

A l'intérieur des étoiles



Jean-François Le Borgne

Association Marseillaise d'Astronomie (+)

(+)
Astronome, professeur émérite, Université Paul Sabatier, Toulouse
Chercheur associé, Laboratoire d'Astrophysique, Marseille
Groupe Européen d'Observation Stellaire (GEOS)

Qu'est-ce qu'une étoile ?

Une sphère de gaz en **équilibre hydrostatique**
Production interne d'énergie par la **fusion nucléaire**

Caractéristiques des étoiles (unités solaires) :

Température de surface : $3000 \text{ K} < T_{\text{eff}} < 100000 \text{ K}$

Masse : $0.08 M_{\odot} < M < 100 M_{\odot}$

Luminosité : $L < 10^6 L_{\odot}$

Rayon : $R < 1000 R_{\odot}$



Le Soleil :

Rayon : $0.697 \cdot 10^6 \text{ km}$

distance d , diamètre angulaire θ : $R = d \tan \theta/2$

Luminosité : $3.826 \cdot 10^{26} \text{ W}$

flux lumineux mesuré depuis la Terre f :

$$L = 4\pi d^2 f \text{ (loi de Pogson)}$$

Température effective (Temp. de surface) : 5777 K

Relation : $L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$ (émission du corps noir)

Masse : $1.989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$

Troisième loi de Kepler : $GM = 4\pi^2 a^3/P^2$

a : demi-grand axe de l'orbite terrestre,

P : période orbitale de la Terre

Densité moyenne : $\sim 1.4 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

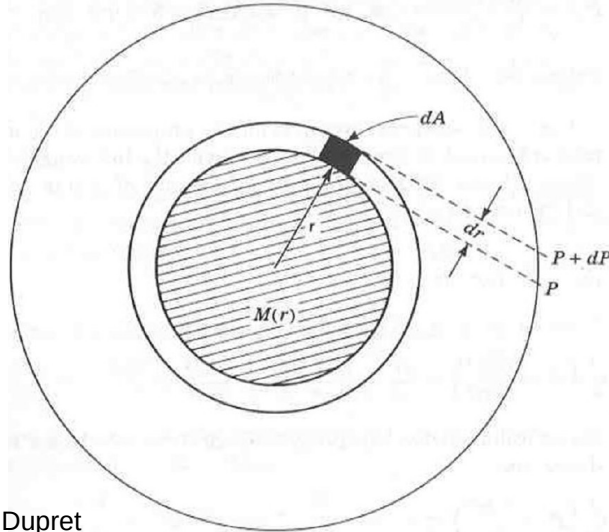
$$\langle \sigma \rangle = 2/4\pi M/R^3$$

Qu'est-ce qu'une étoile ?

Une sphère de gaz en **équilibre hydrostatique**
Production interne d'énergie par la fusion nucléaire

La stabilité d'une étoile est assurée par l'équilibre hydrostatique.

- La gravité : attire le gaz vers le centre et tend à faire s'effondrer l'étoile.
- La pression thermique et radiative (générée par la fusion nucléaire) s'oppose à la gravité en repoussant le gaz vers l'extérieur.



Source : M.A. Dupret

Gravité et pression du gaz :

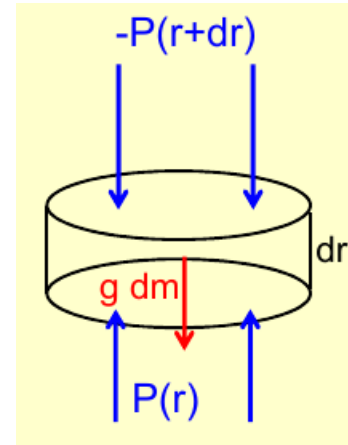
Résultante des forces nulle sur chaque élément de matière (volume infinitésimal, 1 m^2 de section par ex.).

Pression : $-P(r+dr)+P(r)$ (force de surface)

Poids (force gravitationnelle) : $-\rho g dr$ (force de volume)

Équilibre des forces : $\Sigma F = 0$

$$\frac{dP}{dr} = -\rho g = -\rho \frac{Gm}{r^2}$$



Qu'est-ce qu'une étoile ?

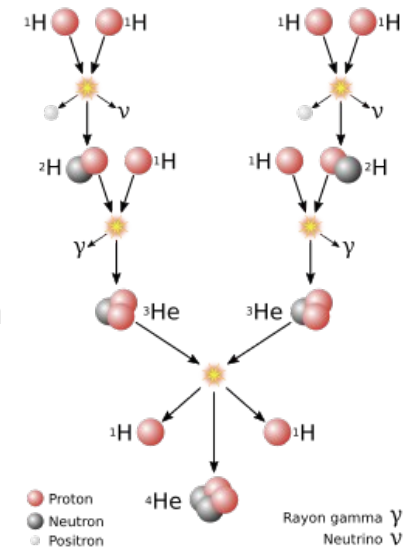
Une sphère de gaz en équilibre hydrostatique
Production interne d'énergie par la **fusion nucléaire**

L'énergie nécessaire pour maintenir la pression interne provient de la fusion nucléaire dans le cœur de l'étoile :

- Fusion de l'hydrogène en hélium via la **chaîne proton-proton** (étoiles de faible masse).
- Fusion de l'hydrogène suivant le **cycle CNO** (Carbone-Azote-Oxygène) puis fusion des éléments plus lourds (C, O, Si...). (étoiles massives)

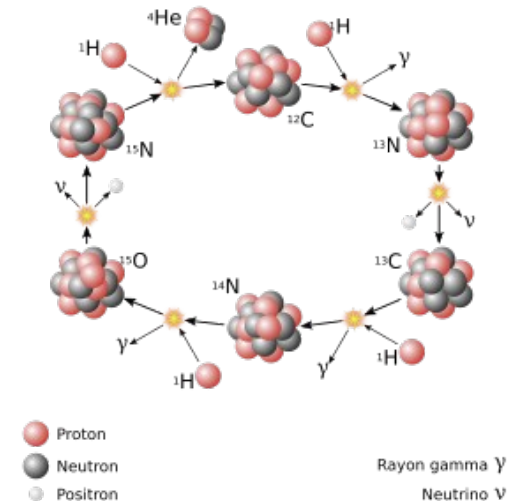
Arthur Eddington, George Gamow, Hans Bethe (1920, 1939)

chaîne proton-proton



Source : wikipedia

cycle CNO



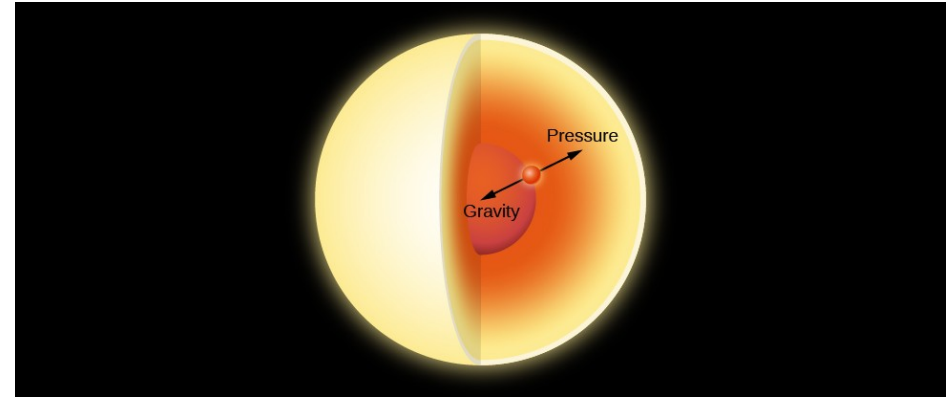
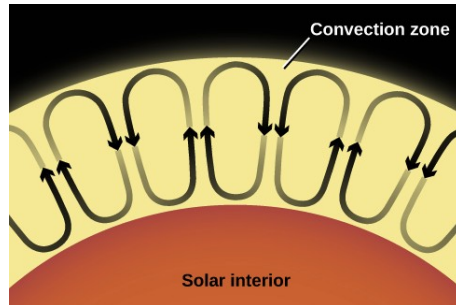
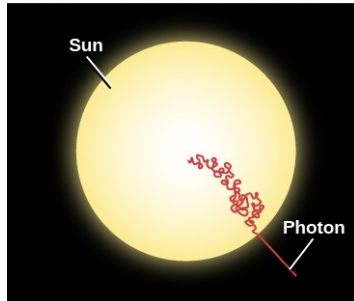
Qu'est-ce qu'une étoile ?

Une sphère de gaz en équilibre hydrostatique
Production interne d'énergie par la fusion nucléaire

Transport de l'énergie

L'énergie produite dans le cœur doit être transportée vers la surface. Deux mécanismes permettent de maintenir un équilibre thermique interne :

- Rayonnement : l'énergie est transportée lentement par photons (zone radiative).
- Convection : l'énergie est transportée par mouvements de gaz (zone convective). (granulation du Soleil)



<https://query.libretexts.org/>

Régulation automatique

mécanisme d'autorégulation qui empêche les déséquilibres :

- Si la pression diminue (ex. baisse de fusion) → la gravité l'emporte, l'étoile se contracte, ce qui augmente la température et la pression, relançant la fusion.
- Si la pression augmente trop (ex. fusion trop rapide) → l'étoile se dilate, ce qui refroidit le cœur, ralentissant la fusion.

<https://query.libretexts.org/>

Des observations à la théorie

L'intérieur des étoiles est inaccessible directement :
Théorie et simulations confrontées aux observations

La connaissance de la structure interne des étoiles repose sur plusieurs méthodes et techniques indirectes

- Les modèles théoriques de la structure stellaire

modèles mathématiques de l'intérieur stellaire tenant compte de la gravité, la pression, la température et la composition chimique en fonction de la distance au centre de l'étoile.

- Les simulations numériques

Simulations sur ordinateurs tenant compte de tous les phénomènes physiques qui se produisent à l'intérieur d'une étoile : la fusion nucléaire, la convection, la diffusion radiative, etc. Les programmes de simulation utilisent les algorithmes découlant des modèles théoriques.

- L'observation de la lumière émise par l'étoile
- L'astérosismologie

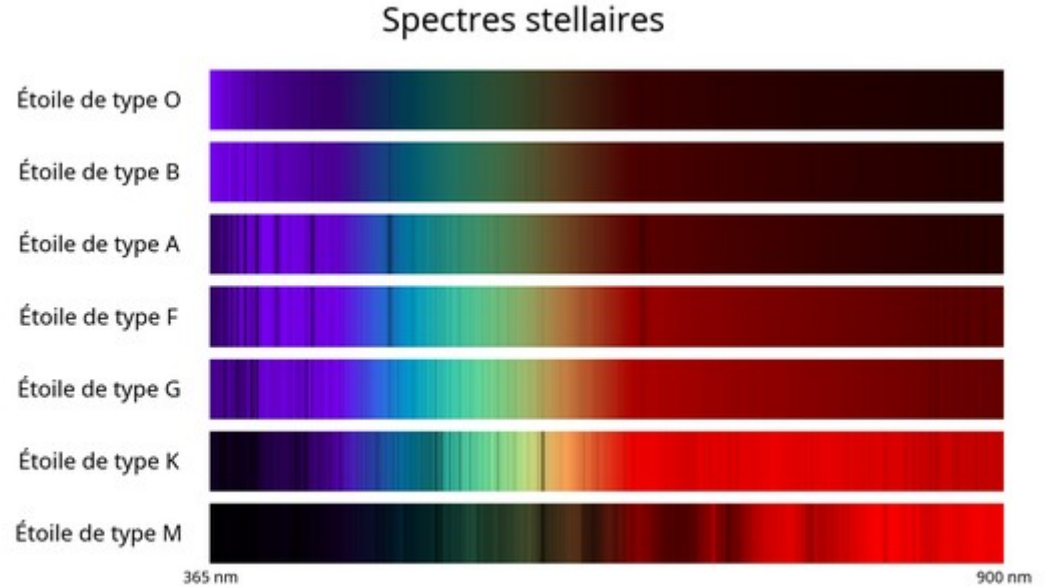
Des observations à la théorie

L'intérieur des étoiles est inaccessible directement :
Théorie et simulations confrontées aux observations

Analyse de la lumière émise par les étoiles : Spectroscopie

La température de la surface (photosphère) peut être mesurée par le spectre de l'étoile.

Les raies spectrales en absorption permettent de déterminer la composition chimique de l'étoile,
En particulier la proportion d'H, He et des autres éléments (« métallicité »)



IAU OAE/SDSS/Niall Deacon.

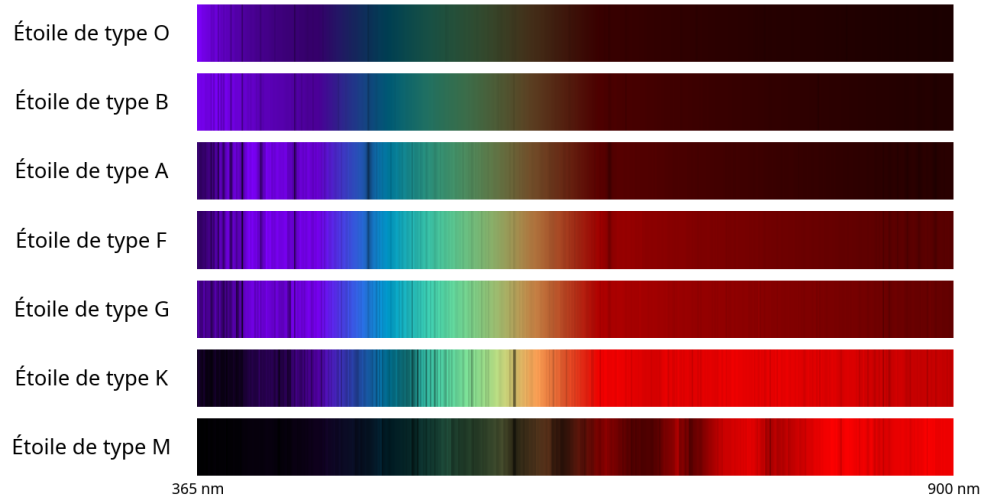
Spectre du Soleil



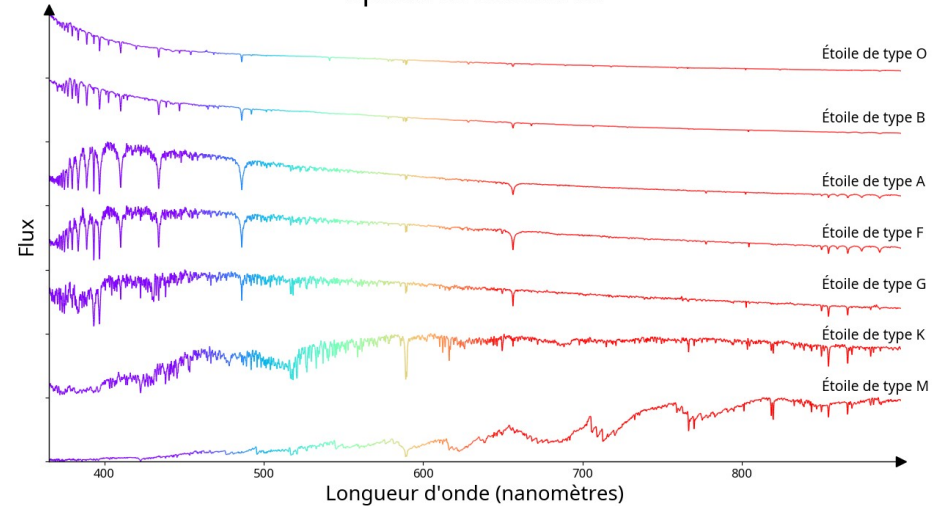
Des observations à la théorie

L'intérieur des étoiles est inaccessible directement :
Théorie et simulations confrontées aux observations

Spectres stellaires



Spectres stellaires



Des observations à la théorie

L'intérieur des étoiles est inaccessible directement :
Théorie et simulations confrontées aux observations

Astérosismologie : Photométrie

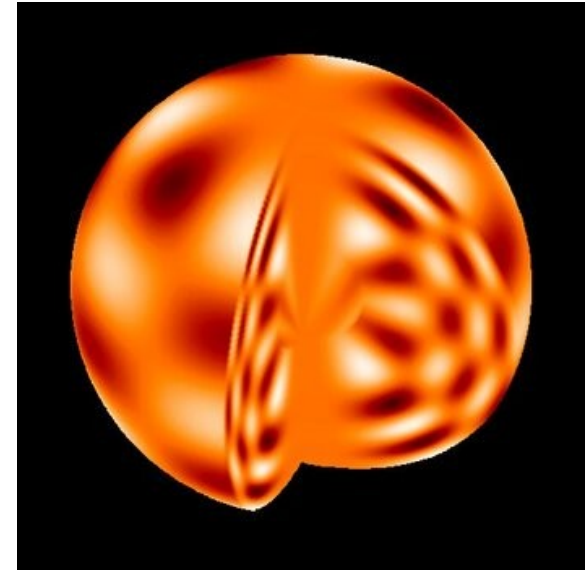
L'astérosismologie est l'étude des oscillations internes des étoiles.

Les étoiles subissent des oscillations internes qui génèrent des ondes acoustiques (ondes de pression). Ces ondes modifient la luminosité ou la forme de l'étoile de manière périodique.

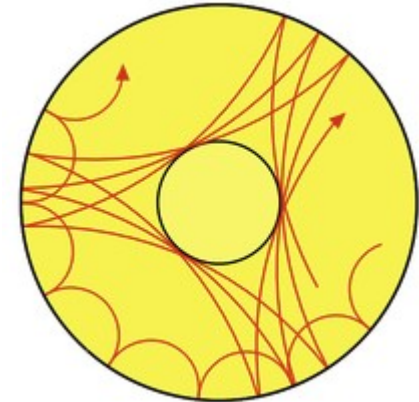
Ces vibrations sont influencées par la composition, la densité et la température des différentes couches de l'étoile.

En analysant les fréquences et les modes de ces oscillations, on peut déduire la structure interne de l'étoile (la profondeur des différentes couches, la température à différents niveaux, etc.).

Cette technique permet de sonder les couches internes des étoiles, jusqu'à des niveaux très profonds.



Crédit : E. Michel, LESIA, Obs. De Paris



Source : wikipedia

Des observations à la théorie

L'intérieur des étoiles est inaccessible directement :
Théorie et simulations confrontées aux observations

Astérosismologie : Photométrie

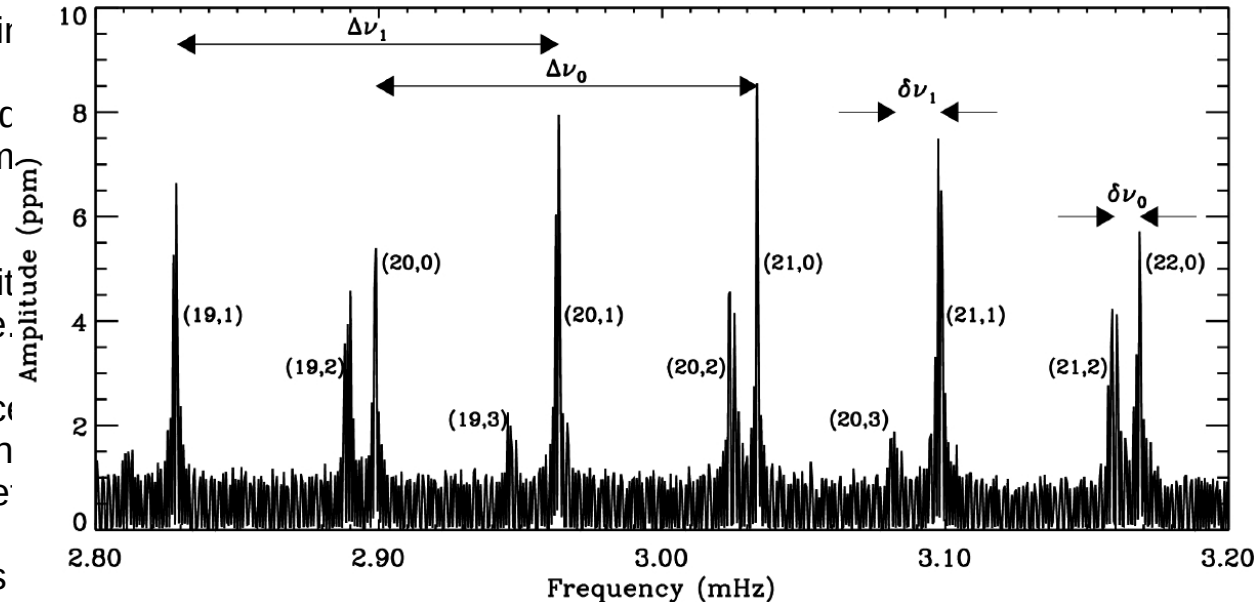
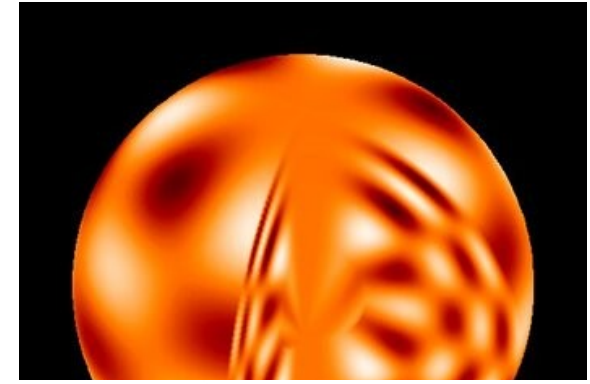
L'astérosismologie est l'étude des oscillations in-

Les étoiles subissent des oscillations internes c
acoustiques (ondes de pression). Ces ondes m
ou la forme de l'étoile de manière périodique.

Ces vibrations sont influencées par la composi
température des différentes couches de l'étoile.

En analysant les fréquences et les modes de c
déduire la structure interne de l'étoile (la profon
couches, la température à différents niveaux, e

Cette technique permet de sonder les couches
jusqu'à des niveaux très profonds.



Source : C. Catala, LESIA, OBS. Paris/Meudon

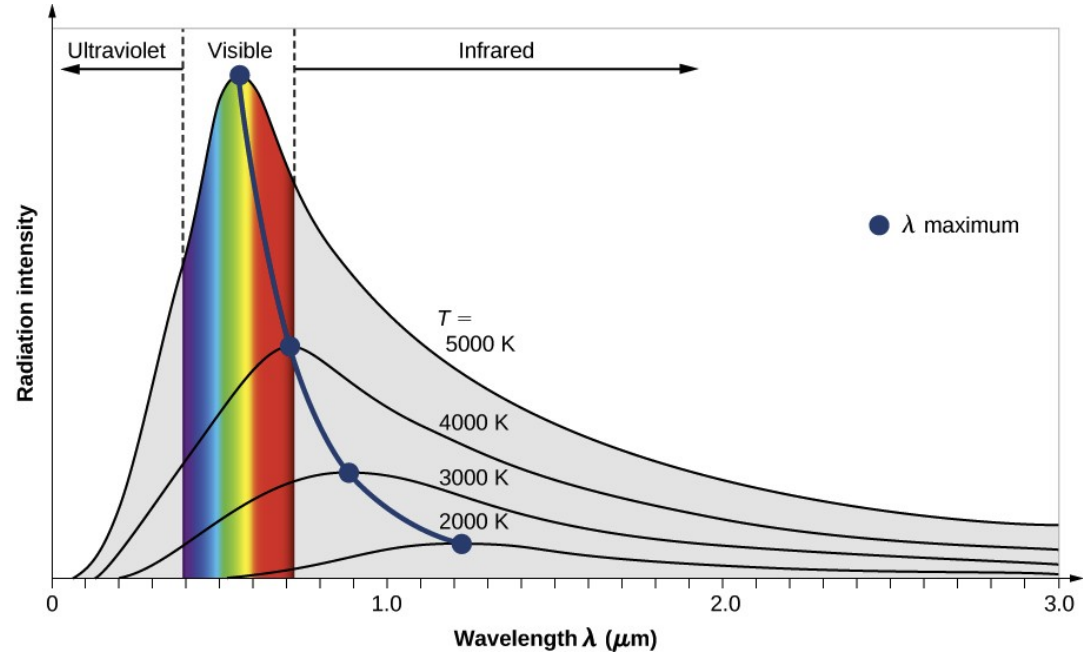
Des observations à la théorie

L'intérieur des étoiles est inaccessible directement :
Théorie et simulations confrontées aux observations

Mesurer la température de surface

Spectre du corps noir

Distribution d'énergie électromagnétique émise par
un objet en fonction de sa température (loi de Planck).



Source : MIT

Température effective T_{eff}

température d'un corps noir idéal qui émettrait la même quantité totale d'énergie par unité de surface que l'étoile elle-même. Elle est définie par la loi de Stefan-Boltzmann : $L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$

L est la luminosité de l'étoile,

R est son rayon,

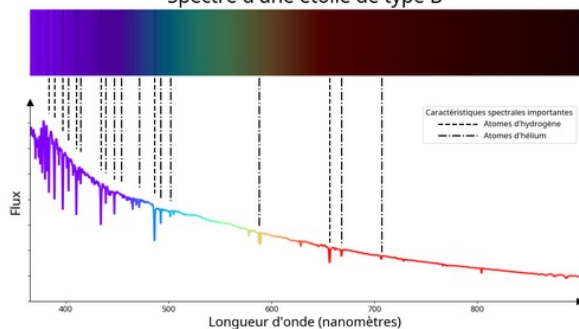
σ est la constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma \approx 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

Des observations à la théorie

L'intérieur des étoiles est inaccessible directement :
Théorie et simulations confrontées aux observations

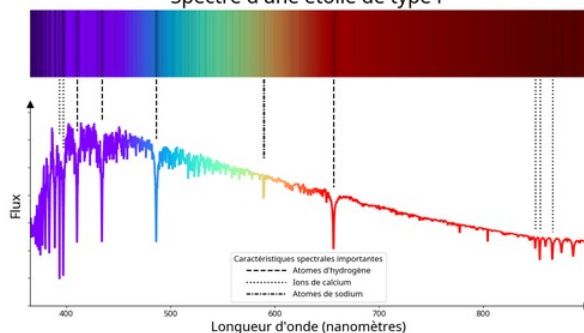
10000 K

Spectre d'une étoile de type B



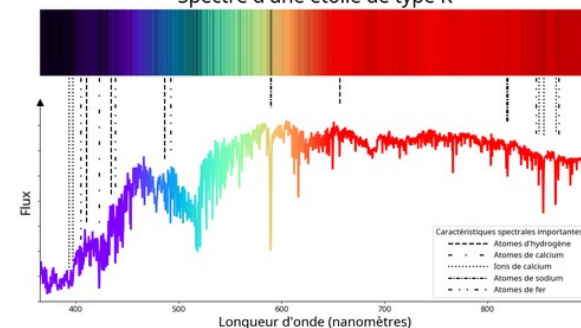
5000 K

Spectre d'une étoile de type F

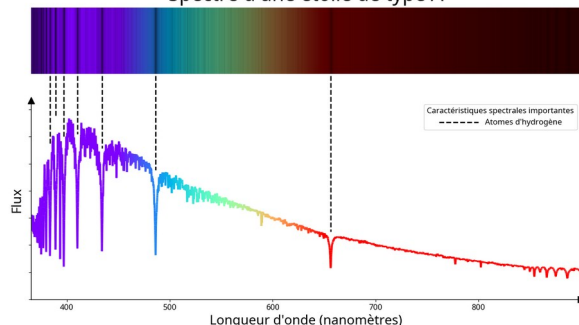


3000 K

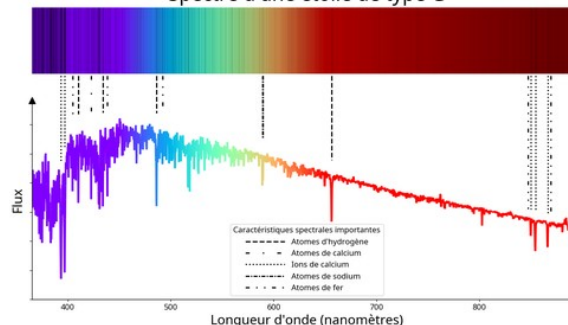
Spectre d'une étoile de type K



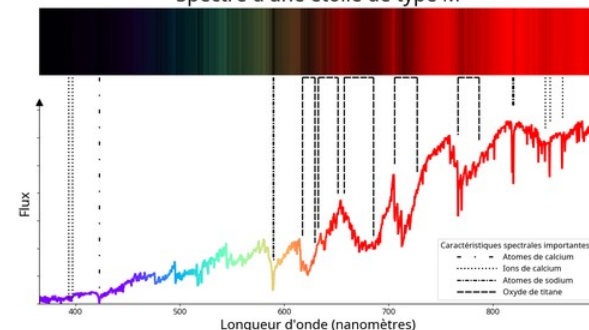
Spectre d'une étoile de type A



Spectre d'une étoile de type G



Spectre d'une étoile de type M



Des observations à la théorie

L'intérieur des étoiles est inaccessible directement :
Théorie et simulations confrontées aux observations

Mesurer la Luminosité

F : puissance rayonnée par unité de surface de l'étoile de rayon R .

Luminosité : $L = 4\pi R^2 F$

A une distance d , la quantité de lumière reçue est $f = L / 4\pi d^2$

Les magnitudes apparentes sont définies en relatif par $m_1 - m_2 = -2.5 \log(f_1/f_2)$

La magnitude absolue M est la luminosité exprimée dans une échelle de magnitude,
Connaissant la distance de l'étoile : $M - m = 5 - 5 \log(d)$ (d en parsecs)

Des observations à la théorie

L'intérieur des étoiles est inaccessible directement :
Théorie et simulations confrontées aux observations

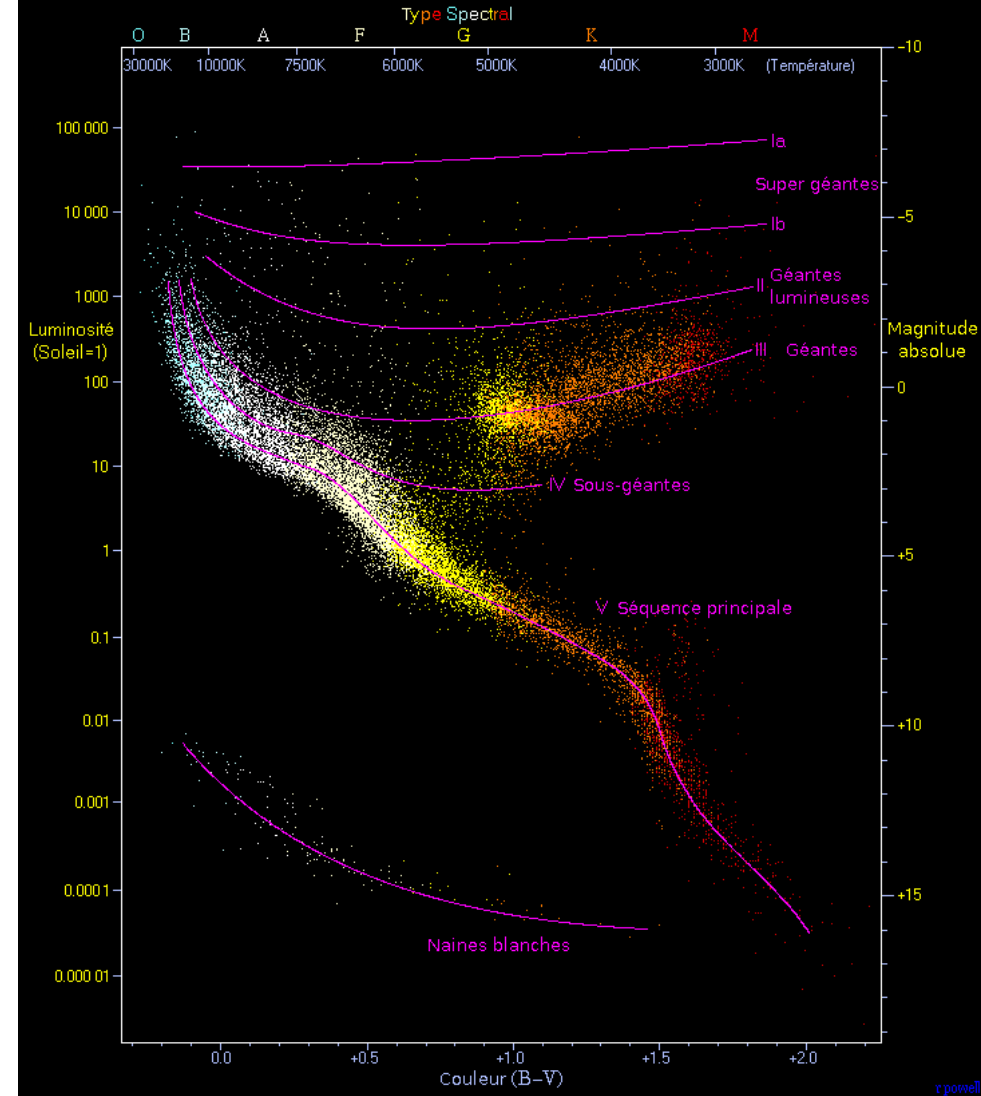
Diagramme Luminosité/Température

(Diag. Hertzsprung-Russell, 1910)

Séquence principale

Géantes rouges

Naines blanches



Source : wikipedia

Des observations à la théorie

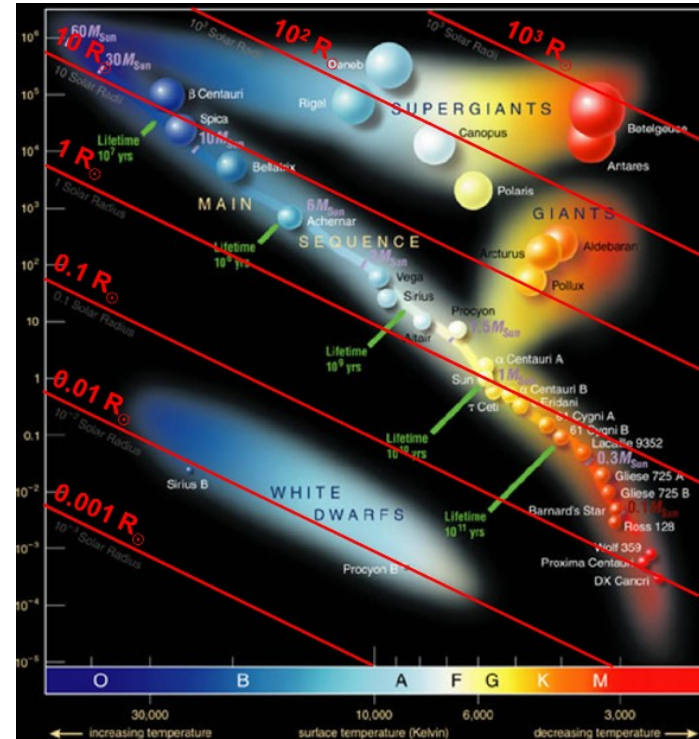
L'intérieur des étoiles est inaccessible directement :
Théorie et simulations confrontées aux observations

Rayon des étoiles

Le rayon des étoiles est relié à leur luminosité et à leur température par la loi de Stefan-Boltzmann :

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$$

Dans le diagramme HR : $\log(L) \propto \log(R) + \log(T)$



Source : M.A. Dupret

Des observations à la théorie

L'intérieur des étoiles est inaccessible directement :
Théorie et simulations confrontées aux observations

Masse des étoiles

On ne peut mesurer directement la masse des étoiles que par la détermination des paramètres orbitaux de systèmes binaires.

Grace à la troisième loi de Kepler :

$$M_1 + M_2 = \frac{4\pi^2 a^3}{GP^2}$$

L'alternative est d'utiliser l'empirique relation Masse-Luminosité :

$$L \approx M^n$$

n vaut environ 3.5 pour les étoiles de la séquence principale :

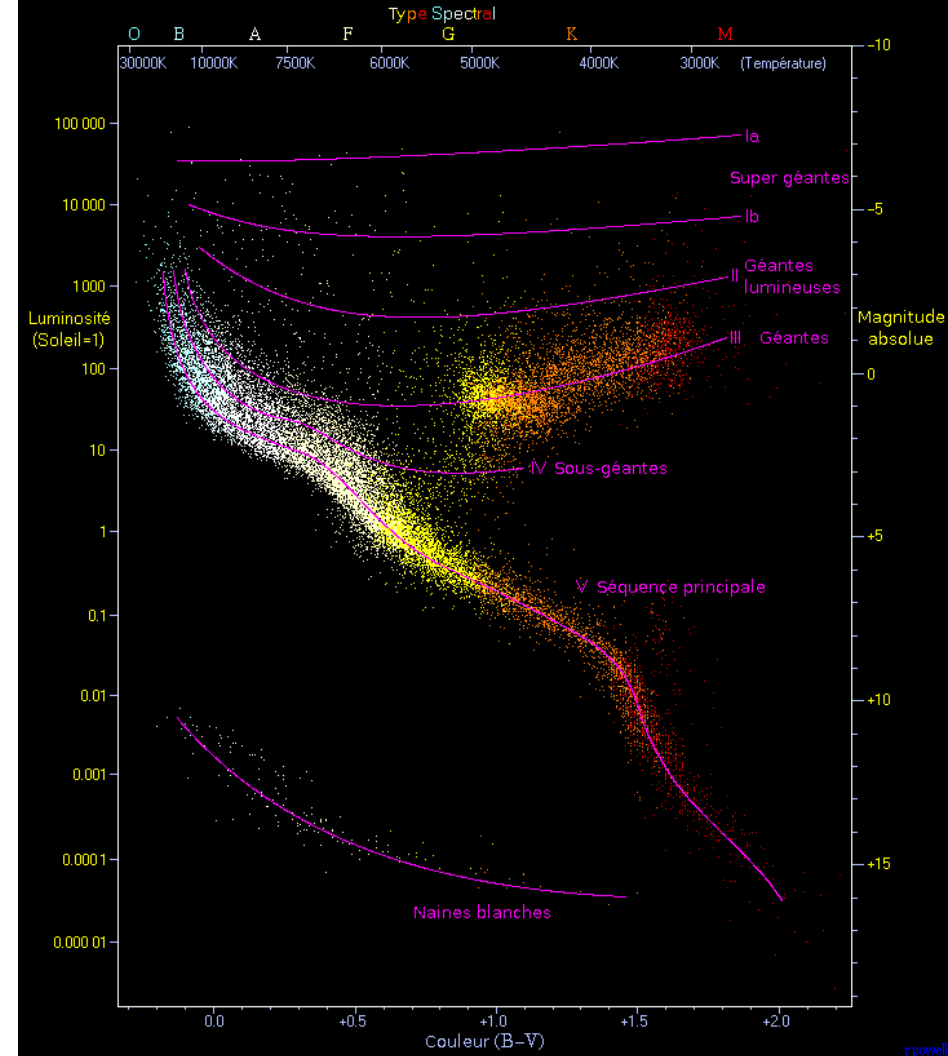
$$L=0.1 L_{\odot} \quad M= 0.5 M_{\odot}$$

$$L=1 L_{\odot} \quad M= 1 M_{\odot}$$

$$L=10 L_{\odot} \quad M= 1.8 M_{\odot}$$

$$L=100 L_{\odot} \quad M= 3.7 M_{\odot}$$

$$L=1000 L_{\odot} \quad M= 7.2 M_{\odot}$$



Source : wikipedia

Modèles d'intérieurs stellaires

Les ingrédients de la recette

Équations de structure :

- Conservation de la masse
- Équilibre hydrostatique
- Transfert d'énergie, par radiation et par convection
- Conservation de l'énergie

Conditions aux limites :

Au centre :

$$M=0$$

$$L=0$$

A la surface :

$$T = T_{\text{eff}}$$

$$P = 0$$

Équations d'état et composition chimique :

Par exemple équation du gaz parfait, $P = n k T$

+ pression de radiation : $P = n k T + 1/3 a T^4$

Mais c'est plus compliqué ... 😊

Paramètre important : l'opacité

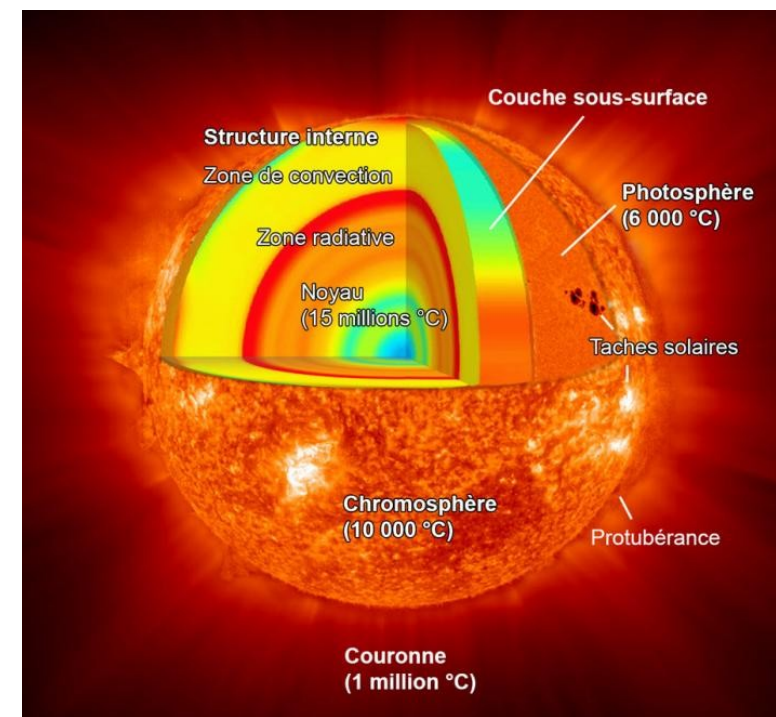
Modèles d'intérieurs stellaires

Résultats des modèles : Les couches internes

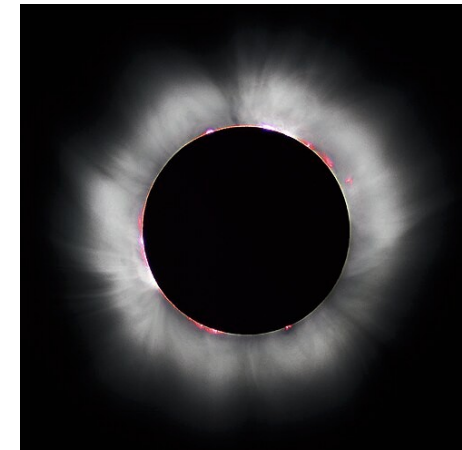
La structure interne des étoiles varie en fonction de la masse de l'étoile

Elle peut être en plusieurs couches distinctes, allant du noyau central vers la surface.

- **Le noyau**
région centrale de l'étoile, où se produit la fusion nucléaire
- **La zone radiative**
l'énergie produite par la fusion nucléaire dans le noyau se déplace vers l'extérieur sous forme de rayonnement. l'énergie est transférée lentement vers les couches extérieures par radiation.
- **La zone convective**
l'énergie est transférée par convection. La convection se produit lorsque la matière chaude, moins dense, monte, tandis que la matière plus froide, plus dense, descend.
- **La photosphère**
La photosphère est la surface visible de l'étoile. Au dessus de cette « surface », le milieu devient transparent (opacité faible)
- **La chromosphère et la couronne**
Couches moins denses et plus chaudes que la photosphère. La chromosphère est une fine couche de gaz chaud. La couronne est la couche la plus extérieure.



Crédit : NASA

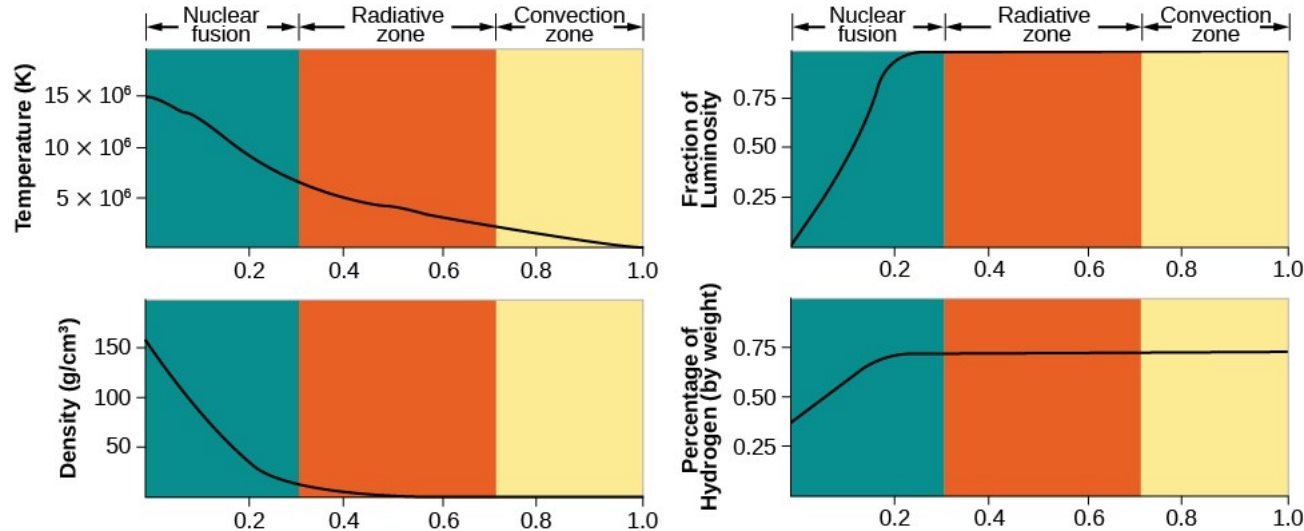
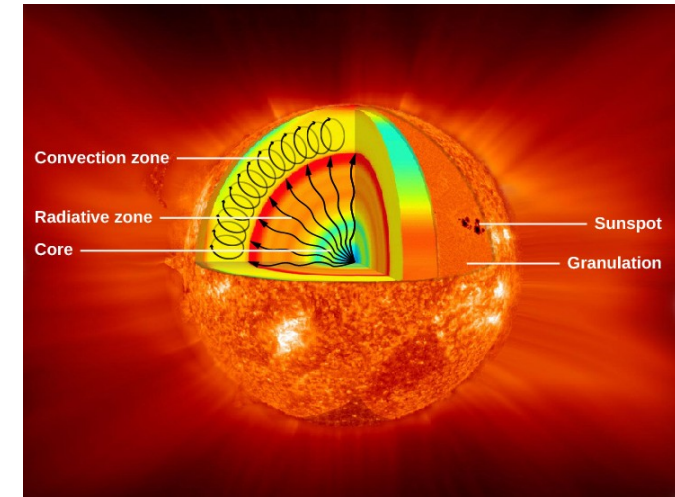


Source : wikipedia

Modèles d'intérieurs stellaires

Résultats des modèles : Étoiles de $1 M_{\odot}$ de la séquence principale

- Cœur (~25 % du rayon) : Zone où l'hydrogène fusionne en hélium par la chaîne proton-proton. C'est une zone radiative.
- Zone radiative (~25-70 % du rayon) : l'énergie est transportée par rayonnement.
- Zone convective externe (~70-100 % du rayon) : l'énergie est transportée par convection, permettant le mélange des gaz et la redistribution de la chaleur.



Modèles d'intérieurs stellaires

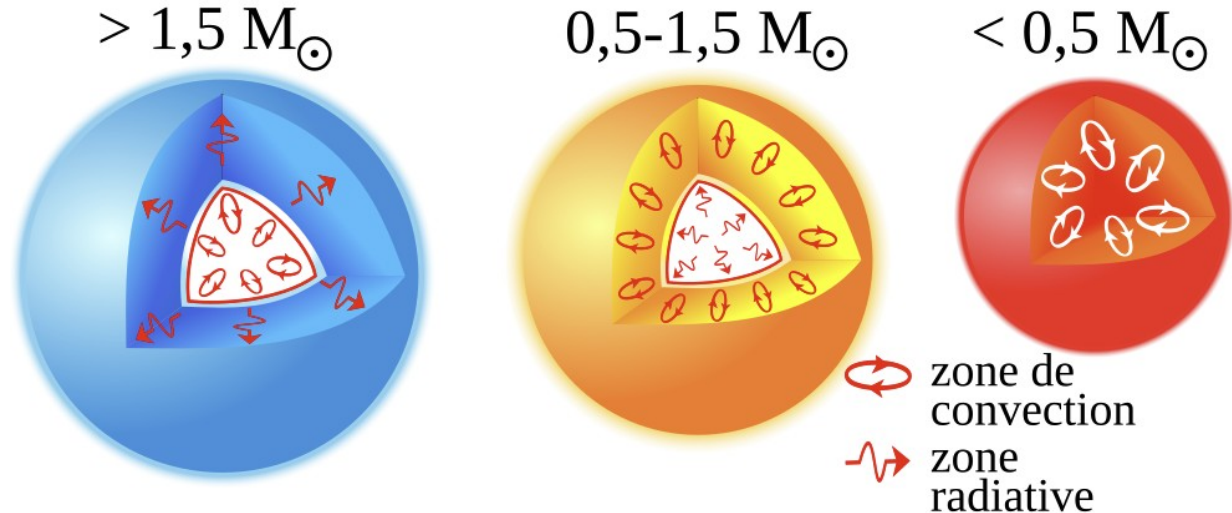
Résultats des modèles : Étoiles de la séquence principale

Une étoile de $0.5 M_{\odot}$ est une étoile de faible masse, généralement une naine rouge de type spectral M.

Elle passe(ra) des centaines de milliards d'années sur la séquence principale, brûlant l'hydrogène en hélium via la chaîne proton-proton.

Complètement convective du centre à la surface. Pas de zone radiative.

Température effective ~ 3000 K



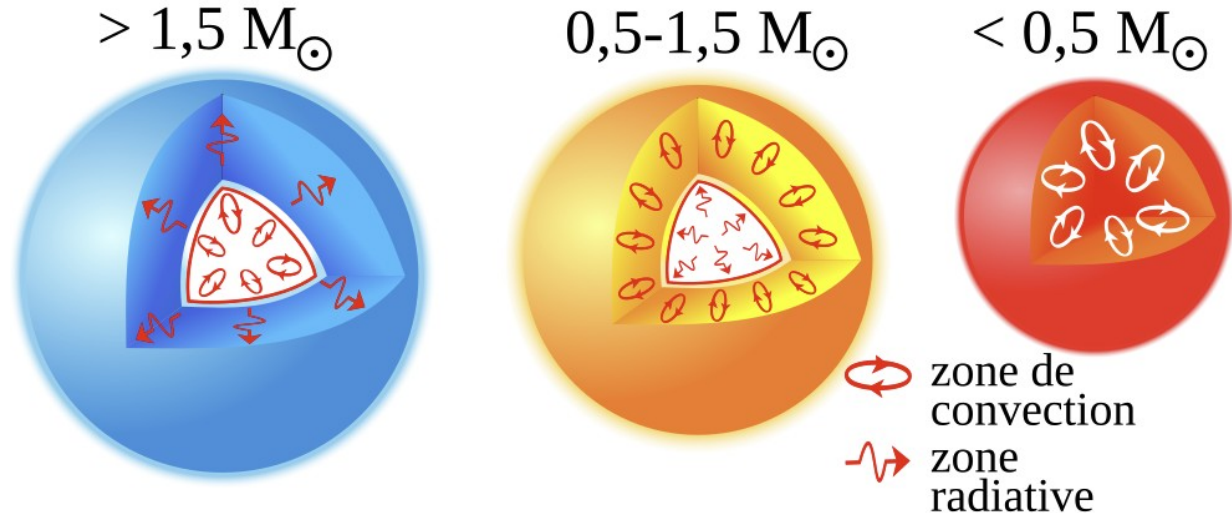
Modèles d'intérieurs stellaires

Résultats des modèles : Étoiles de la séquence principale

Une étoile de $15 M_{\odot}$ est une étoile massive, $10^4 L_{\odot}$, $T_{\text{eff}} \approx 20000 \text{ K}$, type spectral B ou O.

l'étoile brûle son hydrogène via le cycle CNO.

- Cœur convectif (~30 % du rayon) : cœur en fusion convectif en raison du cycle CNO, qui crée un fort gradient thermique.
- Zone radiative externe : Le transport d'énergie se fait principalement par rayonnement entre le cœur et la surface.

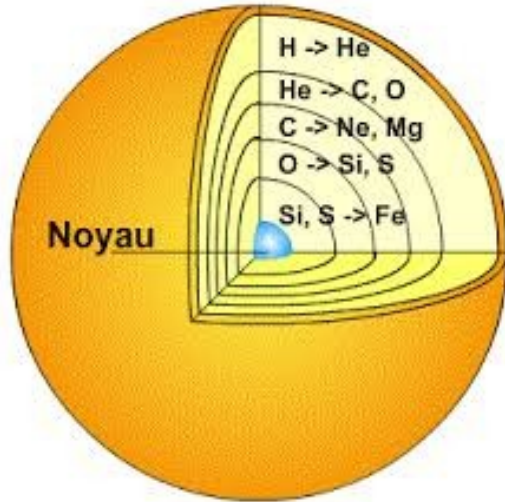


Modèles d'intérieurs stellaires

Résultats des modèles : Étoiles de la séquence principale

Une étoile de $15 M_{\odot}$ est une étoile massive, $10^4 L_{\odot}$, $T_{\text{eff}} \approx 20000 \text{ K}$, type spectral B ou O.

Fin de vie : supernova



État	Température (K)	Densité (g/cm ³)	Durée
Fusion de l'Hydrogène	4.10^7	5	7.10^6 ans
Fusion de l'Hélium	2.10^8	700	5.10^5 ans
Fusion du Carbone	6.10^8	2.10^5	600 ans
Fusion de l'Oxygène	$1,5.10^9$	10^7	6 mois
Fusion du Silicium	$2,7.10^9$	3.10^7	1 jour
Effondrement du cœur	$5,4.10^9$	3.10^9	1/4 seconde
Rebond	$1,3.10^{10}$	4.10^{14}	qqms millisecondes
Explosive	environ 10^9	variable	10 secondes

<https://media4.obspm.fr/>

Sources

« Stellar structure », Marc-Antoine Dupret, cours à l'université de Liège.

<https://www.astro.uliege.be/~dupret/cours-structurevol1-ang2.pdf>

The IAU Office of Astronomy for Education <https://www.astro4edu.org/>

Base de données solaire, BASS2000, Observatoire de Paris-Meudon <https://bass2000.obspm.fr/home.php>

Wikipedia

Chat-gpt

Bibliographie :

« *Principes fondamentaux de structure stellaire* », Manuel Forestini, 1999, Editions scientifiques GB - Gordon and Breach

« *Stellar Interiors - Physical Principles, Structure* », and Evolution Carl J. Hansen, Steven D. Kawaler, 1990, Springer-Verlag

« *Stellar Structure and Evolution* », Rudolf Kippenhahn, Alfred Weigert , 1990, Springer-Verlag

« *Structure and Evolution of the Stars* », Martin Schwarzschild, 1958, Dover Books