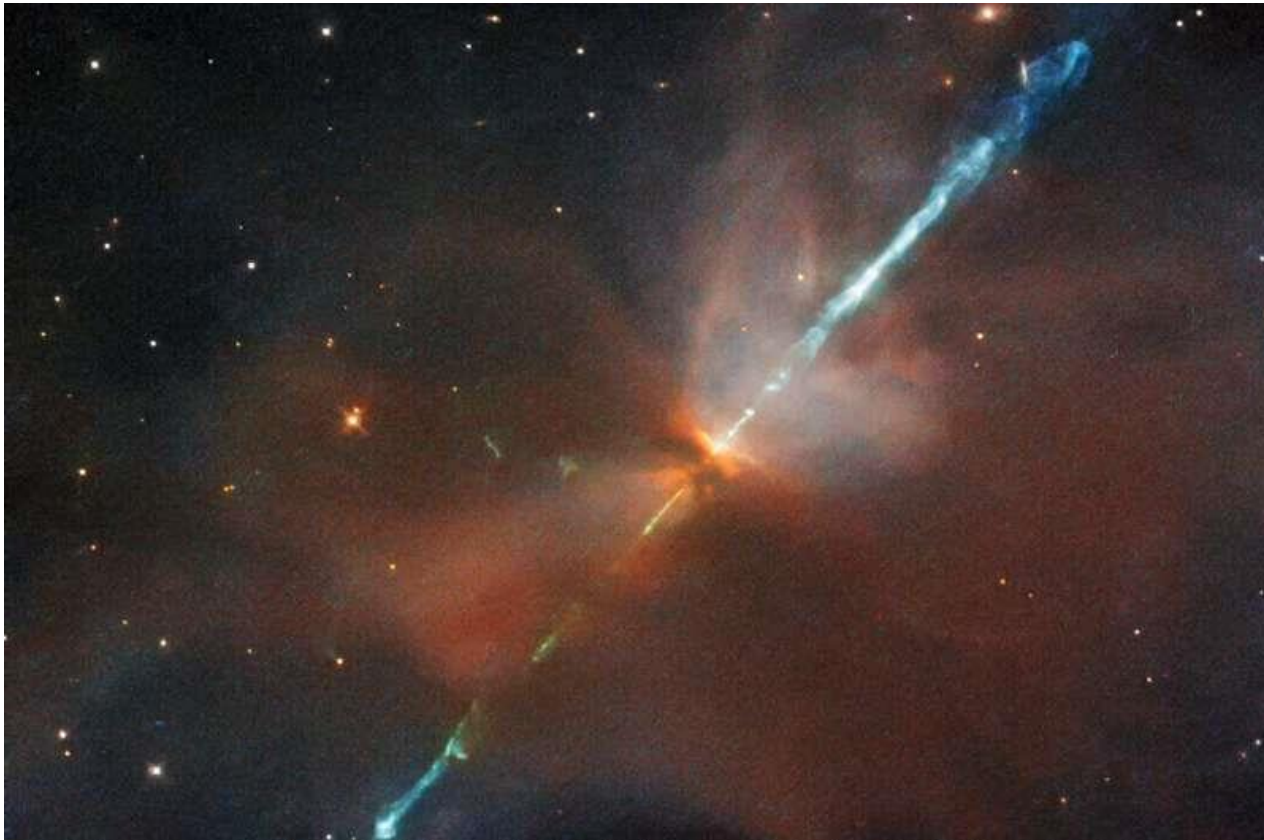
TOUS les nuages moléculaires ne sont pas uniformes en densité mais « organisés » en **filaments**. Les filaments les plus denses contiennent des **cœurs pré-stellaires**.

Il faut passer d'une densité de $10^2 - 10^6$ particules par cm^3 à 10^{24} particules par cm^3 (densité d'une étoile: $\sim 1000 \text{ kg/m}^3$, comme l'eau)



Les proto-étoiles

Par conservation du moment cinétique du gaz, un **disque d'accrétion** se forme autour de la proto-étoile. Ce disque d'accrétion alimente la proto-étoile qui grossit et des **jets** apparaissent. On appelle ces proto-étoiles avec jets des **objets de Herbig-Haro (HH)**.

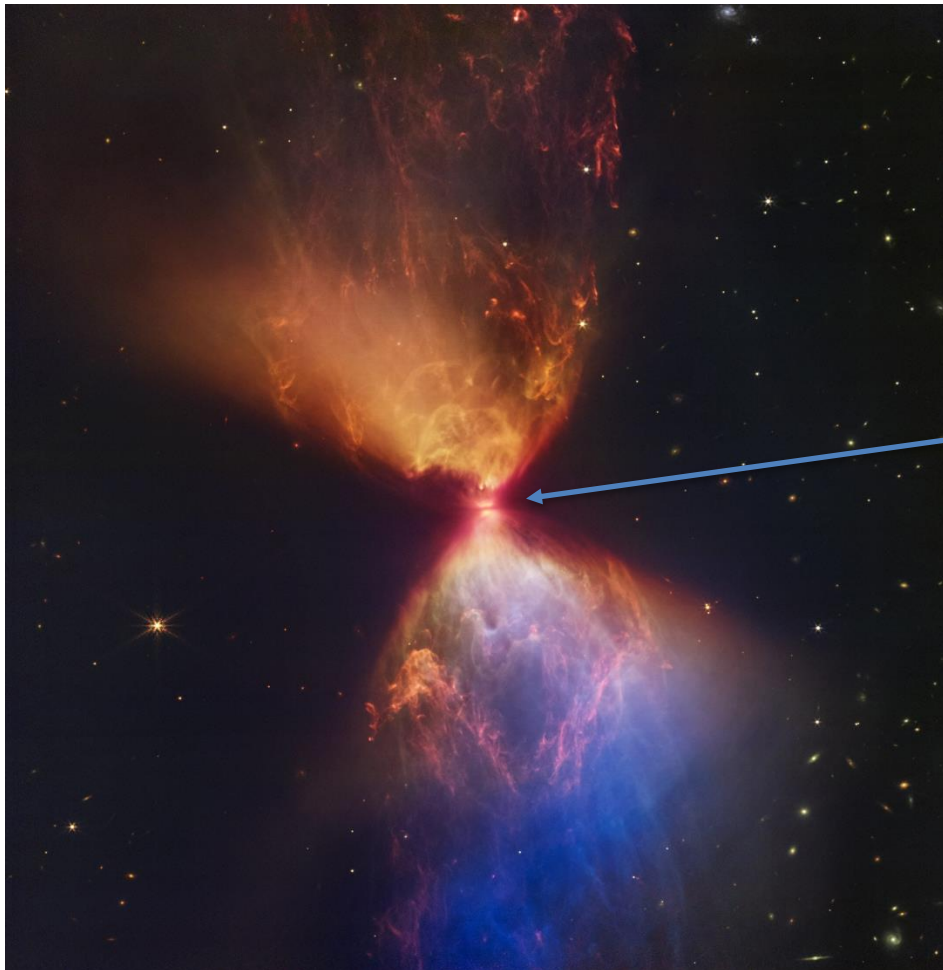


HH111 (Télescope Hubble, visible). Age : quelques milliers d'années



Les proto-étoiles

- Finalement, la plupart de la matière a été balayée par les jets : l'accrétion (= la chute de matière sur l'étoile) s'arrête, les jets disparaissent, et le disque d'accrétion devient un **disque protoplanétaire** où vont se former les **planètes**

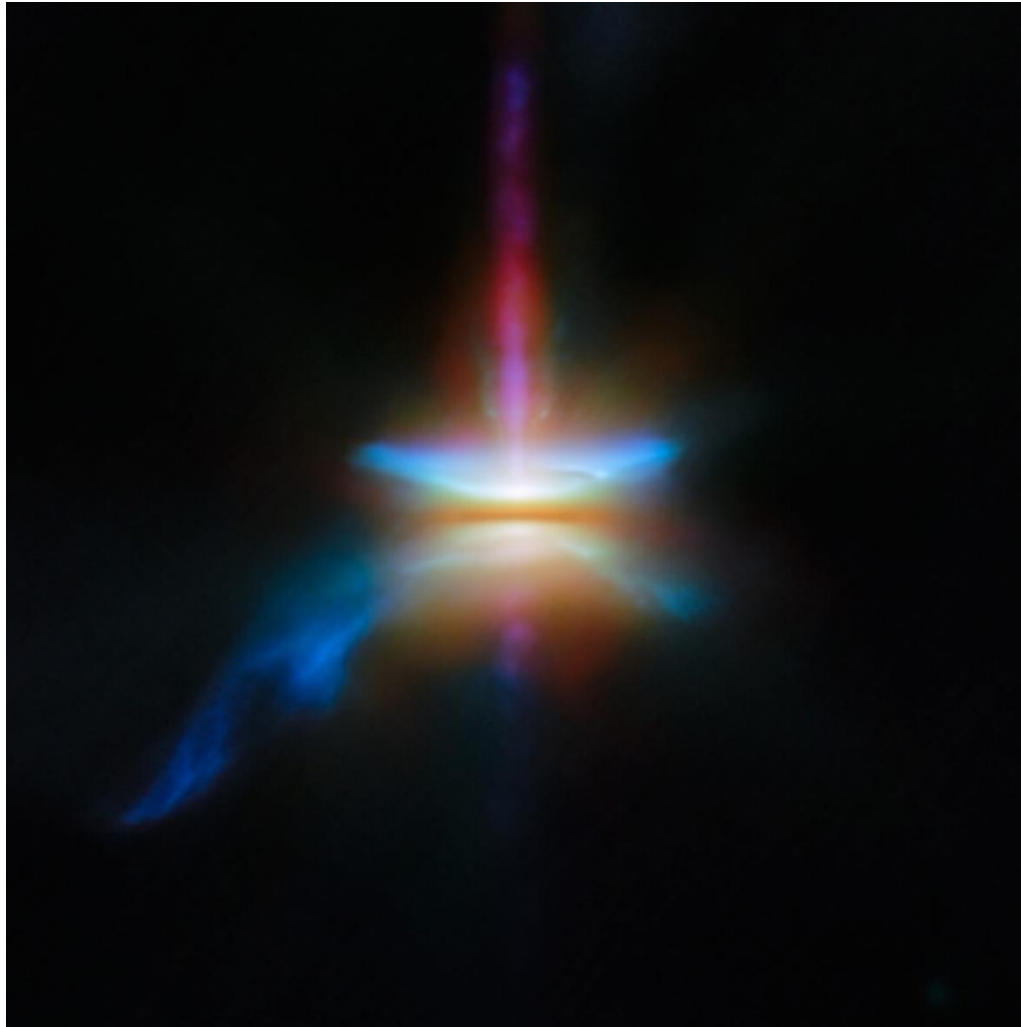


Disque
d'accrétion/proto-
planétaire

L1527
Télescope James
Webb
Age ~100,000 ans

Les proto-étoiles

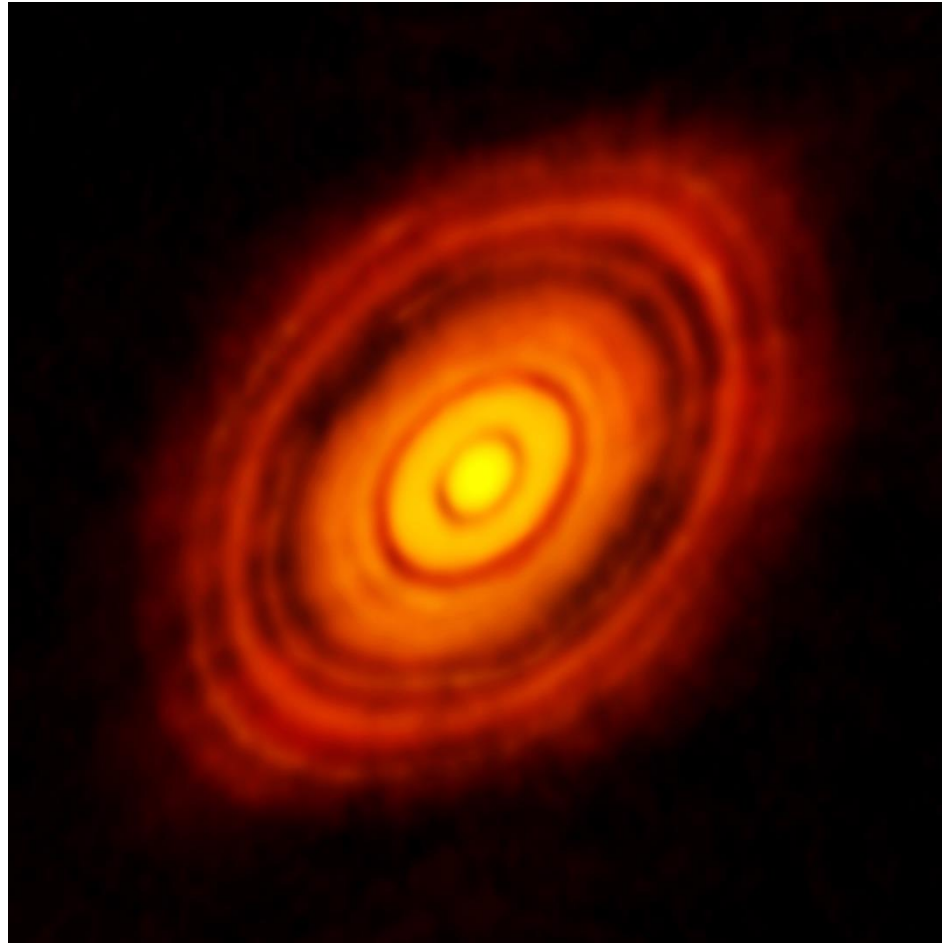
Zoom sur un disque proto-planétaire vu par la tranche



HH30, James Webb, Hubble et ALMA (12/2/2025)

Disques protoplanétaires

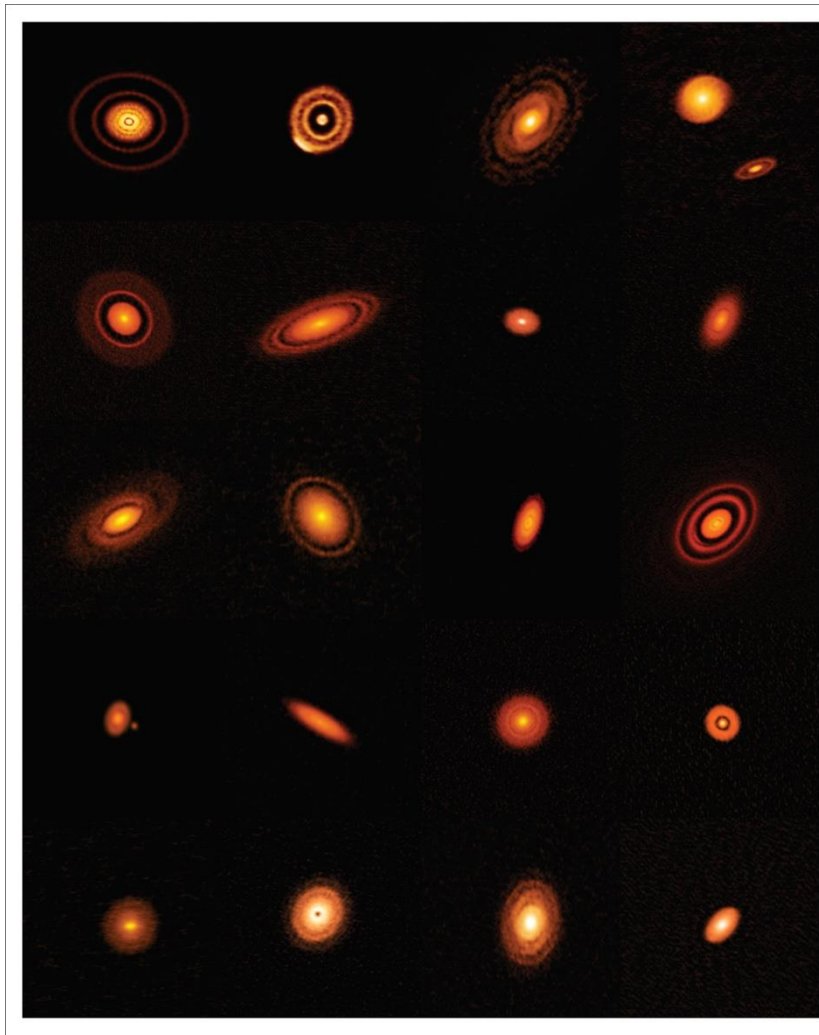
2014: HL Tau par
ALMA (2.9, 1.3 et
0.9 mm)



Anneaux brillants: régions denses contenant gaz et poussières (pas répartis uniformément)
Cavités (gaps): formés par les planètes en formation

Disques protoplanétaires

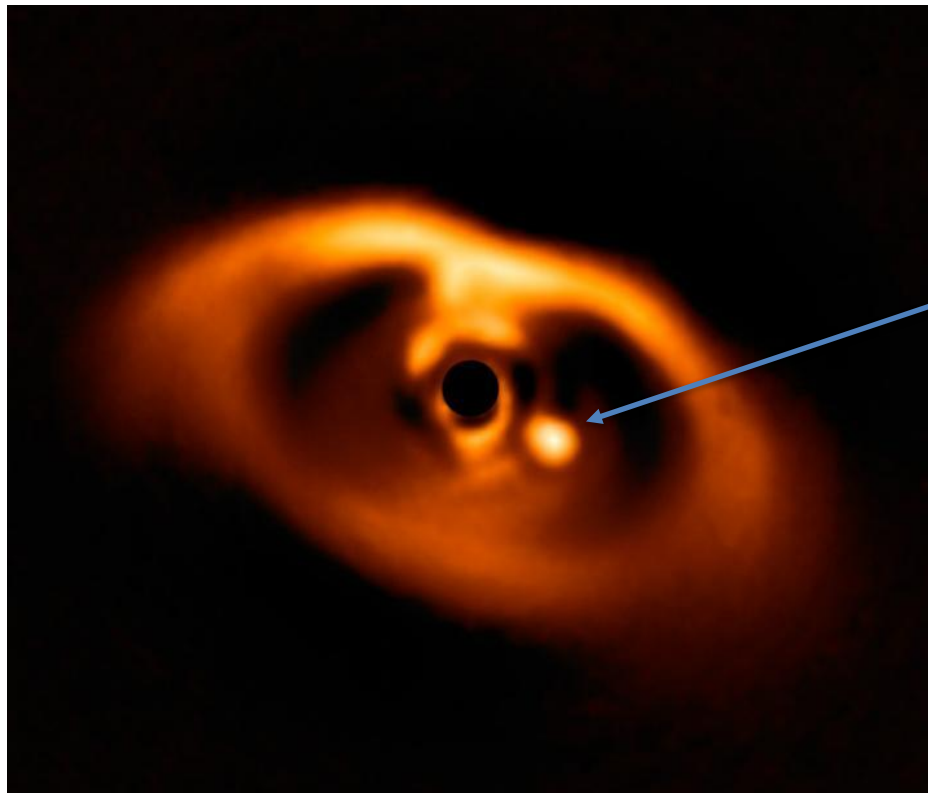
2018: 20 disques
protoplanétaires autour
d'étoiles jeunes (ALMA)



Des anneaux et des gaps sont visibles dans **chaque** disque: la formation de planètes est un process très commun (universel ?)

Disques protoplanétaires

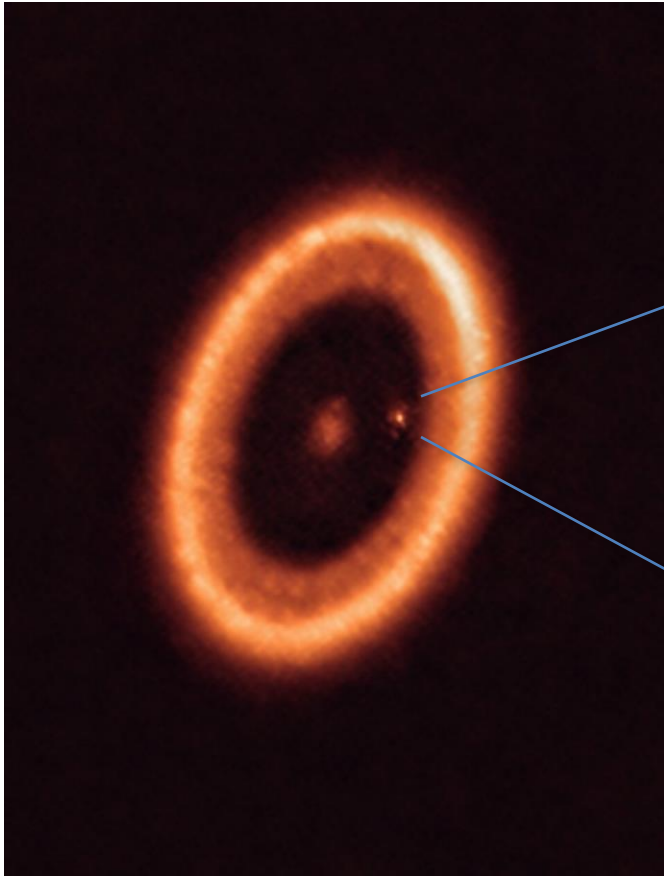
2018: Etoile T Tauri PDS70: une toute jeune planète dans un disque



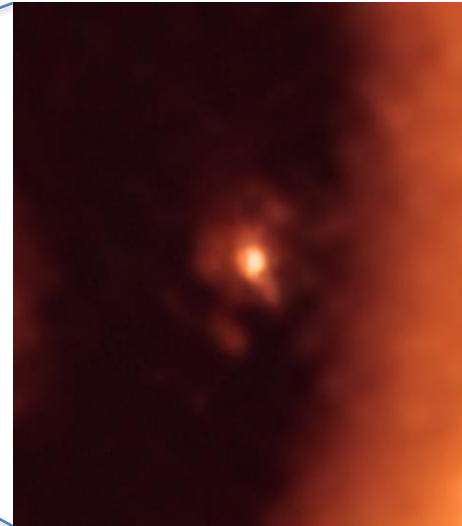
PDS70-b

SPHERE@VLT
(proche infrarouge)

Disques protoplanétaires

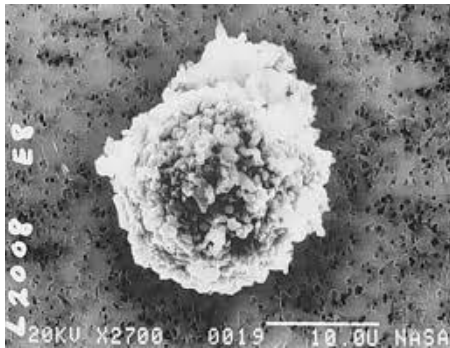


PDS70-c: une lune en formation autour d'une jeune planète ? (« disque circumplanétaire »)



PDS70 by ALMA@0.86 mm

La formation des planètes : les étapes



Grains (μm)



Planétésimaux ($\sim\text{km}$)
(1-2 Myr = millions d'années)



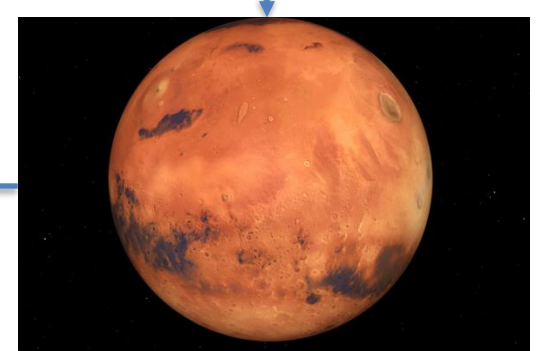
Croissance par collisions
(croissance « galopante »)



Accrétion de gaz
($< 10\text{-}15$ Myr)



Planètes terrestres (10-100 Myr)
Cœurs des planètes géantes (5-10 Myr),
 $5\text{-}20 M_{\text{Terre}}$

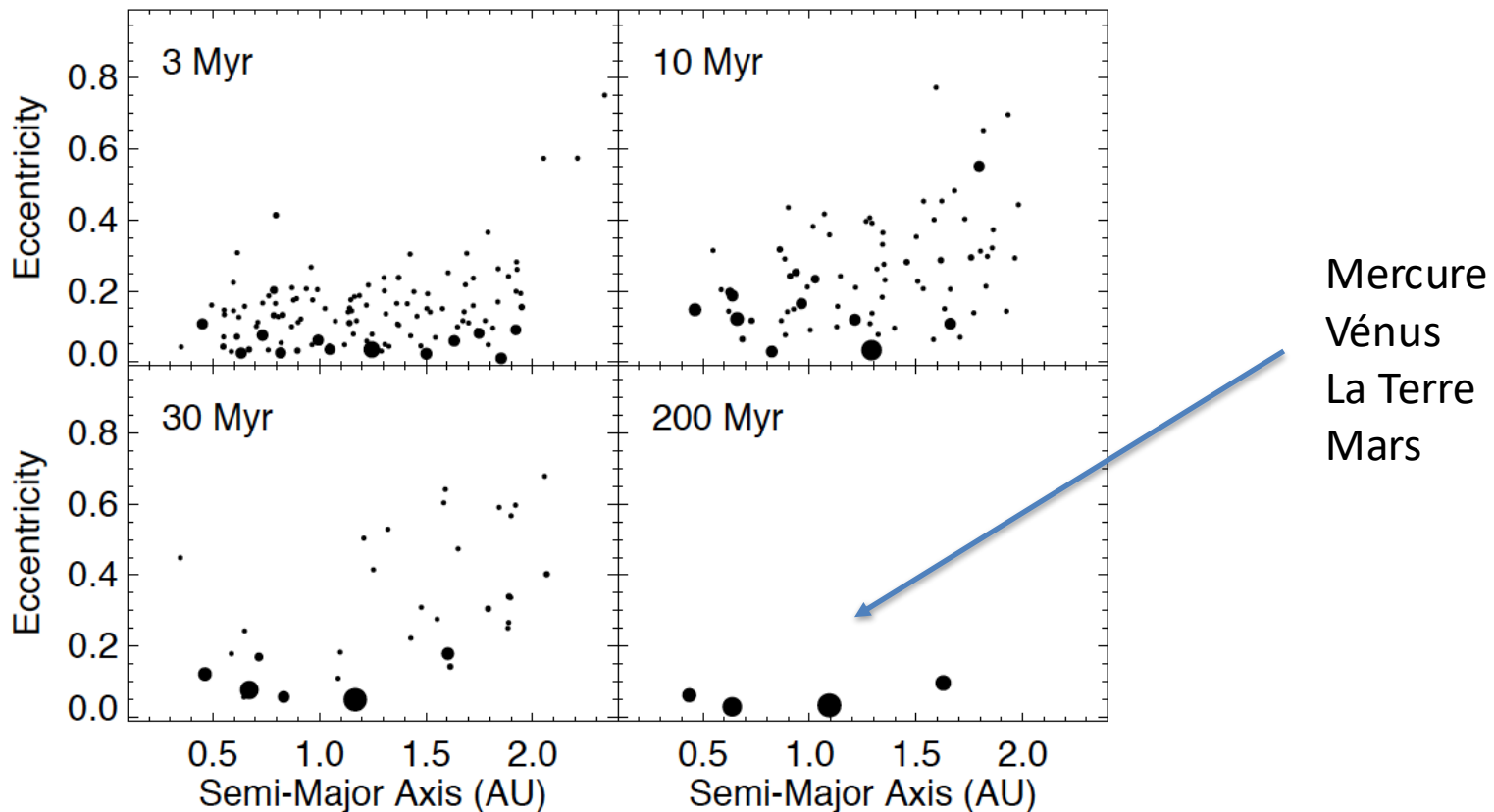


Protoplanètes ($\sim\text{Mars}$)
(2-3 Myr)

La formation des planètes

Trois zones distinctes de “coagulation”:

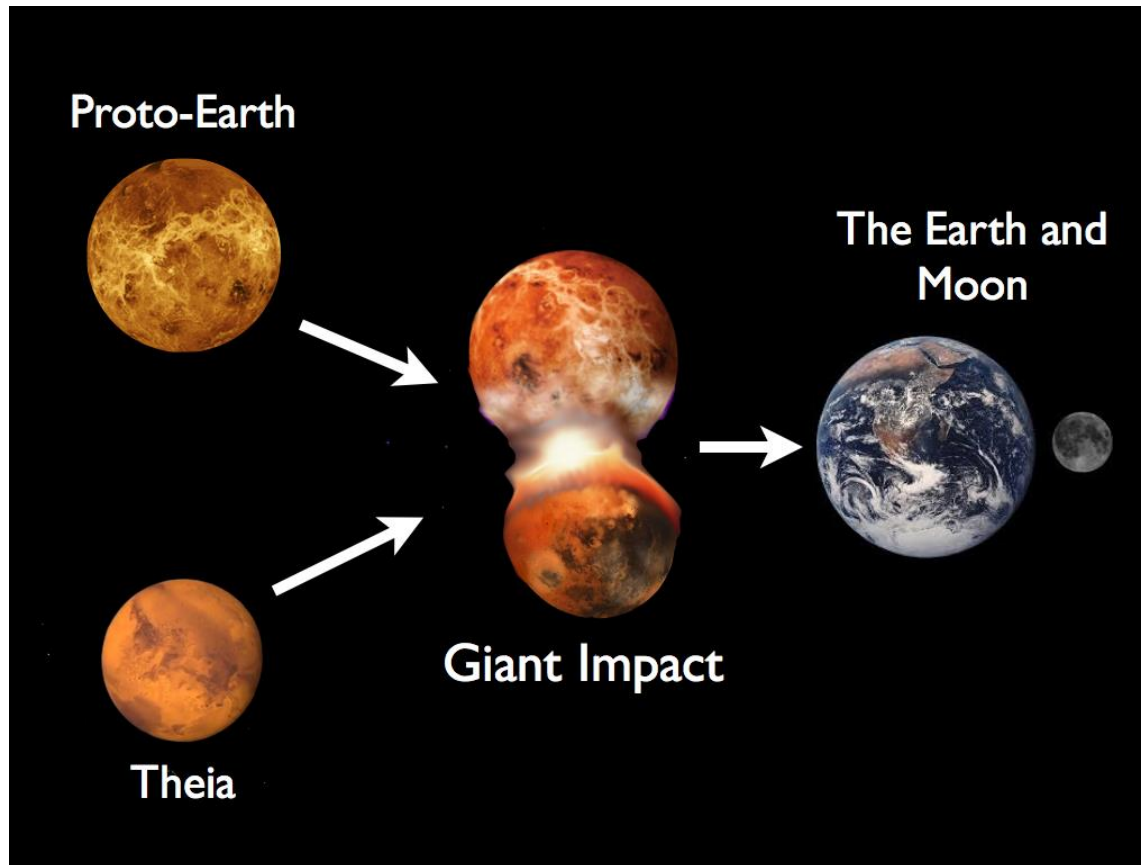
1. Vers $\lesssim 2$ UA (unité astronomique = 150 millions de km), **des dizaines de protoplanètes sont formées**, qui subissent des instabilités orbitales et des collisions pendant ~ 100 millions d’années, avant d’arriver à une configuration dynamiquement (plus) stable.



La formation des planètes

Trois zones distinctes de “coagulation”:

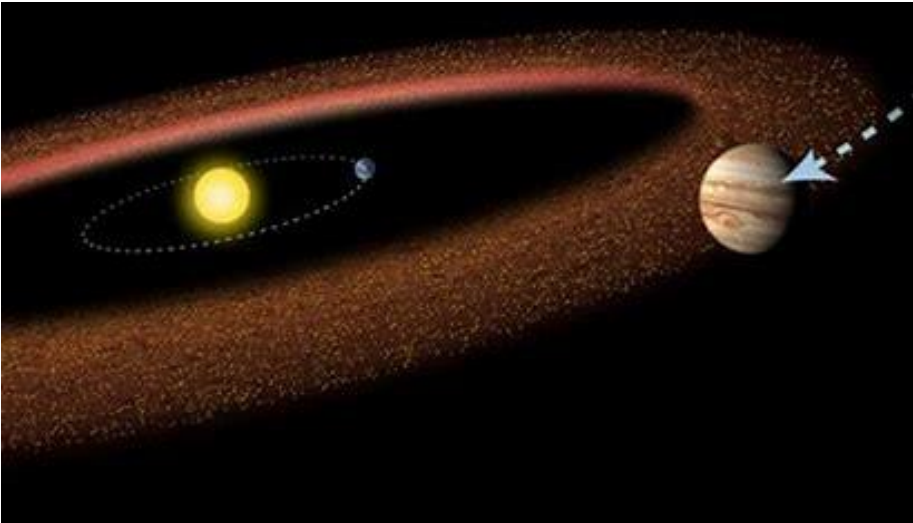
1. Vers $\lesssim 2$ UA, des dizaines de protoplanètes sont formées, qui subissent des instabilités orbitales et des **collisions** pendant ~ 100 millions d’années, avant d’arriver à une configuration dynamiquement (plus) stable.



La formation des planètes

Trois zones distinctes de “coagulation”:

2. Dans certaines zones, dont $\sim 2-2.7$ UA (ceinture d’astéroïdes entre Mars et Jupiter), la coagulation est incomplète, soit parce que les planétésimaux étaient perturbés par une planète proche et massive en formation, soit parce qu’il n’y avait pas assez de matière

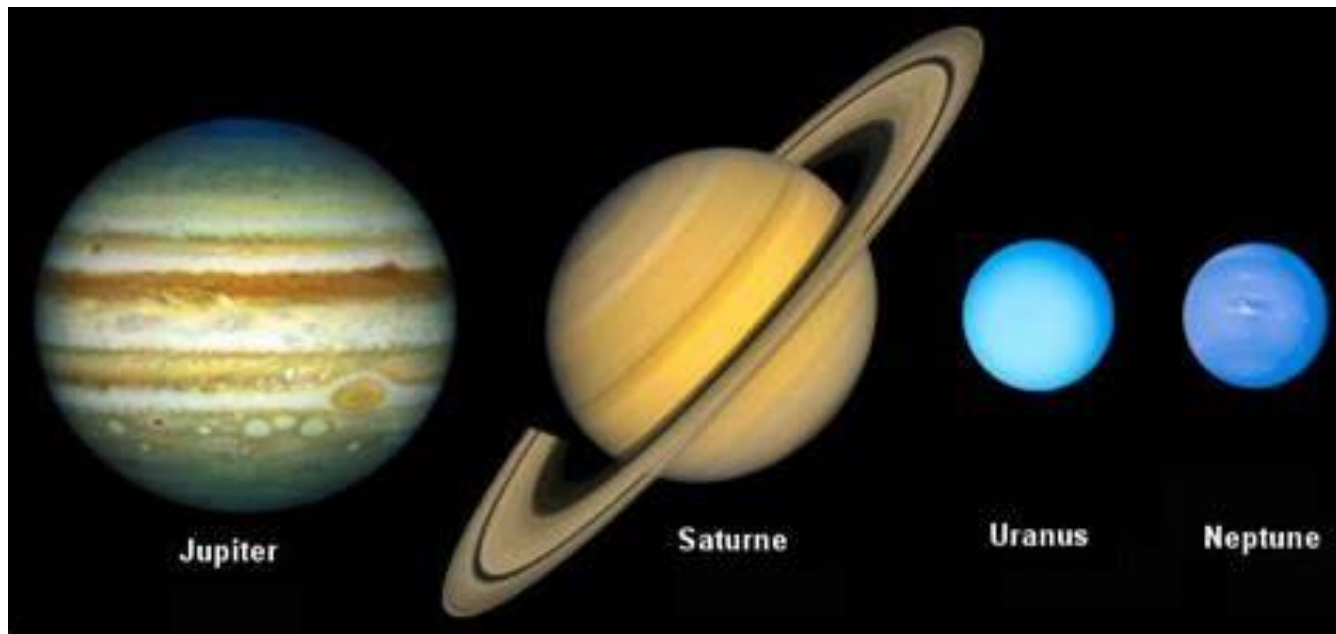


1 planète naine, Cérès (950 km de diamètre)

La formation des planètes

Trois zones distinctes de “coagulation”:

3. Au-delà de la ligne des glaces (2.7 UA pour la glace d’eau pour le jeune Soleil), plusieurs planètes ont pu grossir jusqu’à $\sim 5\text{-}20 M_{\text{Terre}}$, ce qui a permis d’attirer de grandes quantités de gaz (**Jupiter, Saturne**). Dans ce scénario, **Uranus** et **Neptune** sont des géantes « ratées »: soit il n’y avait pas assez de gaz à capturer à l’endroit où elles se sont formées, soit elles l’ont fait trop tard : la majeure partie du gaz avait déjà été capturée par Jupiter et Saturne.



La formation des planètes

L'accrétion continue...



Meteor Crater, Arizona, ~50,000 ans



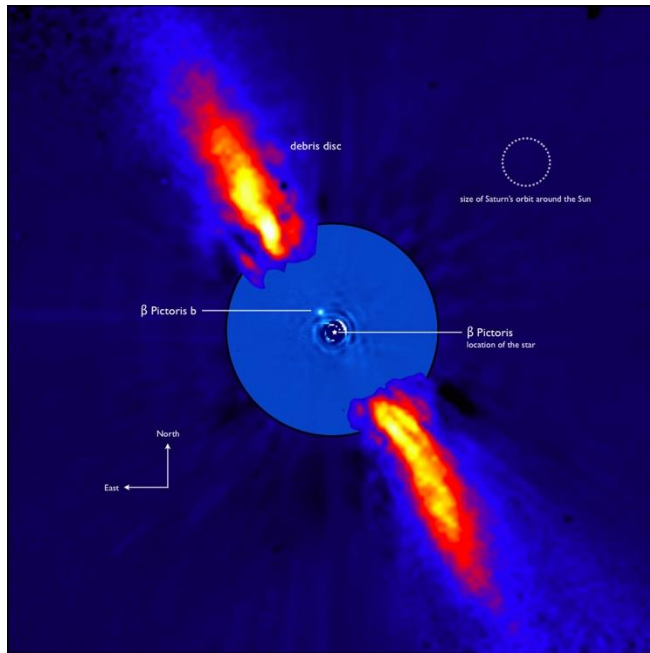
Météore de Tcheliabinsk, 15/2/2013

Et 100 tonnes de (micro)météorites tombent sur Terre à chaque seconde...

Les disques de débris

Après la formation des planètes, le disque est pauvre en gaz, mais tous les grains de poussière n'ont pas été incorporés dans des planètes: astéroïdes, comètes, et toujours des grains « originaux » ou issus de collisions entre les planétésimaux: le **disque de débris**.

Ex: Vega, β Pic, AU Mic...et le Soleil ! Cette poussière « résiduelle » se trouve dans le plan de l'écliptique et est appelée le **nuage zodiacal**



β Pictoris en proche IR (VLT)
Etoile de ~ 20 Myr



Lumière zodiacale
à Paranal (Chili)



L'histoire mouvementée des étoiles et de leurs planètes

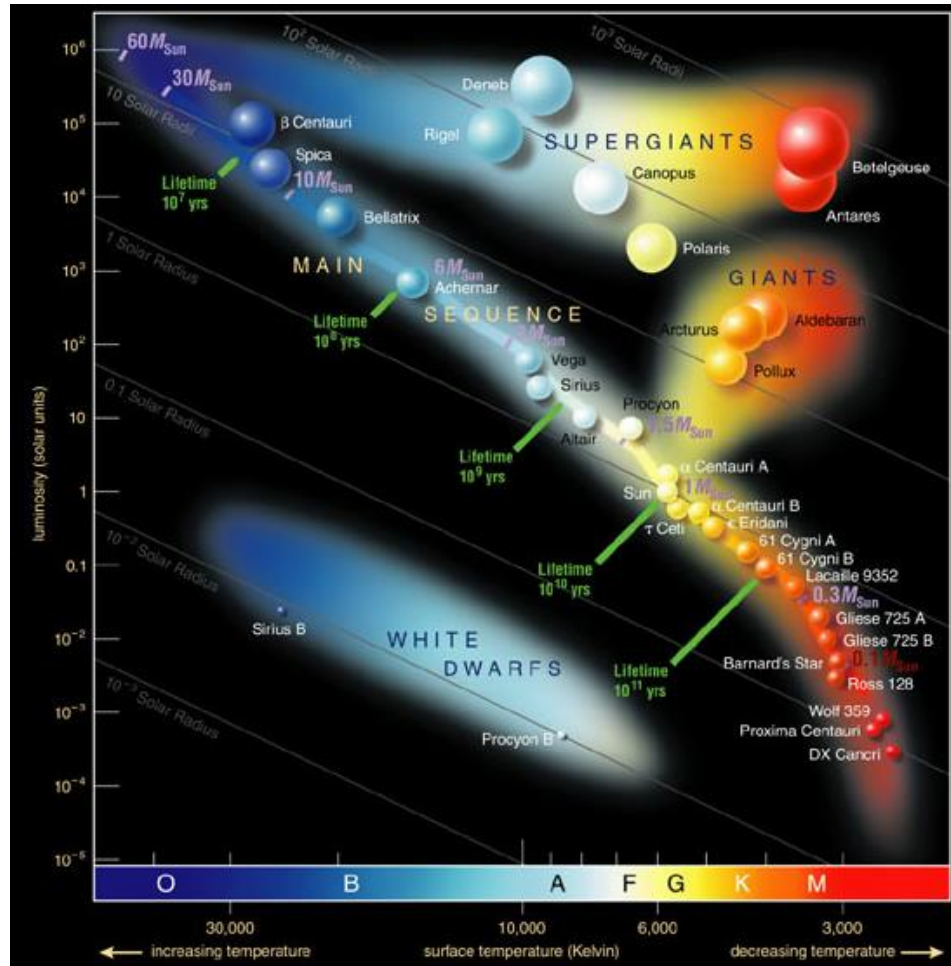
- La naissance des étoiles et des planètes
- La longue vie des étoiles et de leurs planètes
- Et vers la fin...que deviennent les étoiles et leurs planètes ?

Le diagramme de Hertzsprung-Russel (HR)

= façon pratique de classer les étoiles en fonction de leur luminosité et de leur température

plus lumineux ↑

Luminosité (W)



plus chaud ←

Température de surface (°K)

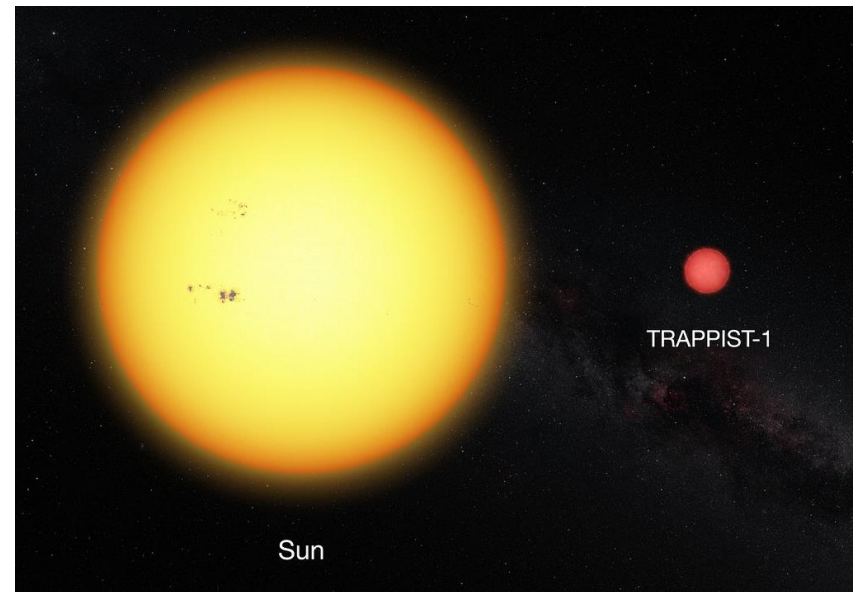
Le diagramme de Hertzsprung-Russel (HR)

On constate que la plupart des étoiles se regroupent le long d'une bande diagonale : la **séquence principale**, qui correspond à la vie « adulte » d'une étoile :

- C'est la **masse** d'une étoile qui détermine sa position sur le diagramme HR. Les plus massives sont en haut à gauche, les moins massives sont en bas à droite.
- C'est la **fusion** de l'hydrogène en hélium dans le cœur qui fournit l'énergie aux étoiles de la séquence principale



Eta Carinae A: $\sim 150 M_{\odot}$, $\sim 800 R_{\odot}$



TRAPPIST-1: $\sim 0.09 M_{\odot}$, $\sim 0.12 R_{\odot}$

La vie des étoiles sur la séquence principale

Plus une étoile est massive, *plus* elle est lumineuse, et **moins** elle vit longtemps sur la séquence principale:

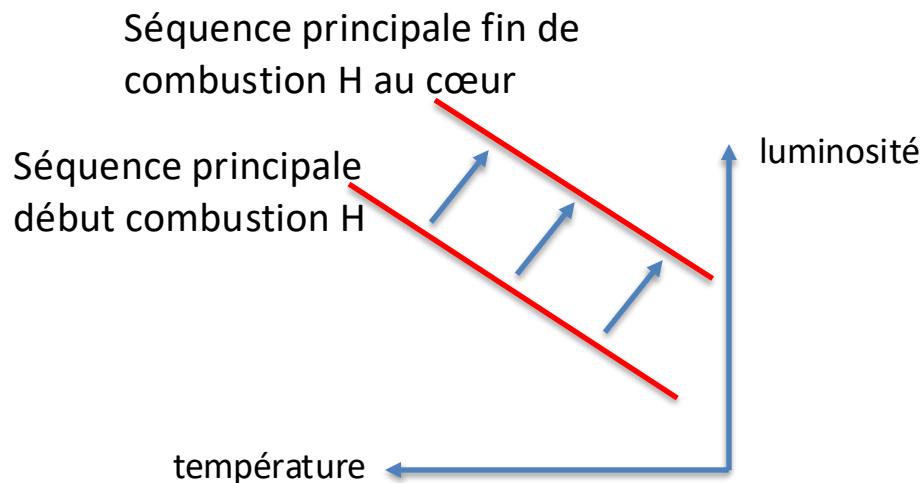
- Elles ont plus de carburant, mais le rythme auquel elles le brûlent (ce qui détermine la luminosité, qui est une puissance, en watt) est beaucoup plus élevé !

Masse ($M_{\odot}$)	Temp. (K)	Luminosité ($L_{\odot}$, en W)	Durée de vie (10^9 ans)
47	45,000-25,000	315,000-650,000	0.004 (4 millions)
3	11,000	60	0.45
1	5800	1	9
0.1	2800	0.0001	6000

NB : les étoiles très massives n'ont donc pas le temps de former des planètes !
(a priori...)

La vie des étoiles sur la séquence principale

Masse ($M_{\odot}$)	Temp. (K)	Luminosité ($L_{\odot}$)	Durée de vie (milliards d'années)
47	45,000-25,000	315,000-650,000	0.004 (4 millions)
1	5820-5650	0.7-1.6	9



Que se passe-t-il ?

- l'hélium s'accumule au cœur et « gêne » la combustion de H
- le cœur se contracte, ceci augmente le taux de fusion et l'étoile devient globalement plus lumineuse !
- « Effet miroir » : elle se dilate légèrement (elle grossit) et se refroidit en surface

Le paradoxe du jeune Soleil pâle

- Le jeune Soleil n'avait que $\sim 70\%$ de sa luminosité actuelle...
 - 1^{ères} traces d'eau liquide: -3.8 milliards d'années, 1^{ères} traces de vie (stromatolites): -3.5 milliards d'années
- Si l'atmosphère était similaire à l'actuelle, la Terre était complètement gelée ! Et pas d'eau liquide, pas de vie !

C'est le paradoxe du jeune Soleil pâle



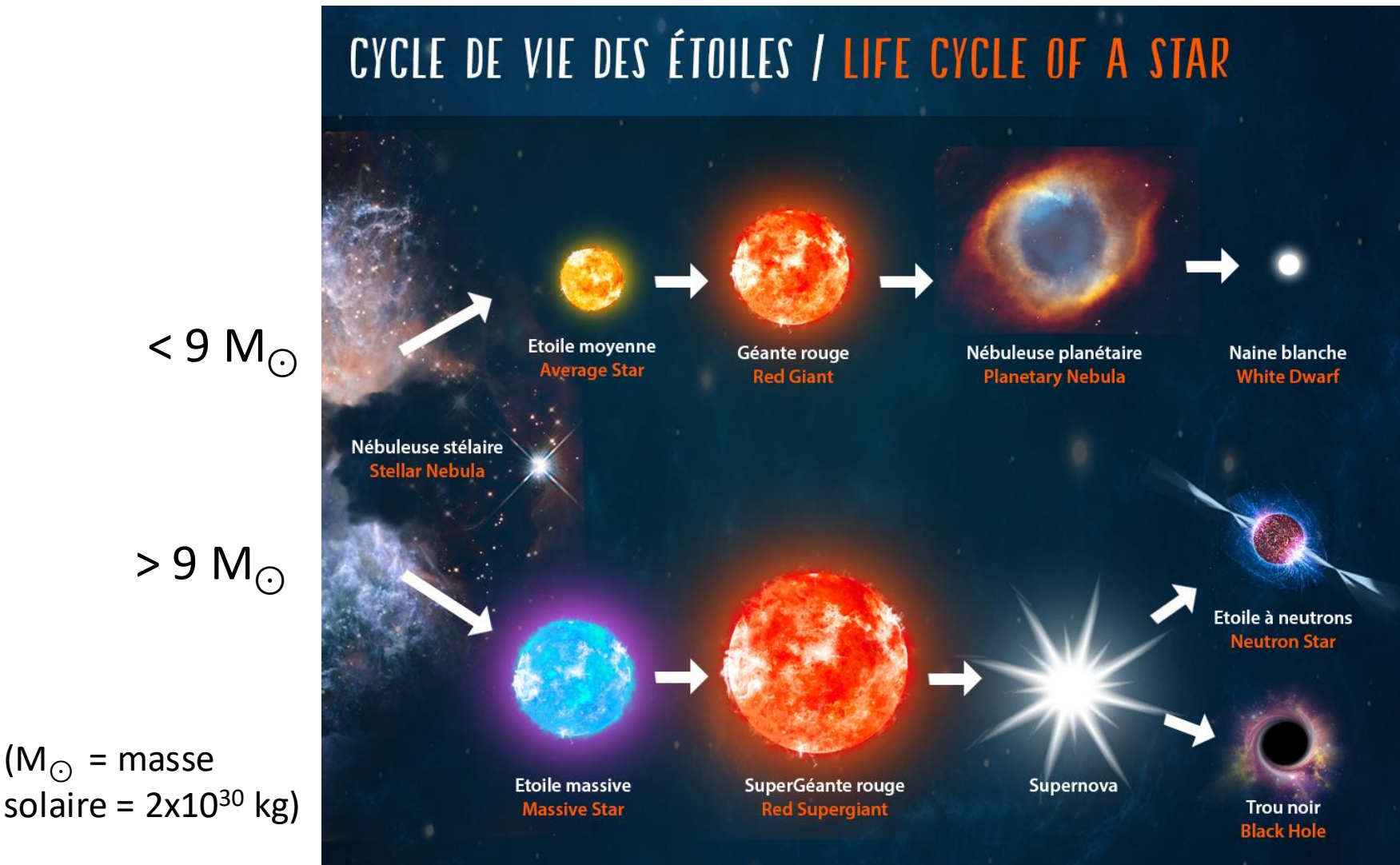


L'histoire mouvementée des étoiles et de leurs planètes

- La naissance des étoiles et des planètes
- La longue vie des étoiles et de leurs planètes
- Et vers la fin...que deviennent les étoiles et leurs planètes ?

Que se passe-t-il à la fin de la séquence principale ?

2 grandes possibilités, selon la **masse initiale** :



La fin de vie des étoiles de moins de $9 M_{\odot}$

Pour le Soleil :

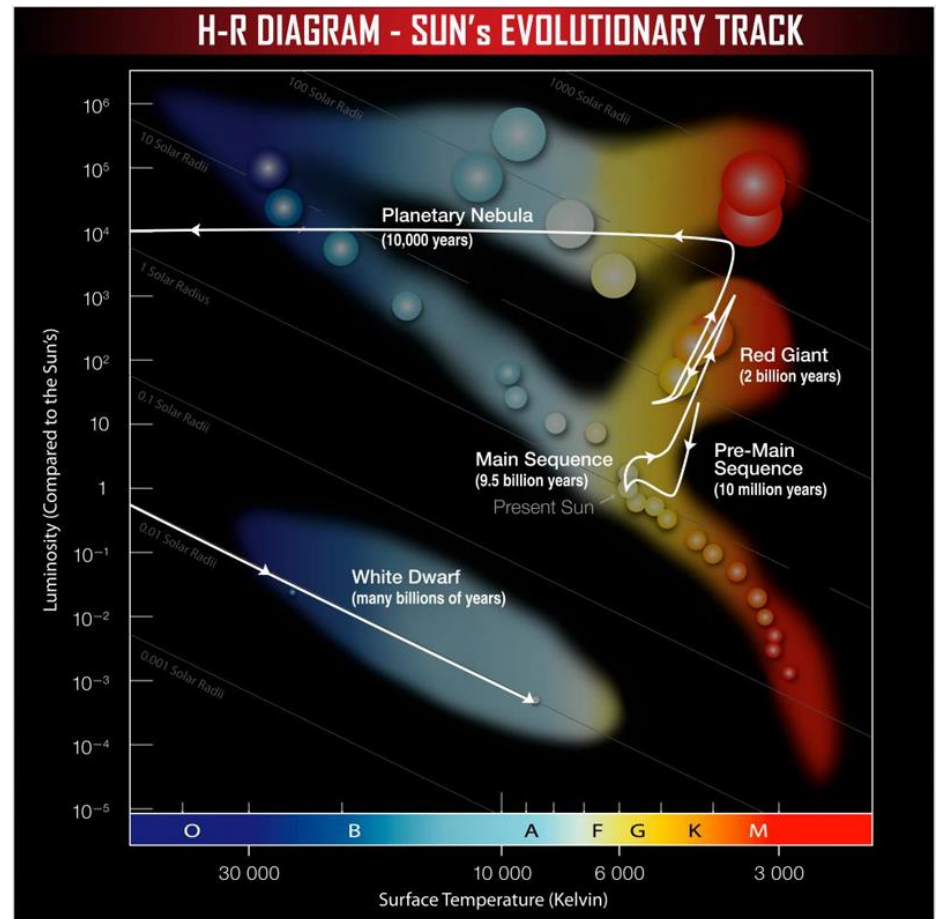
- **Phases de géante rouge** (~ 2 milliards d'années)

Va atteindre $\sim 10,000 L_{\odot}$ et $\sim 200 R_{\odot}$
($\sim$ distance Terre-Soleil)

- Expulsion des couches externes et phase de **nébuleuse planétaire**

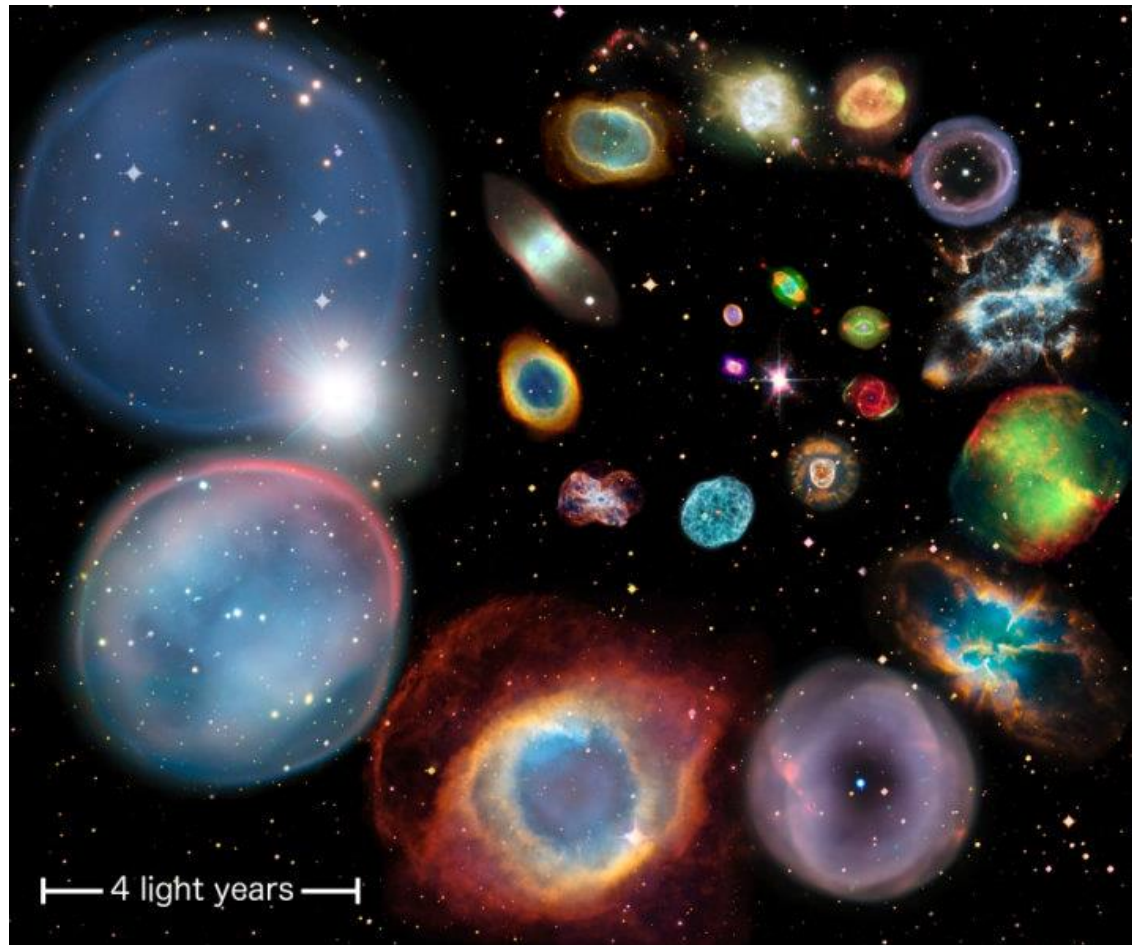
Durée $\sim 10,000$ ans, $T \sim 100,000$ K (!)

- Refroidissement en tant que **naine blanche**, au cœur de carbone et oxygène $\sim 0.6 M_{\odot}$

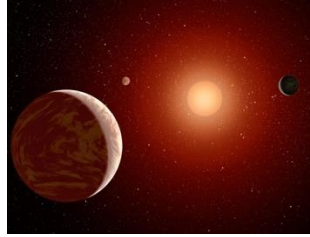


La fin de vie des étoiles de moins de $9 M_{\odot}$

Les nébuleuses planétaires, avec au centre une pré-naine blanche ($T \sim 100,000 \text{ K}$),
qui sont les étoiles les plus chaudes de l'Univers



Un cas « spécial »: les naines rouges ultrafroides comme TRAPPIST-1



Masse ($M_{\odot}$)	Temp. (K)	Luminosité ($L_{\odot}$)	Durée de vie (milliards d'années)
1	5800	1	9
0.1	2800	0.0001	6000

Quand l'hydrogène vient à manquer, de la même façon que les étoiles de plus hautes masses, les naines rouges voient leur luminosité augmenter. On calcule qu'elles vont passer plusieurs milliards d'années dans la phase « géante », à $\sim 0.1-0.3 L_{\odot}$ et température ~ 5500 K (mais, elles ne réussiront jamais à amorcer la fusion de l'hélium).

Ce sera la dernière phase « lumineuse » et « habitable » de l'Univers...les étoiles comme le Soleil seront devenues des naines blanches depuis longtemps, et plus généralement l'Univers ne produira plus d'étoiles depuis longtemps !

La fin de vie des étoiles de plus de $9 M_{\odot}$

$< 30 M_{\odot}$: **supergéante rouge**. Exemple : Bételgeuse. Ce sont les plus grandes étoiles de l'Univers ($\sim 1000 R_{\odot}$) ! Vont plutôt devenir des étoiles à neutrons

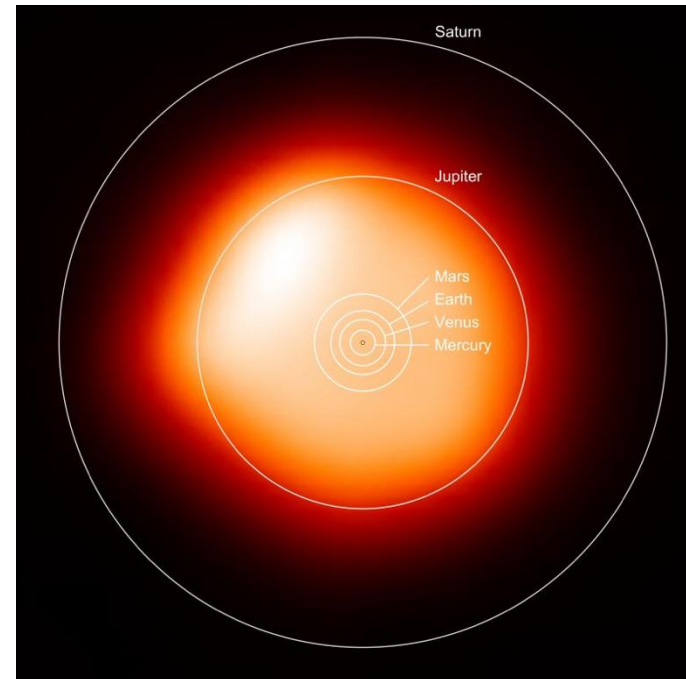
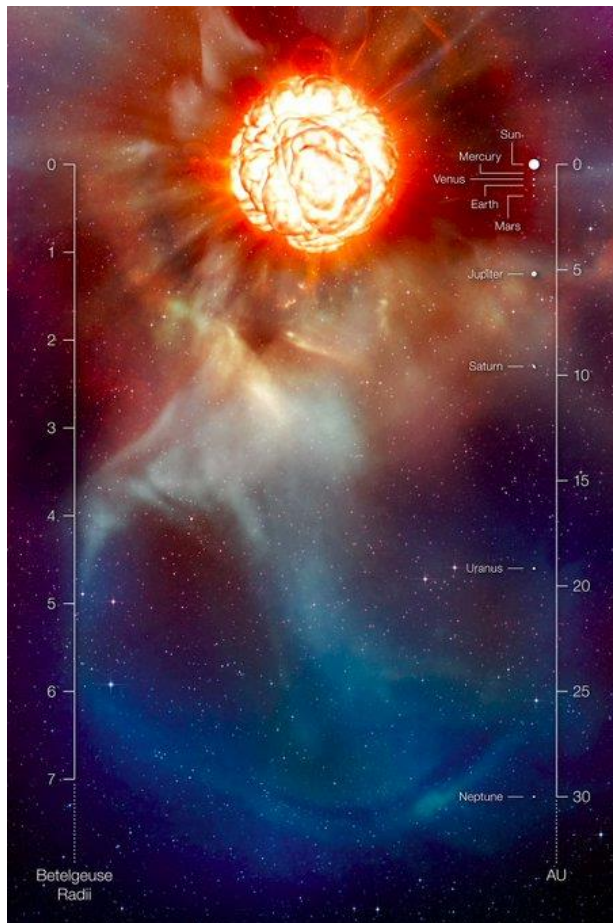
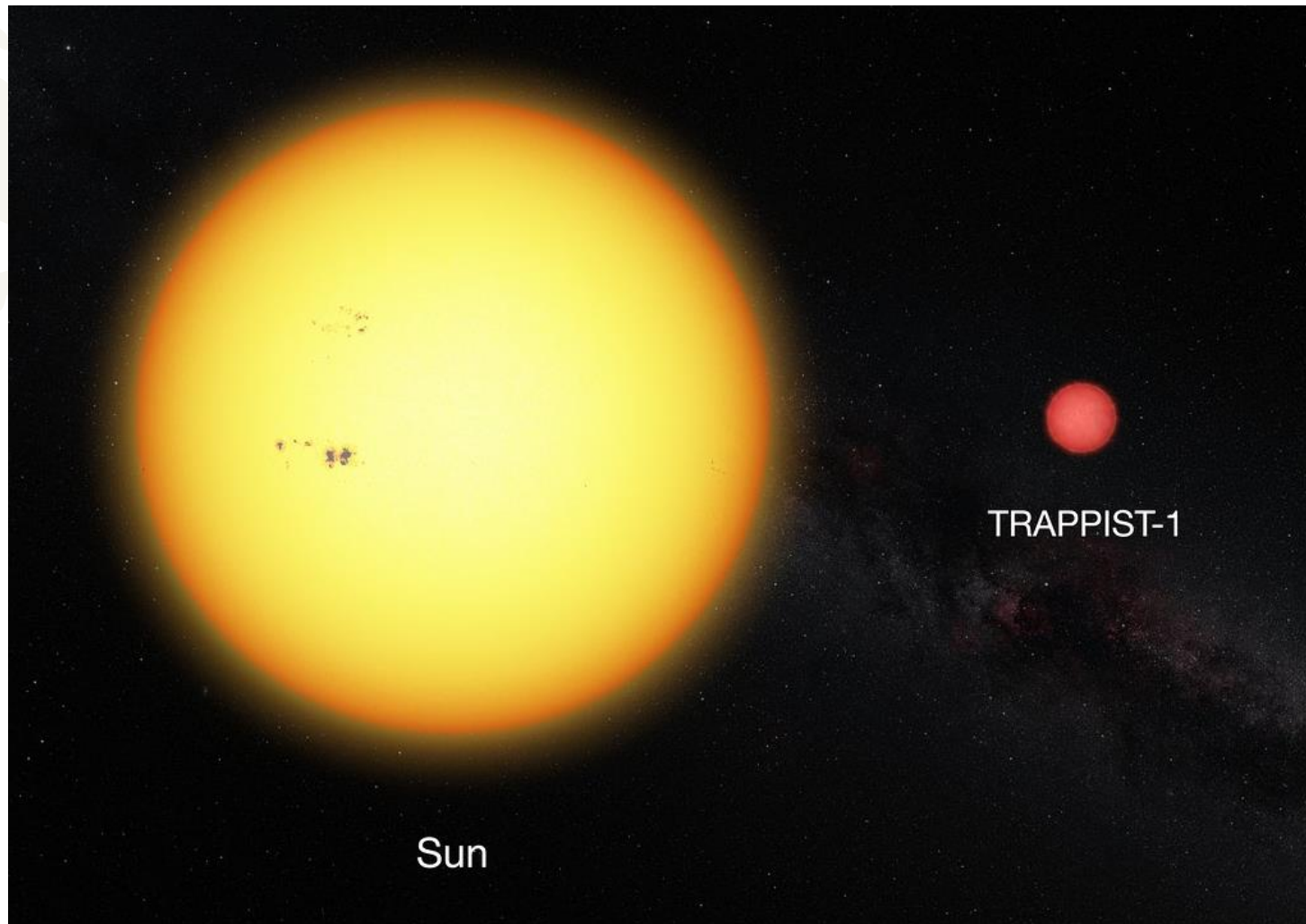


Image *réelle* de Bételgeuse
(SPHERE@VLT)



UY Scuti: $\sim 1700 R_{\odot}$



La fin de vie des étoiles de plus de $9 M_{\odot}$

$> 30 M_{\odot}$: **supergéante bleue et étoiles Wolf-Rayet**. Vont plutôt devenir des trous noirs. Exemple: Rigel



La fin de vie des étoiles de plus de $9 M_{\odot}$

Ces étoiles sont capables de fusionner le carbone au cœur, et les éléments de plus en plus lourds jusqu'au **Fer** (dernière réaction: Si $\rightarrow$ Fe), qui possède le noyau le plus stable.

Phase	Température (million K)	Durée
H fusion	40	7 million ans
He fusion	200	500,000 ans
C fusion	600	600 ans
Ne fusion	1,200	1 an
O fusion	1,500	6 jours
Si fusion	2,700	1 jour

Etapas de fusion d'éléments dans une étoile de $\sim 25 M_{\odot}$

La fin de vie des étoiles de plus de $9 M_{\odot}$

On ne peut pas fusionner le fer sans apporter de l'énergie

- Les réactions nucléaires s'arrêtent et le cœur se contracte toujours plus
- les électrons « rentrent » dans les noyaux et se combinent aux protons pour donner des neutrons ! Le cœur devient très petit
- Les couches externes « tombent » sur le cœur de neutrons et « rebondissent »: on assiste à une véritable explosion des couches externes de l'étoile: une **supernova**



$$L \sim 10^{10} L_{\odot}$$

La fin de vie des étoiles de plus de $9 M_{\odot}$



Nébuleuse du Crabe : rémanent de la supernova de 1054 observée par les chinois

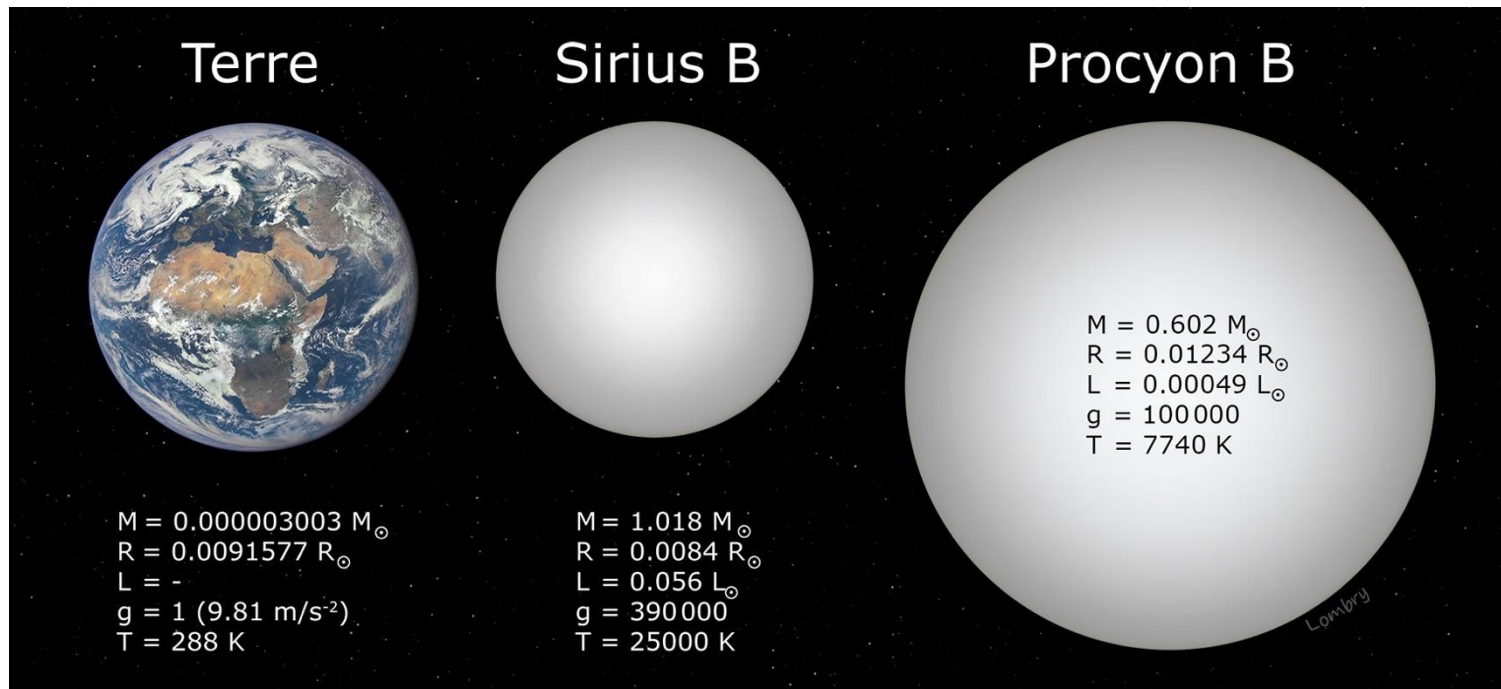


SN1987A: supernova observée en février 1987 dans le Grand Nuage de Magellan (image: JWST, 2022)

Les cadavres stellaires : les naines blanches

$\sim 0.6 M_{\odot}$ pour environ 1 rayon terrestre : 1 cm^3 pèse environ 1 tonne !

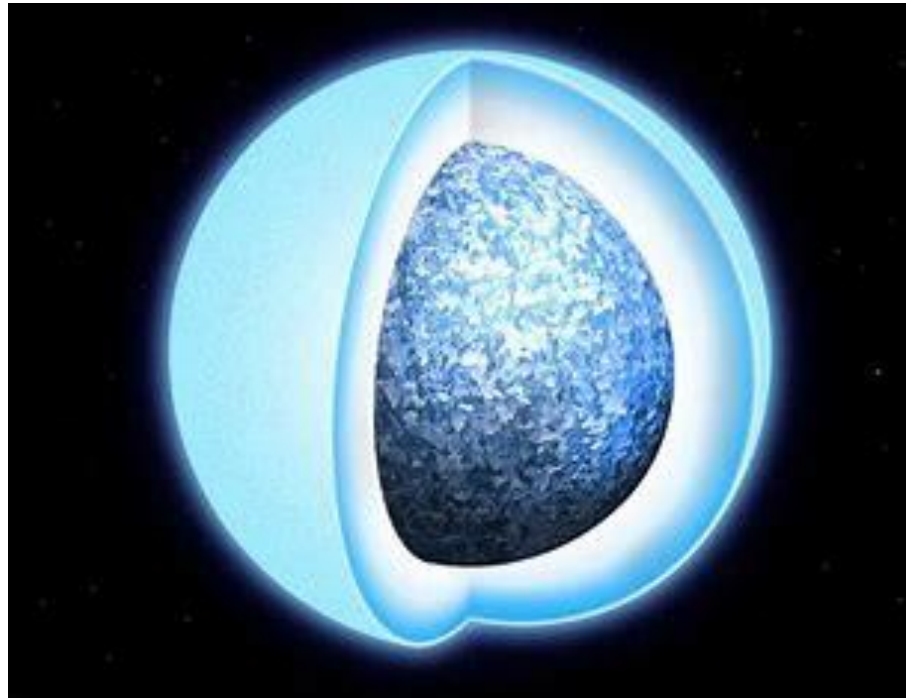
- C'est le destin du Soleil dans ~ 7 milliards d'années...
- Elles n'ont plus de réactions nucléaires, mais la pression de dégénérescence des électrons compense la gravité
- Plus une naine blanche est massive, plus elle est petite ! Maximum de $1.4 M_{\odot}$



Les cadavres stellaires : les naines blanches

$\sim 0.6 M_{\odot}$ pour environ 1 rayon terrestre : 1 cm^3 pèse environ 1 tonne !

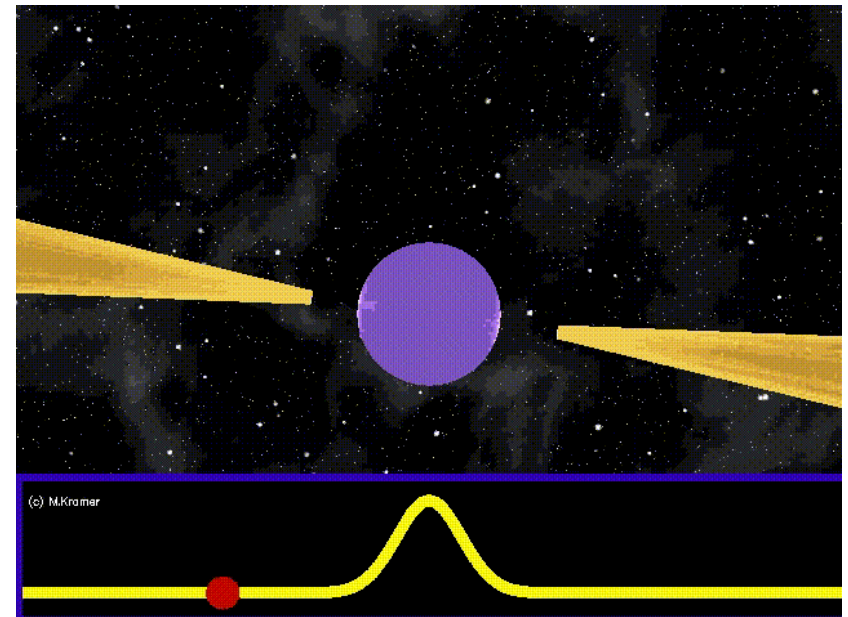
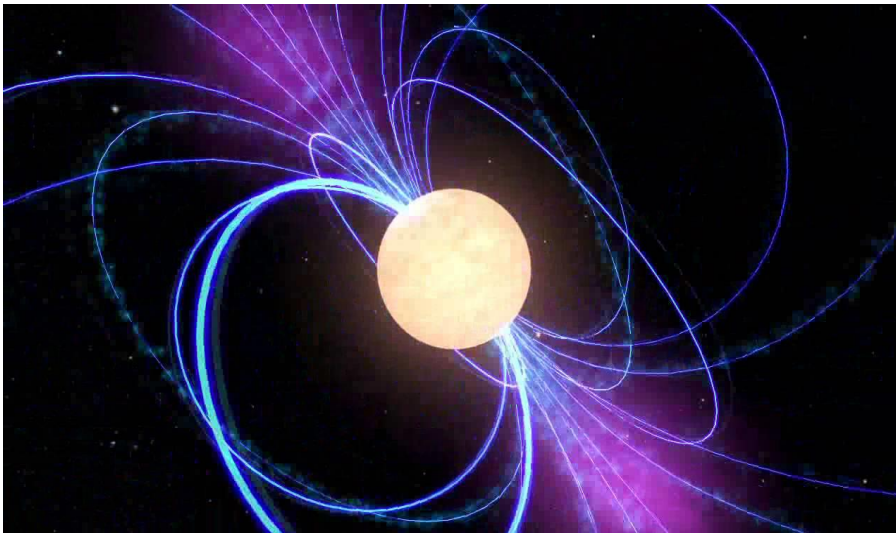
- Elles se refroidissent lentement par radiation de lumière, pour ultimement devenir une naine noire (non encore observé). Le cœur de carbone se cristallise et on obtient des **diamants célestes** !



Les cadavres stellaires : les étoiles à neutrons et les pulsars

De 1.4 à $3 M_{\odot}$ pour un rayon d'environ 10 km : 1 cm^3 pèse environ 10^{11} kg ! (100 millions de tonnes)

- Découvertes en 1967 par Jocelyn Bell, prix Nobel pour son directeur de thèse...
- Elles tournent toutes très vite (par conservation du moment cinétique), mais on ne le détecte que lorsque le faisceau de lumière balaie la Terre : ce sont les **pulsars**.
- Période de rotation de $\sim 1 \text{ ms}$ à $\sim 1 \text{ s}$

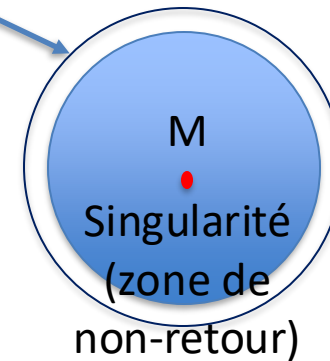


Les cadavres stellaires : les trous noirs

$>3 M_{\odot}$ pour un rayon de moins d'1 km: on parle de **singularité** de l'espace-temps

- Matière tellement comprimée que la vitesse de libération de l'objet est supérieure à la vitesse de la lumière : son rayon devient plus petit que son **rayon de Schwarzschild**
- Densité $>10^{93} \text{ kg/m}^3$, « là où notre compréhension de la physique s'arrête »

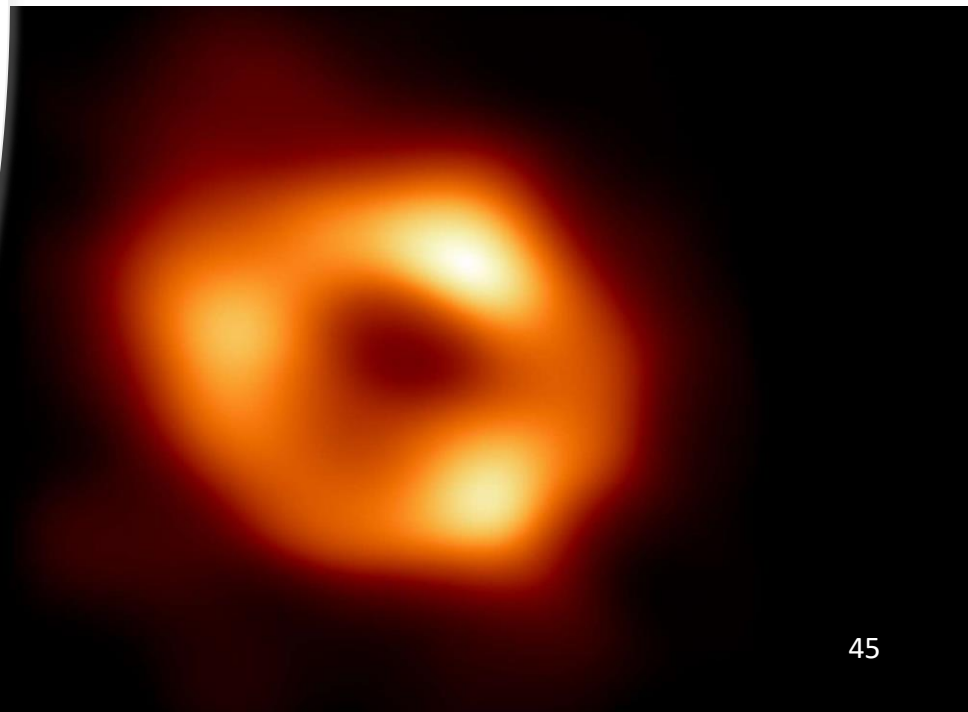
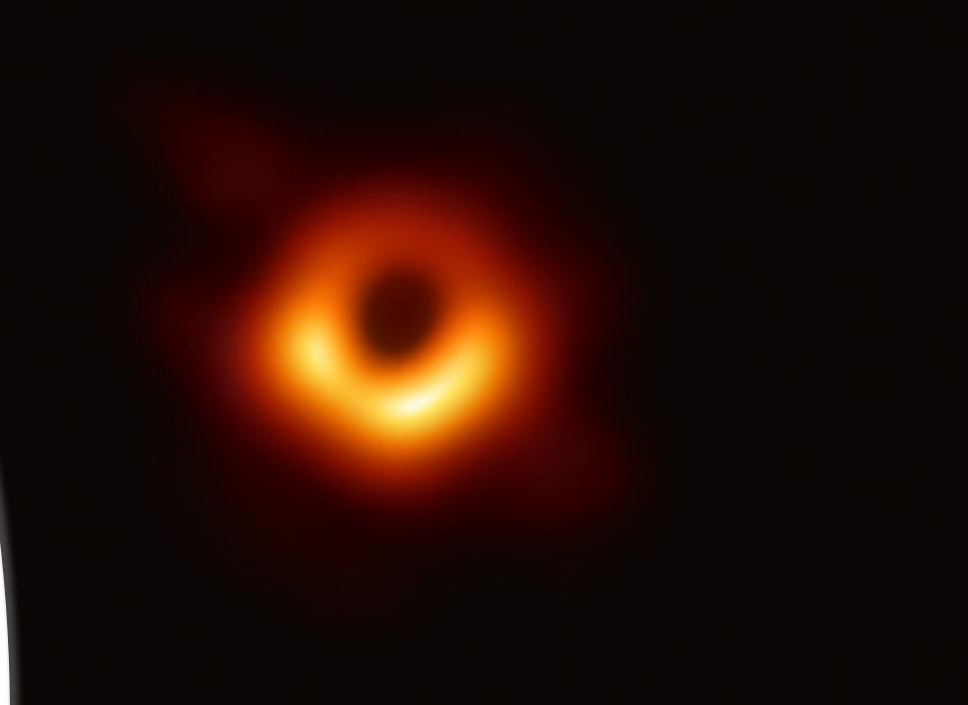
Rayon de Schwarzschild =
horizon des événements



« A l'extérieur d'un trou noir, on peut s'empêcher d'y tomber, mais on ne peut pas s'empêcher de vieillir. Dans un trou noir, on ne vieillit plus, mais on ne peut s'empêcher de tomber ! »

En vrai...les trous noirs supermassifs au cœur des galaxies

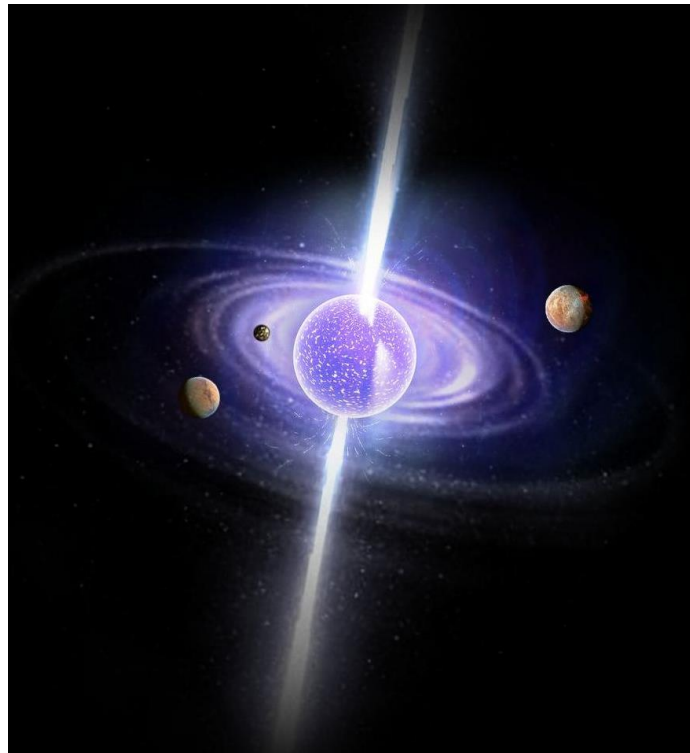
- M87 (2019)
- SgrA*, trou noir central de notre Galaxie (2022)



Le destin des planètes

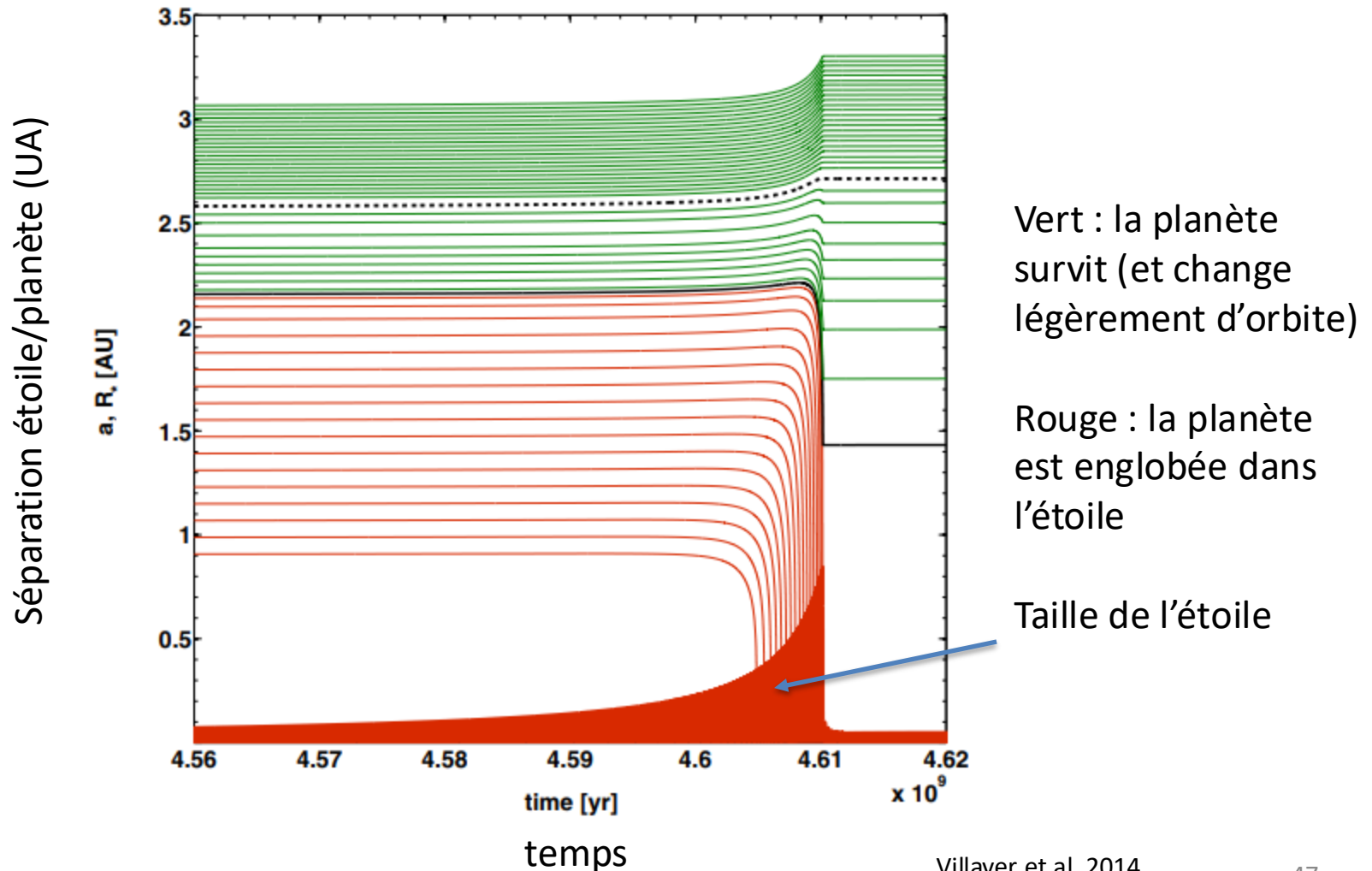
Les planètes ne disparaissent pas (pas toutes) : les planètes autour d'étoiles évoluées existent !

- 1992 : découverte de 3 planètes autour du pulsar PSR B1257+12, très probablement des planètes de seconde génération. Cette découverte « tient » toujours !
- 6 pulsars et une dizaine de naines blanches sont connus pour abriter des planètes (1^{ère} ou 2^{nde} génération, planètes « chtoniennes »)



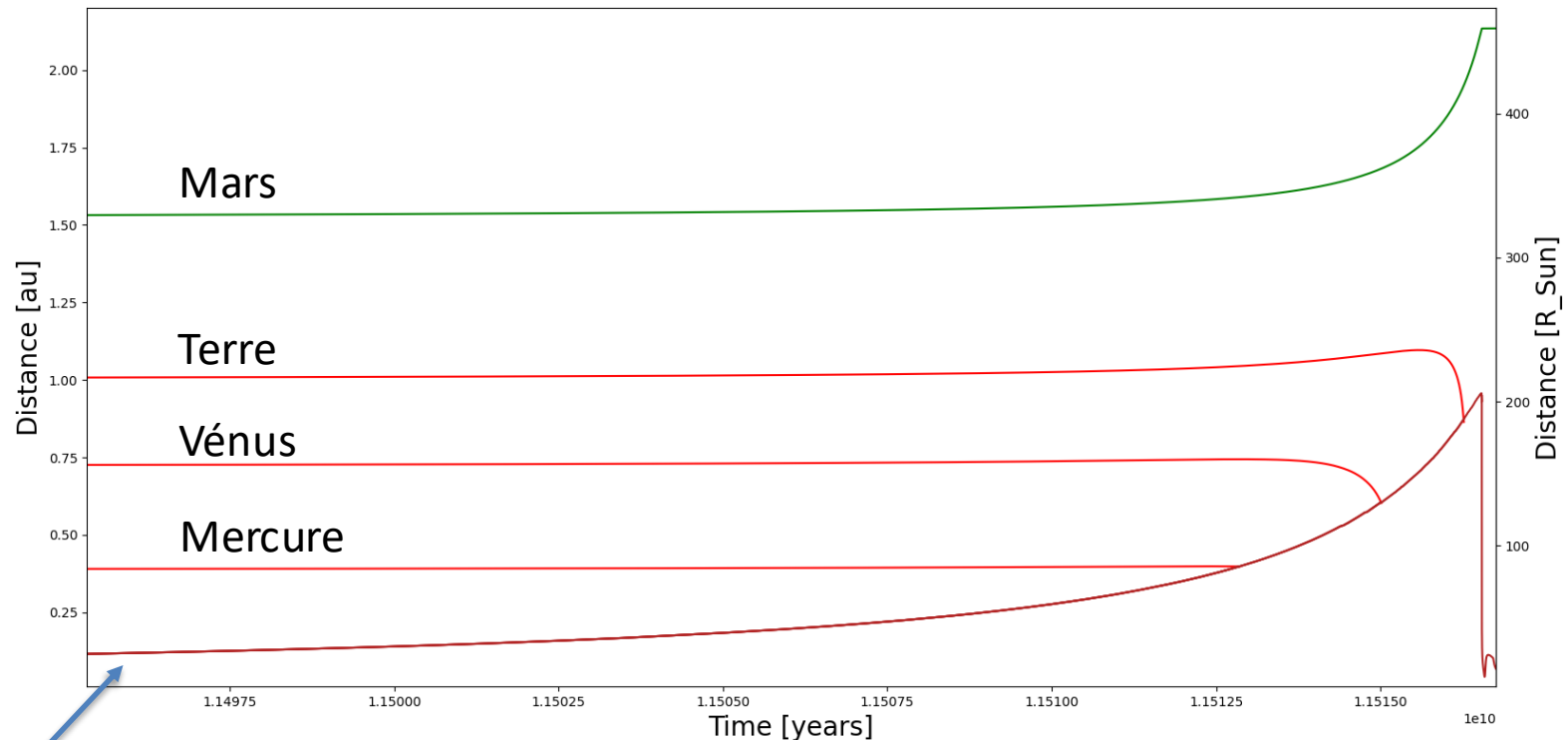
Le destin des planètes

Simulation : planète de 1 masse de Jupiter, avec diverses orbites autour d'une étoile de $1.5 M_{\odot}$ qui évolue sur la 1^{ère} branche des géantes rouges



Le destin de la Terre et ses voisines

Simulation : évolution de la distance au Soleil des quatre planètes internes, lorsque le Soleil gonflera pour devenir une géante rouge



Taille du
Soleil

11.50
milliards
d'années

11.51
milliards
d'années

En résumé

Le Soleil deviendra, d'ici environ 5 milliards d'années, une géante rouge, et ensuite une naine blanche (environ 2 milliards d'années plus tard).

La Terre a un destin plus incertain : *probablement*, elle sera englobée dans le Soleil devenu une géante rouge et y sera détruite. Elle *devrait* être inhabitable depuis longtemps en raison de l'élévation progressive de la luminosité du Soleil. Mais tous ces points sont encore discutés !

