

Tu n'as pas plus gros  
pour la rouge ?

...c'est une  
naine

# Un univers de perles...

## L'évolution des étoiles



Éternel recyclage : les étoiles  
peu massives, comme le Soleil  
(en bas), et les étoiles  
massives (en haut) naissent  
au sein de nuages  
interstellaires et cette matière  
est récupérée à leur mort.

## sur un bracelet

Les étoiles ne sont pas des astres  
inchangés et éternels, bien au contraire.  
Elles naissent, vivent et meurent ! Il est même  
possible de construire un joli bracelet représentant  
l'évolution d'une étoile : petite comme le Soleil, ou très massive  
comme Naos\* : à vous de choisir l'histoire que vous raconterez.





## La naissance d'une étoile

En quoi consiste la vie d'une étoile ? Au début, il y a un nuage... **Un nuage** fait de beaucoup de gaz (surtout de l'hydrogène) et d'un peu de poussières. Ce nuage, dense et froid, n'aime pas être perturbé et dès que cela se produit (explosion proche, ou "coup de Soleil" c'est-à-dire trop de lumière UV, ou encore une collision avec un nuage voisin), **le nuage se contracte**. Son cœur se met alors à chauffer, et quand il atteint dix millions de degrés<sup>\*\*</sup>, les réactions nucléaires se mettent en route : une étoile adulte est née. L'étoile a en effet trouvé un moyen d'arrêter l'inévitable contraction. En transformant l'hydrogène en hélium, les réactions nucléaires libèrent un peu d'énergie – de la lumière, celle qui au final illumine nos journées.

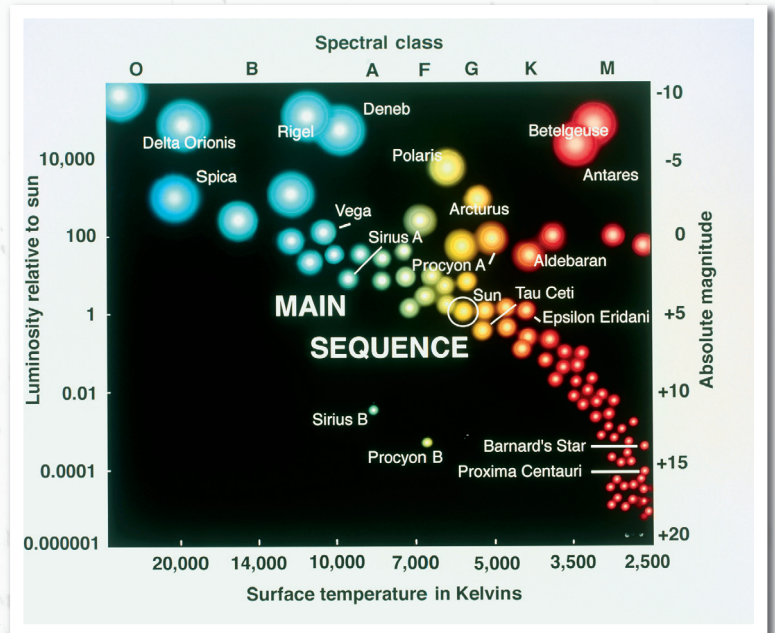
**Cette lumière exerce une pression vers l'extérieur, et c'est elle qui va équilibrer les forces de gravité** qui tendent à faire effondrer l'astre sur lui-même. L'étoile passera la majeure partie de sa vie (90%) dans cet état, en équilibre. On appelle cette phase la **"séquence principale"**.

## Vie et mort d'un Soleil

Mais toutes les bonnes choses ont une fin.

**Chaque seconde, le Soleil transforme 600 millions de tonnes d'hydrogène en hélium.**

Même s'il est grand, il n'est pas infini, et arrive un temps où le **carburant** hydrogène est épuisé. Les réactions s'arrêtent alors : **l'équilibre est rompu, et le cœur de l'étoile s'effondre, soumis à la seule gravité**. Paradoxalement, les couches extérieures vont entrer en expansion : l'étoile va se mettre à gonfler, pour devenir une **géante rouge**. Le nom de **géante** est bien choisi car l'étoile atteint alors au moins cent fois sa taille adulte ! Ainsi, le Soleil deviendra aussi grand que l'orbite de la Terre – et la dépassera même peut-être...



"séquence principale" fait référence à la répartition des étoiles dans le diagramme de Hertzsprung-Russell, où les étoiles sont classées en fonction de leur luminosité réelle et de leur couleur. On trouve les géantes rouges en haut à droite et les naines blanches en bas à gauche, mais la majorité des étoiles se placent suivant une diagonale. On voit qu'une étoile de petite taille à la naissance sera toujours froide (rouge), tandis qu'une étoile naissant massive sera plus chaude, donc tirant plus vers le bleu. Les groupes des géantes rouges et des naines blanches sont à part, ils concernent les étoiles en fin de vie comme nous allons le voir.

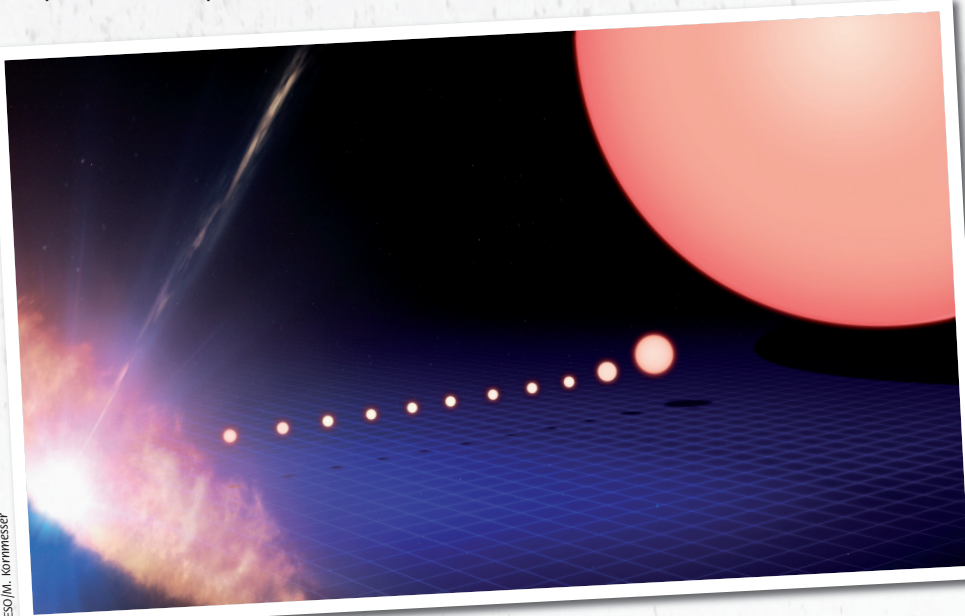
Pendant ce temps, le cœur en contraction s'est réchauffé, de même que les couches proches du cœur. La fusion de l'hydrogène commence alors dans ces couches proches du cœur, qui sont toujours riches en hydrogène, puis le cœur devient si chaud que s'allume un nouveau moteur nucléaire. Cette fois, **c'est l'hélium qui est converti en carbone**.



Représentation simplifiée du cycle de vie d'une étoile de type solaire, de sa formation (à gauche) à la phase de géante (à droite)

\* Étoile bleue très massive dans la constellation de la Poupe.

\*\* Certains nuages n'y arrivent jamais – ceux qui ont moins de 8% de la masse de notre Soleil. Ceux-là continuent à se contracter doucement, formant une naine brune aussi appelée étoile ratée pour des raisons évidentes.





À noter que certaines étoiles (plusieurs fois la masse du Soleil) se mettent alors à pulser – ce sont les **céphéides**, des astres-repères, aux pulsations bien calibrées, que l'on utilise pour déterminer les distances. Cette nouvelle phase calme ne dure hélas pas longtemps car le nouveau carburant est vite épuisé.

**Les étoiles peu massives, comme le Soleil, n'iront pas plus loin.** Leur cœur se contracte de nouveau tandis que les couches extérieures gonflent derechef : l'étoile devient une **AGB** (*asymptotic giant branch*).

Près du cœur qui s'effondre, les couches se réchauffent : la plus interne devient capable de transformer l'hélium, celle un peu plus loin l'hydrogène. Mais les deux ne peuvent "brûler" en même temps. L'étoile est alors instable, et subit des pulsations liées à l'alternance entre les deux couches (une fois c'est l'une, une fois c'est l'autre qui est en route). Les étoiles variables comme **Mira** se trouvent justement dans cet état.

Le cœur se contracte ensuite jusqu'à devenir un cadavre très dense : la **naine blanche**.

L'équivalent en volume d'un petit sucre (1 cm<sup>3</sup>) de cet objet pèse autant qu'une voiture ! Pendant ce temps, les couches extérieures se font éjecter peu à peu... pour former une **nébuleuse planétaire**. Il s'agit d'un nuage de gaz qui se dissipe peu à peu, et formera ensuite, mêlé aux autres, de nouvelles étoiles.

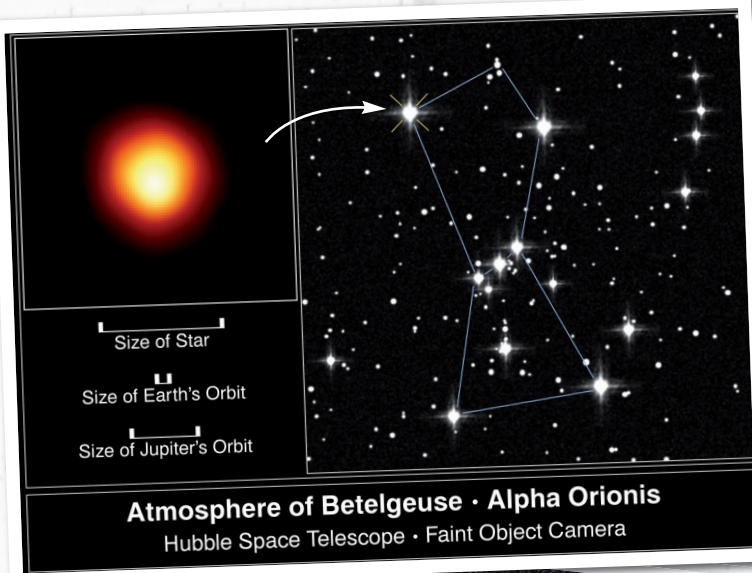
Le cycle recommence alors...

Une nébuleuse planétaire : M97, la nébuleuse de la Chouette, dans la Grande Ourse, telle qu'on l'observe dans un télescope d'amateur.

## Etoiles massives, fin compliquée

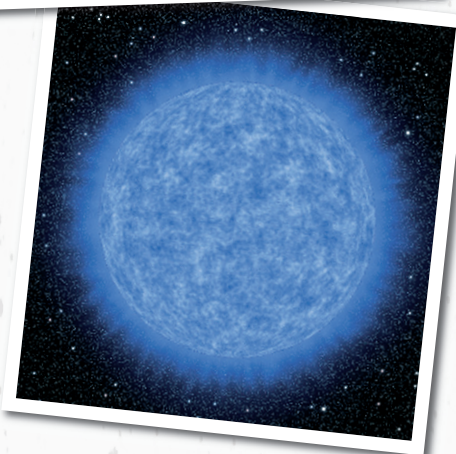
**Et les étoiles massives alors ?** (plus de dix masses solaires) Oh, le début est similaire : contraction du nuage, longue phase adulte\*\*\*, puis gonflement – on parle ici de **supergéante rouge** pour les étoiles de moins de 30 masses solaires environ ; les autres deviennent plutôt de gros astres bleus (les **LVBs**, *luminous blue variables*). À ce moment, l'étoile est souvent instable, éjectant de grandes quantités de matière sous forme d'un vent épais, avant d'entrer dans une nouvelle phase calme. Et puis les choses changent, comparé aux étoiles semblables au Soleil. En effet, pour les étoiles massives, les réactions continuent au-delà de la fusion de l'hélium : **le carbone finit par se transformer en néon au cœur de l'étoile, puis cela continue avec des éléments de plus en plus lourds**. On va alors voir se succéder rapidement des phases de combustions calmes dans le cœur et de combustions en couches superposées (comme les pelures d'un oignon). **Les combustions au cœur sont de plus en plus courtes car non seulement la fusion de ces éléments plus lourds nécessite des températures de plus en plus élevées (jusque 3 milliards de degrés pour le silicium), mais en plus, il y a moins de combustible et celui-ci, par kilo, produit de moins en moins d'énergie...**

\*\*\* N'oubliez pas que les étoiles plus massives sont aussi plus chaudes en surface : elles sont donc plus bleues.



Bételgeuse, supergéante rouge dans la constellation d'Orion, photographiée par le télescope Hubble.

Vue d'artiste de l'étoile Naos (Zeta Puppis) citée au début de l'article.



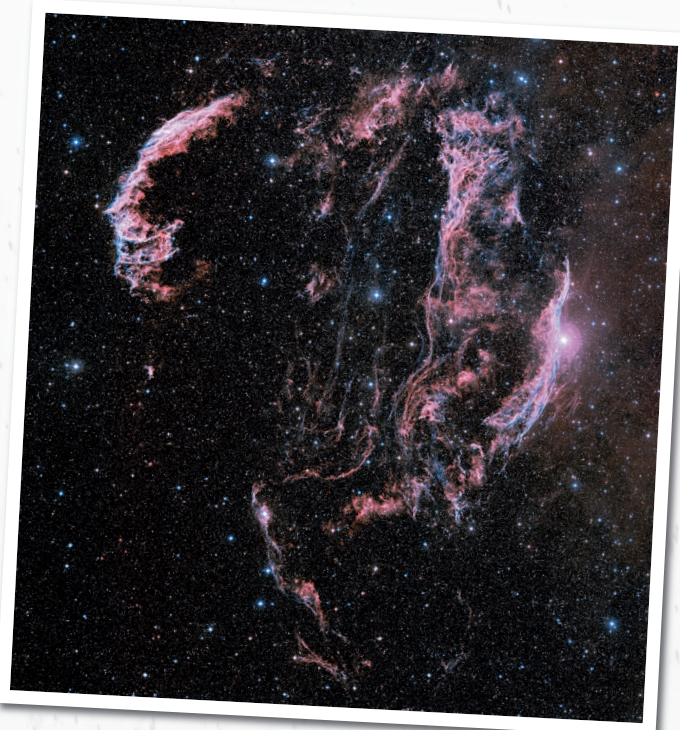


Typiquement, pour une étoile de 20 masses solaires, la fusion de l'hydrogène dans le cœur dure 10 millions d'années, celle de l'hélium un million d'années, celle du carbone 300 ans, celle de l'oxygène quelques centaines de jours et celle du silicium 2 jours seulement !

**Et quand arrive le tour du fer se pose un gros problème.** Cet élément ne se transforme pas naturellement en un plus lourd : il faut lui donner de l'énergie pour le faire. **Crise énergétique donc : le moteur nucléaire est enrayé**, plus rien ne contrebalance la gravité, et le cœur de l'étoile s'effondre irrémédiablement. Il devient une **étoile à neutrons** ou, pour les étoiles extrêmement massives, un **trou noir**. Pendant ce temps, les couches extérieures ont été violemment expulsées, dans une explosion de **supernova**... Là encore, elles formeront un nouveau nuage, qui lui aussi donnera naissance à des étoiles !

Yaël Nazé

Un résidu de supernova : les dentelles du Cygne, dans la constellation du même nom.



© Science Photo Library/Cosmos

## Résumons avec des perles !

Pour construire ce bracelet de 17 cm environ (hors fermeture, 18 cm avec), il faut commencer par un nuage interstellaire, que l'on peut obtenir en entrelaçant des brins de laine, pour former un disque, ou un joli pompon.

### Bracelet "étoile massive"

- Si l'on désire montrer l'évolution d'une étoile massive ou très massive, il faut utiliser des perles blanc-bleu (ou bleu-mauve pour les plus massives) pour la phase adulte.
- Puis mettre une grosse perle rouge (ou bleue pour les plus massives).
- Alternier ensuite des petites et grosses perles car l'étoile est souvent instable (par exemple les éruptions des LBVs en bleu/mauve, pour les plus massives).
- Et terminer sur une grosse explosion : la supernova, représentée de nouveau par une perle à pointes.
- Ajouter le cadavre, petit et bleu (une étoile à neutrons), ou petit et noir (un trou noir) pour les plus massives, avant de refermer le bracelet pour recommencer le cycle.



### Bracelet

#### "naine jaune" ou "naine rouge"

- Passer à la phase principale en enfilant de petites perles claires (blanc-jaune pour un Soleil, rougeâtres pour les moins massives, orangées pour les cas intermédiaires) sur au moins 10 cm (et non 90 % de la longueur : on triche un peu sur les échelles du bracelet, pour pouvoir montrer les phases ultérieures).

- Placer une grosse perle rouge à la suite des petites, pour reproduire la géante rouge.
- Puis alterner perles moyennes oranges et grosses rouges pour les pulsations des céphéides ou les instabilités des AGBs.
- Terminer par une perle avec des pointes, pour la phase d'éjection, et une petite perle blanche pour la naine blanche. Refermer le bracelet pour recommencer le cycle stellaire.



Pour fabriquer une "perle à pointes", on peut assembler une quinzaine de perles "gouttes" ou "grains de riz".