

# AAP – Astro Pratique

## Les Etoiles

- Qu'est ce que c'est ?
- Comment ça marche ?
- Comme ça évolue ?

# Les premières explications

Une étoile est un énorme boule de gaz chaud, très chaud même, qui rayonne de l'énergie lumineuse grâce aux réactions nucléaires qui surviennent en son cœur.

Elle naît au sein d'un nuage gazeux d'hydrogène (en immense majorité) qui se contracte sous son propre poids.

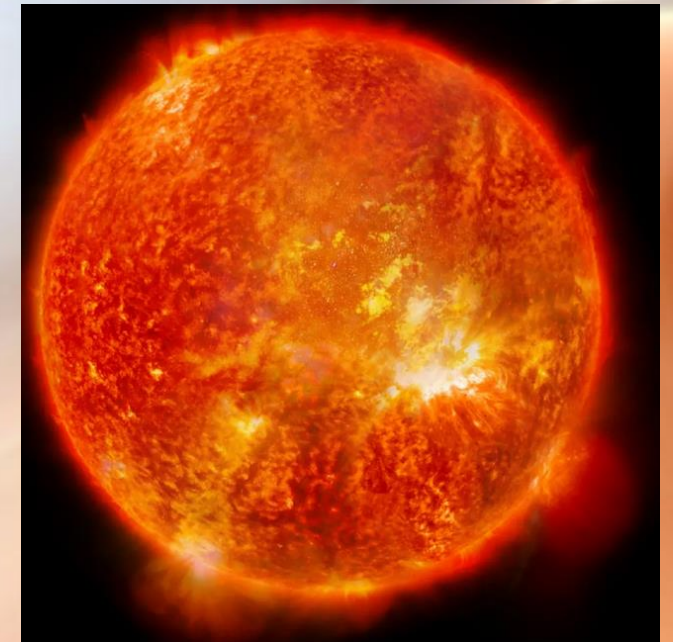
En son cœur, la pression et la température augment sous l'effet de cette contraction. Quand la température atteint 10 millions de degrés, les réaction nucléaires démarrent : l'étoile est née. Elle va produire de l'énergie sous forme de rayonnement lumineux.

Les réactions nucléaires modifient progressivement sa composition.

Quand son carburant principal (l'hydrogène) est consommé la vie de l'étoile se termine : l'étoile meurt

Le soleil est notre étoile : il vit depuis 4,6 Milliards d'année et devrait encore vivre à peu près autant.

La nuit, à l'œil nu, on compte environ 6000 étoiles sur l'ensemble du ciel (y compris le ciel austral).



**Le soleil : notre étoile**

# Des étoiles de toutes les couleurs

Il suffit de lever les yeux vers les étoiles pour percevoir des différences de couleurs. C'est encore plus visible avec un télescope et en photographie.

En regardant un arc en ciel, on peut voir que la lumière du soleil est composée de plusieurs couleurs. Les différences de couleur des étoiles s'expliquent par des intensités variables de ces différentes couleurs : une étoile peut rayonner très fort dans le bleu, une autre plus fort dans le rouge.

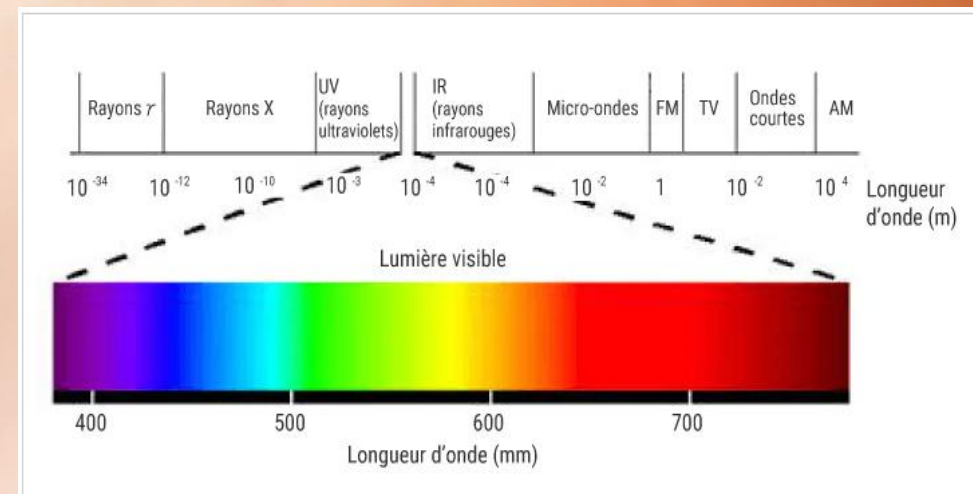
La couleur dépend de la température de l'étoile. Les étoiles rougeâtres sont les plus froides et les étoiles bleutées les plus chaudes (le contraire des robinets d'eau chaude et d'eau froide !).

Chacune des couleurs est caractérisée par ce qu'on appelle une longueur d'onde (c'est une distance qui correspond à la longueur de l'onde lumineuse).

On appelle spectre une décomposition de la lumière dans les différentes longueurs d'onde donc dans les différentes couleurs.

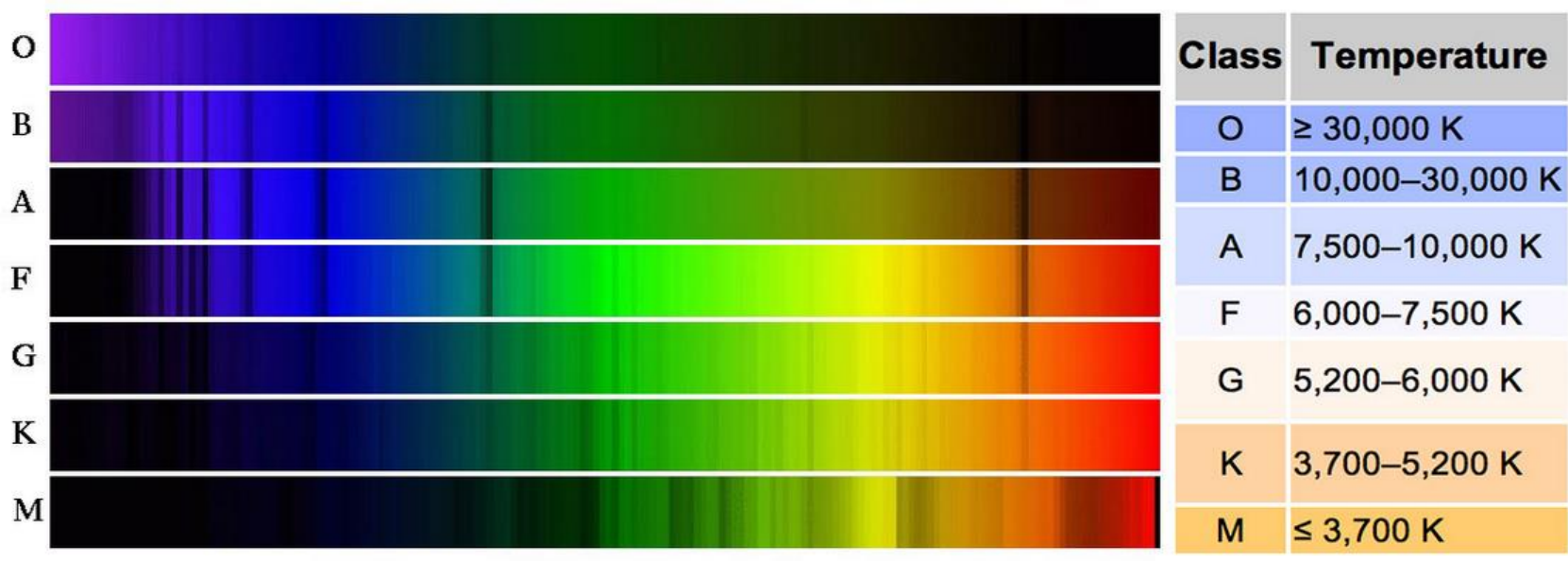


Aldébaran et les Hyades



# Les types spectraux des étoiles

L'observation des spectres d'étoiles a permis de les classer. On y observe des différences d'intensité dans les couleurs mais aussi des raies sombres (les raies d'absorption). Ces raies révèlent la composition de la surface de l'étoile : les atomes s'y trouvant captent certaines longueurs d'onde autrement dit certaines couleurs.



Les différents types spectraux :

**OBAFGKM**

Moyen mnémotechnique :  
« Oh Be A Fine Girl Kiss Me ! »

Plusieurs nombres complètent la lettre pour définir des sous-types ayant de faibles différences  
Enfin un chiffre romain de I à V caractérise la luminosité de l'étoile (V la moins lumineuse)

Pour le Soleil : G2V - Pour Bételgeuse : M2I – Pour Véga : A0V – Pour Rigel : B8I

# Les mouvements des étoiles

Toutes les étoiles sont en mouvement : l'immobilité n'existe pas dans l'Univers !

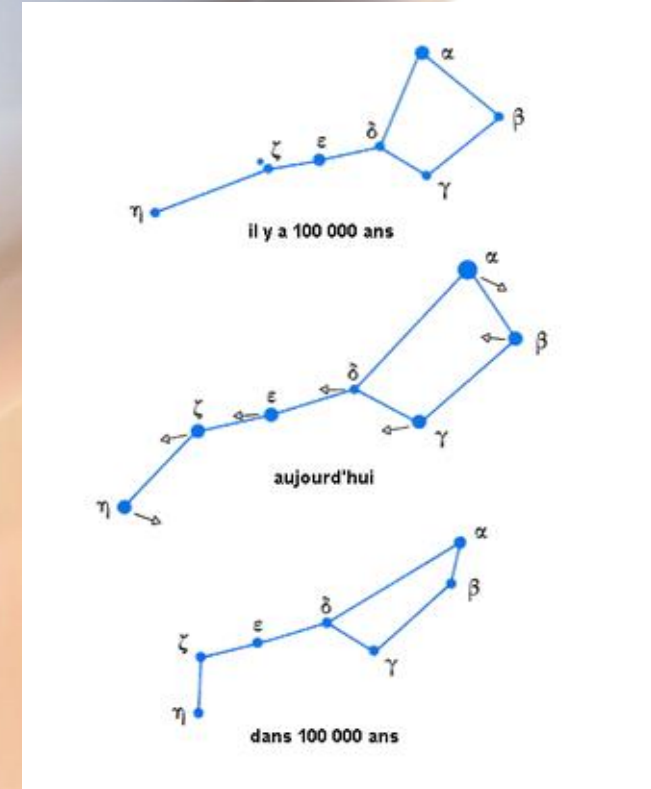
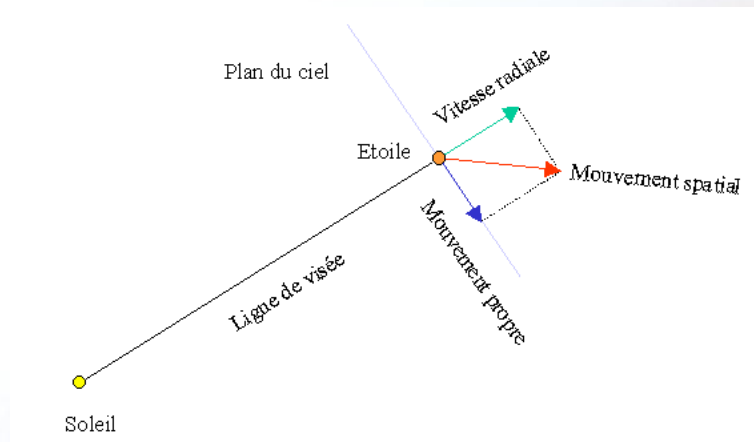
Dans un espace en 3D, le mouvement des étoiles peut être décomposé en 2 :

Le **mouvement propre** est le déplacement sur la voute céleste. Deux composantes le définissent :

- le MP en ascension droite (équivalent des longitudes sur la terre)
- le mouvement propre en déclinaison (équivalent aux latitudes sur la terre)

La **vitesse radiale** est le déplacement dans la ligne de visée.

- Il peut s'agir d'un éloignement ou d'un rapprochement



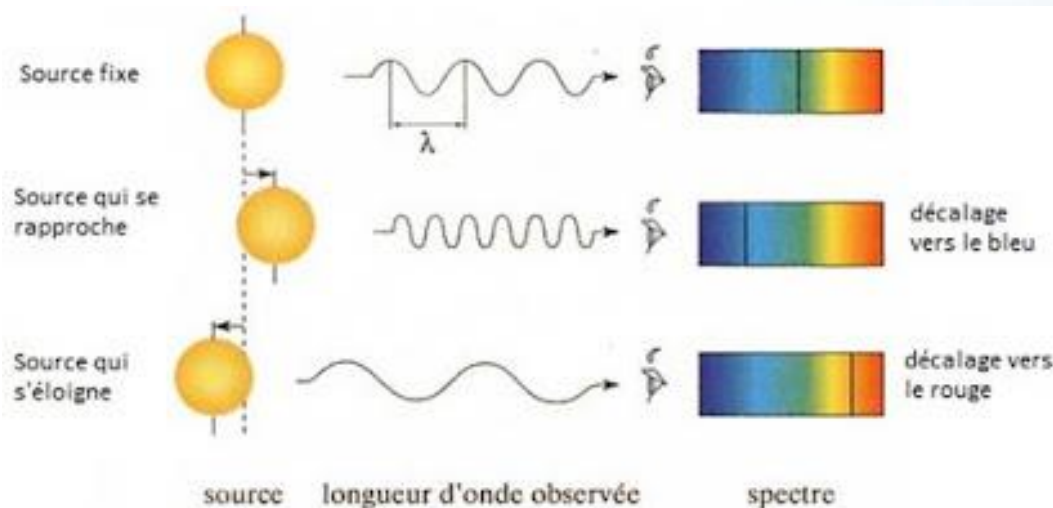
Changement de forme de la Grande Ourse compte tenu des mouvements propres

# La mesure du mouvement des étoiles

**Mesurer les mouvements propres** est assez simple dans le principe. Il suffit de faire des mesures espacées dans le temps des positions d'une étoile. La difficulté réside dans le fait que ce mouvement est faible et qu'il faut donc des mesures de position d'une grande précision (ou attendre très très longtemps !)

La sonde spatiale Gaia a fourni en 2016 les mouvement propres de plusieurs millions d'étoiles, avec une précision inégalée. La connaissance des mouvements propres a beaucoup progressé !

**Mesurer les vitesses radiales** est plus compliqué. Il faut obtenir un spectre à haute résolution de l'étoile. Le décalage des raies du spectre vers le bleu ou vers le rouge nous donne directement la vitesse radiale, grâce à **l'effet Doppler Fizeau**.



Si **l'étoile s'éloigne** de nous le décalage est **vers le rouge**.

Toutes les étoiles qui s'éloignent nous paraissent plus rouges.

Si **l'étoile se rapproche** le décalage est vers le bleu.

Toutes les étoiles qui s'éloignent nous paraissent plus bleues.

# La mesure de la luminosité des étoiles

Il suffit de lever les yeux pour voir que toutes les étoiles ne brillent pas avec la même luminosité.

Deux paramètres interviennent :

- La luminosité propre de l'étoile,
- La distance à laquelle elle se trouve.

L'unité de mesure de la luminosité s'appelle **la magnitude**.

Cette mesure découle de celle adoptée dans l'antiquité qui parlaient de grandeur. Une étoile de 1<sup>ère</sup> grandeur est plus brillante qu'une étoile de 2<sup>ème</sup> grandeur, etc... jusqu'à la sixième grandeur (étoiles les plus faibles visibles à l'œil nu).

Les magnitudes découlent de cette échelle... en allant au-delà de 6 (sans limite haute)

- Une étoile de magnitude  $m$  est 2,5 fois plus lumineuse qu'une étoile de magnitude  $m+1$
- Une étoile de magnitude  $m$  est 100 fois plus lumineuse qu'une étoile de magnitude  $m+5$

La distance intervient aussi bien sûr. La **magnitude absolue** est la magnitude d'une étoile quand elle se situe à une distance de 1 Parsec (ou 3,26 année lumière)

La **magnitude apparente** est celle qui est perçue par l'observateur. Elle est supérieure à la magnitude absolue pour toutes les étoiles distantes de plus d'un Parsec (ce qui est d'ailleurs la cas de toutes les étoiles sauf le soleil, à moins d'imaginer être embarqué dans un voyage interstellaire ce qui n'est pas demain la veille 😊).

# Le diagramme HR : une classification des étoiles

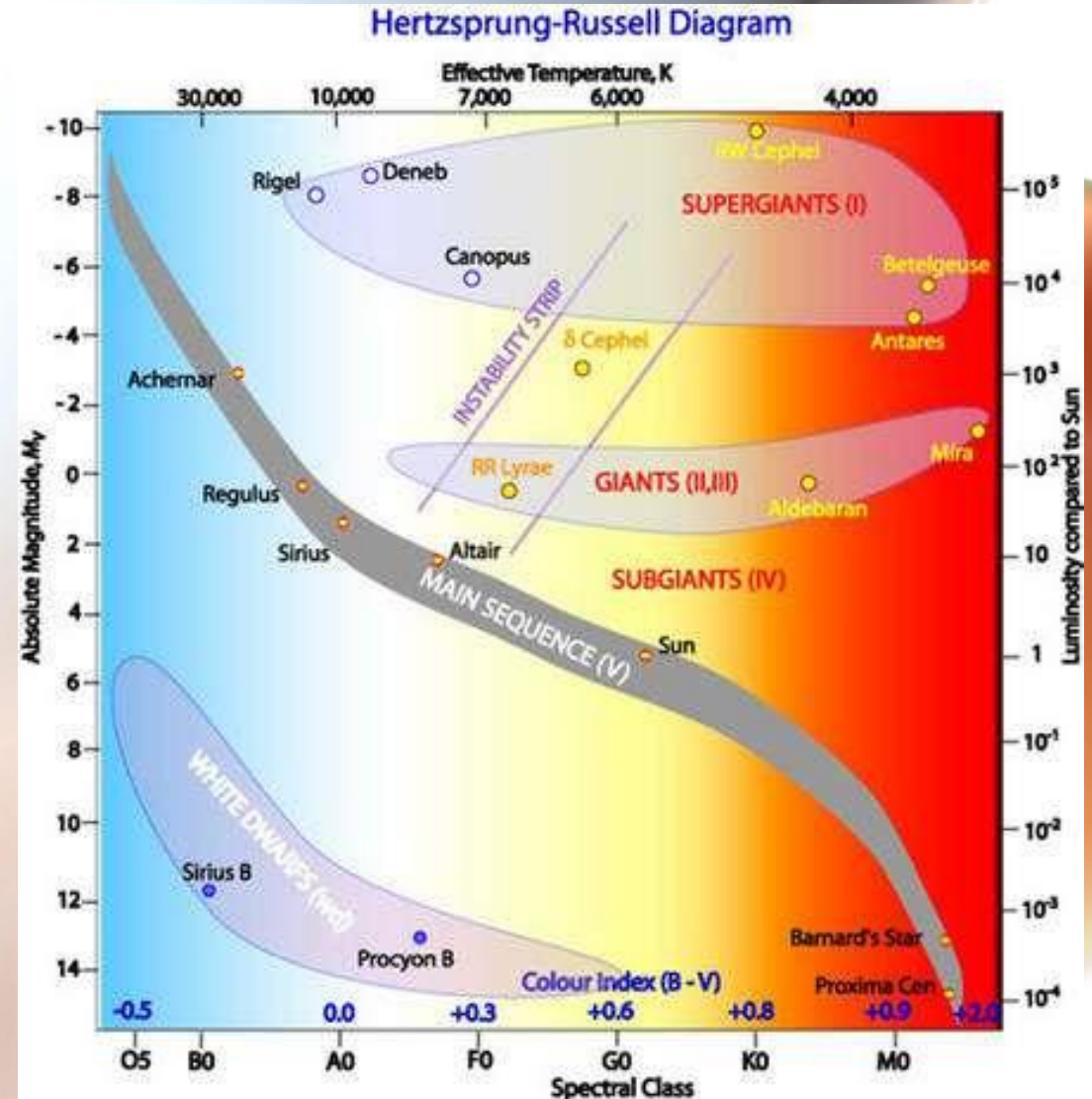
En positionnant les étoiles dans un graphique selon leur luminosité et leur type spectral, on s'aperçoit qu'elles ne se répartissent pas au hasard :

- La plupart occupent une bande dite séquence principale.
- Une minorité d'étoiles occupent d'autres positions sur le diagramme.

C'est le **diagramme d'Hertzsprung-Russell** ou **HR**.

Les missions astrométriques Hipparcos et Gaia ont permis de grandement préciser les distances et, par là, les magnitudes absolues des étoiles.

Les étoiles « normales » passent 90% de leur vie dans la séquence principale. Cette phase de vie est très stable, elle correspond à la transformation de l'hydrogène en hélium.





# Le diagramme HR et le rayon des étoiles

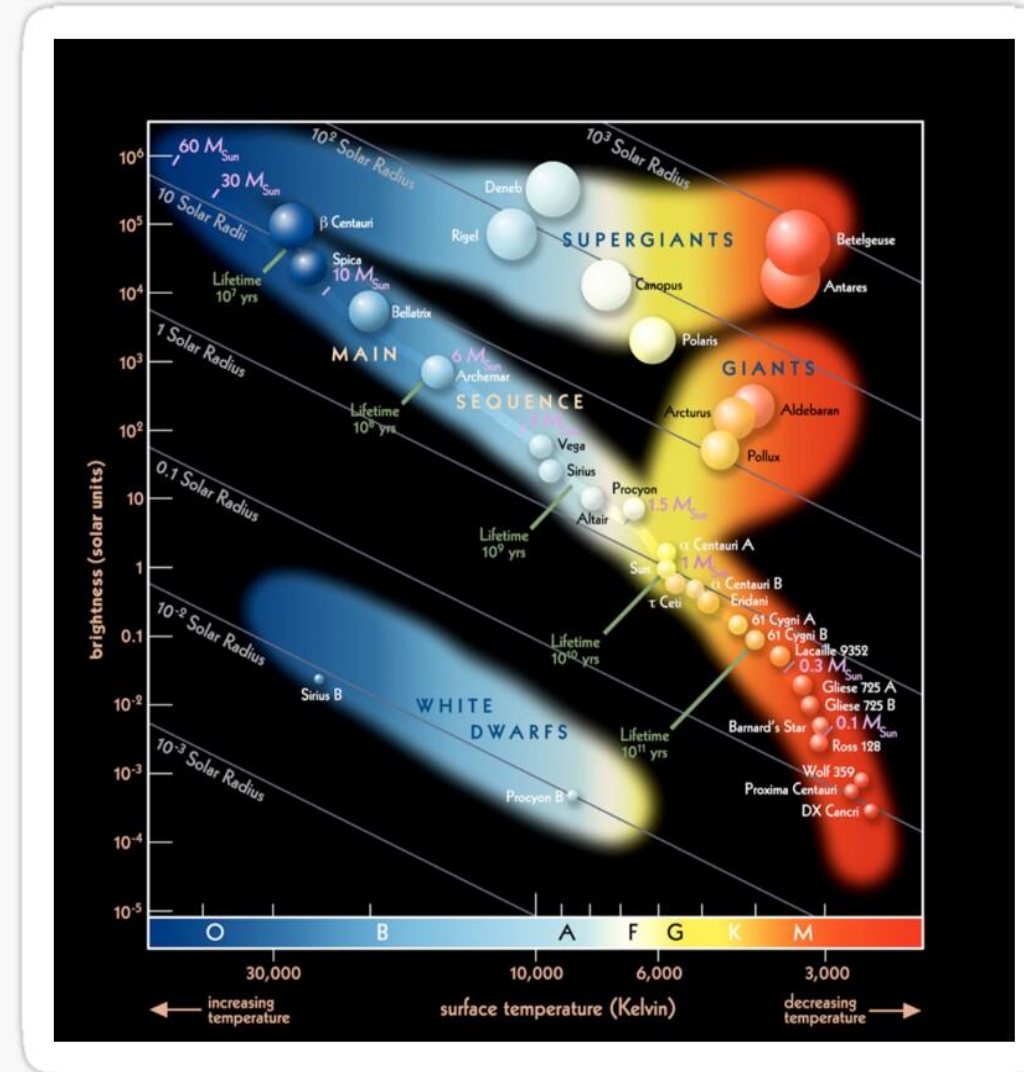
Le diagramme HR nous renseigne aussi sur **la taille des étoiles**.

En effet, une relation lie la luminosité, le rayon et la température. Cette relation est due à la théorie du corps noir, due principalement à un physicien nommé Planck :  $L = 4 \times \pi \times \sigma \times R^2 \times T^4$  ( $\sigma$  est une constante)

La position sur le diagramme HR donnant T et L, on en déduit facilement le rayon des étoiles, et par là leur surface visible et leur volume.

Le diagramme ci-contre donne des droites d'iso-rayon.

Notez que **rien ne nous renseigne sur la masse des étoiles**.



# La vie des étoiles : au début

Après la concentration d'un nuage d'hydrogène, permettant une augmentation de la pression et de la température, une proto-étoile apparaît.

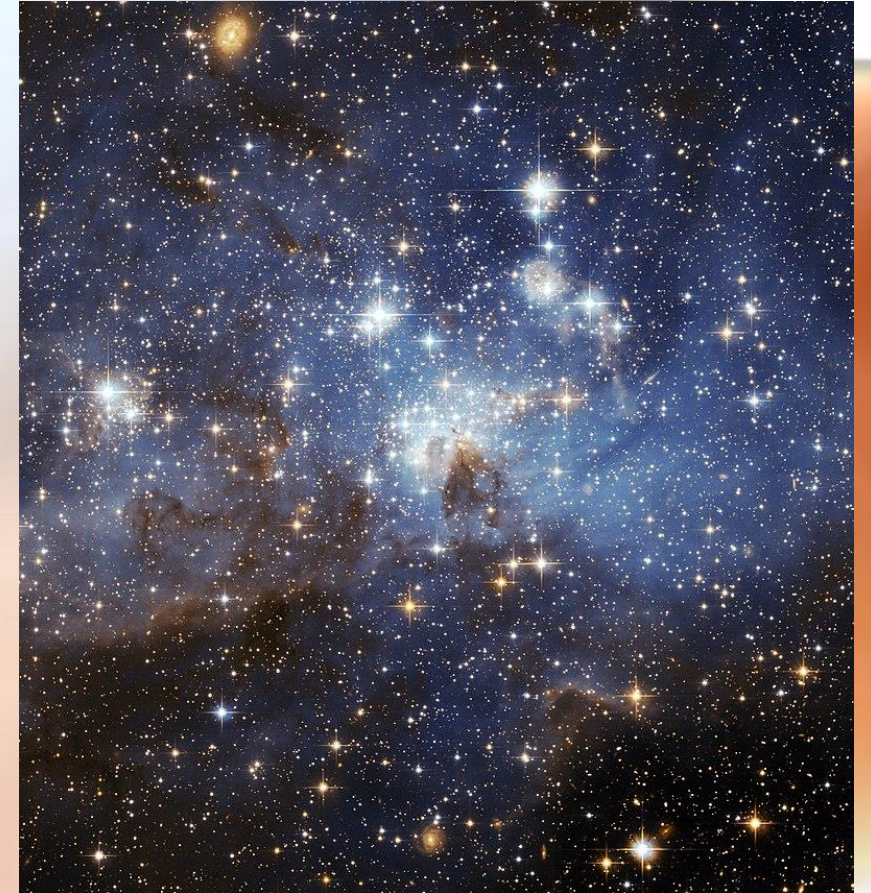
A ce stade, les réactions nucléaires démarrent et produisent une énergie faible. L'étoile naissante a encore une température faible et émet de la lumière infra-rouge.

La proto-étoile est située en dehors du diagramme HR, dans une zone en bas et à droite.

Les « poussières » qui se concentrent en même temps que le gaz nous masque souvent la proto-étoile.

Le satellite Herschel a été lancé en 2009 pour étudier la lumière infrarouge émise par les proto-étoiles.

La proto-étoile est de grande taille, environ l'orbite de Mercure. Sa luminosité, bien qu'encore faible est toutefois supérieure à celle du soleil en raison de sa grande taille.



**Une zone riche en proto-étoiles dans le Grand Nuage de Magellan**

# La vie des étoiles : l'âge mur

Une étoile « normale » va passer sa vie adulte (90% de sa durée de vie) sur la séquence principale.

Elle migre donc progressivement depuis la bas du diagramme HR vers la position qu'elle occupera sur la séquence principale.

Une fois « adulte », elle se stabilise sur cette position et y reste.

Cette position se caractérise par une luminosité, un type spectral (équivalent à une couleur et une température de surface).

Les réactions nucléaires transforment l'Hydrogène en Hélium en produisant de l'énergie.

Le soleil est dans cette phase. Il consomme chaque seconde 670 millions de tonnes d'Hydrogène et le transforme en 662,7 millions de tonnes d'Hélium.

Le défaut de masse est converti en énergie selon la relation  $E = MC^2$  (cette relation a été établie par A. Einstein dans ses théories dites de la Relativité)

Les étoiles massives ont une durée de vie plus courte que les étoile de faible masse. Cela s'explique par une consommation de combustible beaucoup plus rapide !

# La vie des étoiles : le 3<sup>ème</sup> âge

La phase finale de la vie d'une étoile commence lorsqu'elle a consommé tout son hydrogène. Voyons comment cela se passe pour une étoile comme le soleil.

Le ralentissement des réactions nucléaires entraîne une perte de volume du cœur de l'étoile : il se rétrécit ce qui fait augmenter sa température ce qui entraîne une dilatation des couches externes de l'étoile. Son rayon augmente entraînant une augmentation de sa luminosité. A contrario sa température de surface baisse.

Elle devient **une géante rouge**.

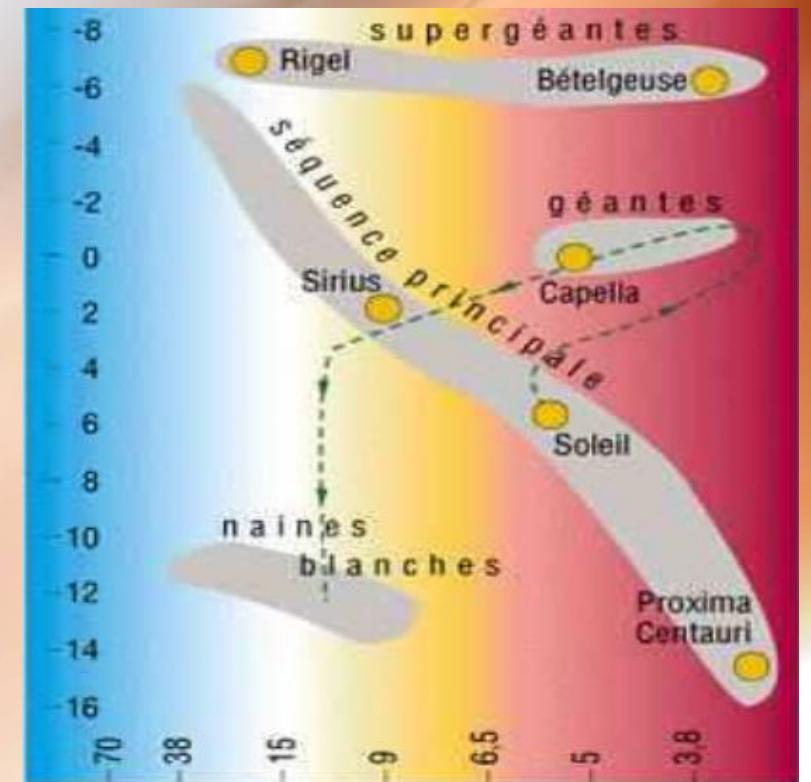
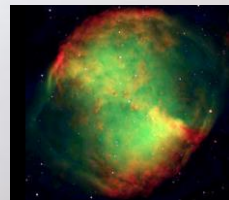
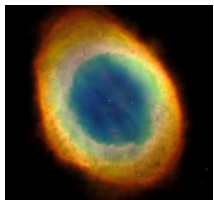
Elle se déplace sur la partie supérieure droite du diagramme HR

L'agonie de l'étoile est mouvementée !

Consommant de l'hélium pour former du carbone, elle entre dans une phase instable et finit par exploser en éjectant une partie de sa matière dans l'espace.

Le cœur restant devient une naine blanche.

La matière éjectée constitue une nébuleuse planétaire.



températures de surface (en milliers de kelvins)

# Et les supergéantes ???

C'est un type d'étoile très volumineuse et très lumineuse. La masse d'une supergéante est comprise entre 10 et 100 masses solaires, et son rayon entre 30 et 500 fois celui du Soleil, même s'il dépasse parfois les 1 000 rayons solaires !

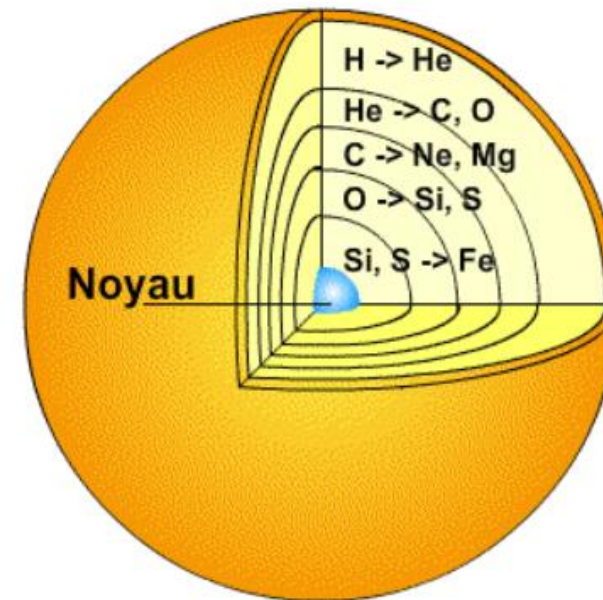
Quant à son éclat, il atteint les 10 000 à 1 million de fois celui du Soleil.

Sa durée de vie est très courte (quelques millions d'années), et son destin est de finir en supernova. Elle laisse alors comme cadavre stellaire un astre compact, qui peut être une étoile à neutrons ou un trou noir.

Elles existent dans tous les types spectraux.

Ces étoiles forgent des atomes lourds avant l'explosion en supernova :

Carbone, oxygène, magnésium, silicium, soufre, ... jusqu'au fer.



Structure dite en « pelure d'oignon » d'une supergéante juste avant l'effondrement du cœur de fer et l'explosion de la supernova.