

Petite évolution stellaire illustrée

Benjamin MAUCLAIRE

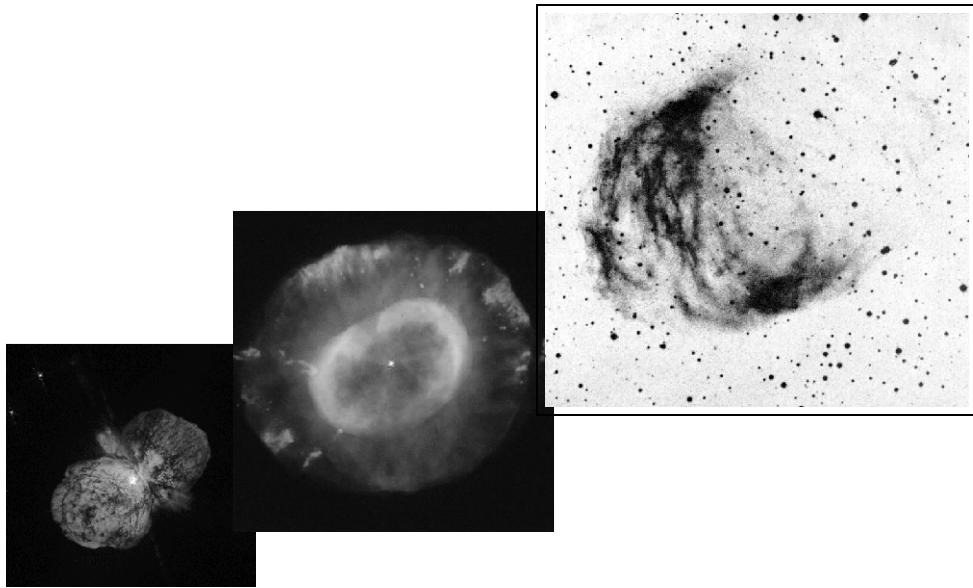


Table des matières

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1 | Introduction : | 1 |
| 2 | Petits principes de l'évolution stellaire : | 1 |
| 2.1 | Y'a-t-il des races d'étoiles? : | 1 |
| 2.2 | Quelques outils pour se repérer : | 4 |
| 2.3 | Les mécanismes de l'énergie nucléaire : | 6 |
| 2.4 | Pourquoi les étoiles varient : | 8 |
| 3 | Les différents cheminement stellaires : | 9 |
| 3.1 | États d'une étoile donnant une NP : | 9 |
| 3.2 | États d'une étoile donnant une SN : | 12 |
| 4 | Les stades intermédiaires des étoiles de masse inférieure à $8 M_{\odot}$: | 15 |
| 4.1 | Étoiles mort-nées : | 15 |
| 4.2 | L'évolution des naines jaunes lourdes , notre Soleil : | 15 |
| 4.3 | Étoiles subissant la dégénérescence de la matière : | 16 |
| 4.4 | Les étoiles géantes variables : | 18 |
| 4.5 | Influence de la métallicité sur les poids lourds : | 20 |
| 4.6 | Les étoiles Be : | 20 |
| 5 | Les stades intermédiaires des étoiles de masse supérieure à $8 M_{\odot}$: | 21 |
| 5.1 | Quelques caractéristiques communes : | 21 |
| 5.2 | Les étoiles de la bande d'instabilité : | 22 |
| 5.3 | Les supergéantes variables : | 22 |
| 5.4 | Variation cataclysmiques et éruptives : | 24 |
| 5.5 | Les étoiles de Wolf-Rayet : | 24 |
| 5.6 | Êta Carinæ, un phénomène hors paire : | 27 |
| 6 | Observation de l'évolution stellaire : | 28 |
| 6.1 | La température des étoiles : | 28 |
| 6.2 | Les étoiles Be : | 29 |
| 6.3 | Les nébuleuses planétaires : | 30 |
| 6.4 | Les étoiles de Wolf-Rayet : | 32 |
| 6.5 | Les supernovæ : | 34 |
| 7 | Conclusion : | 35 |
| 8 | Annexes : | 36 |
| 8.1 | Origine des classes d'étoiles : | 36 |
| 8.2 | Les produits de la nucléosynthèse : | 36 |
| 8.3 | Récapitulatif de l'évolution selon la masse : | 36 |
| 8.4 | Table des indices de couleurs et de température : | 38 |
| 8.5 | Classes d'étoiles variables : | 38 |
| 9 | Glossaire : | 40 |
| 10 | Bibliographie : | 42 |

1 Introduction :

Qui ne s'est jamais demandé d'où venait le fer qui compose les clefs de sa maison?

Il s'avère que cet élément ne serait pas sur Terre sans l'œuvre d'une étoile... En effet, pendant des millions, voire des milliards d'années ces astres suivent une route immuable qui les conduit vers une fin propre à chacune.

La diversité des chemins empruntés n'a d'égale que la beauté des nébulosités formées par les étoiles durant leur vie et lors de leur explosion finale.

Nous allons voir dans les lignes qui suivent comment les étoiles partagent avec le reste de l'Univers les éléments qu'elles ont alors créés.

2 Petits principes de l'évolution stellaire :

2.1 Y'a-t-il des races d'étoiles? :

Notre galaxie, la *Voie Lactée* et les autres d'ailleurs, sont composées entre autre d'étoiles. Mais a-t-on dans une même galaxie des étoiles toutes identiques? Il semble assez naturel de penser le contraire et il y a effectivement des populations d'étoiles d'âges différents et de compositions chimiques initiales distinctes.

On distingue deux grands types de population :

- **Population de type I :**

Ces étoiles sont concentrées dans le plan de la galaxie où la matière inter-stellaire est dense. Elle sont très jeunes et chaudes et appartiennent parfois à des amas galactiques. Les éléments lourds y sont alors en proportion non négligeable (2% à 3%), le reste étant composé d'hydrogène et d'hélium.

- **Population de type II :**

Elles sont situées dans une zone quasi-sphérique autour de la galaxie et constituent les membres des amas globulaires. Cette population d'étoiles est relativement vieille et froide. L'hydrogène et l'hélium y sont ici majoritaires tandis que les éléments lourds sont presque absents (jusqu'à moins de 0.1%).

Parmi ces deux populations, on rencontre autant de specimen malingres qu'obèses : **la densité** est donc une caractéristique fondamentale des étoiles. On associe à trois tranches de densité **les trois grandes étapes de la vie d'une étoile**.

En effet, lorsque nous disposons les points représentatifs des étoiles de notre galaxie dans le diagramme température-luminosité appelé Hertzsprung-Russell (HR), vu en détail au paragraphe **2.2**, trois grands groupes dépendant directement de la densité de l'astre sont alors révélés :

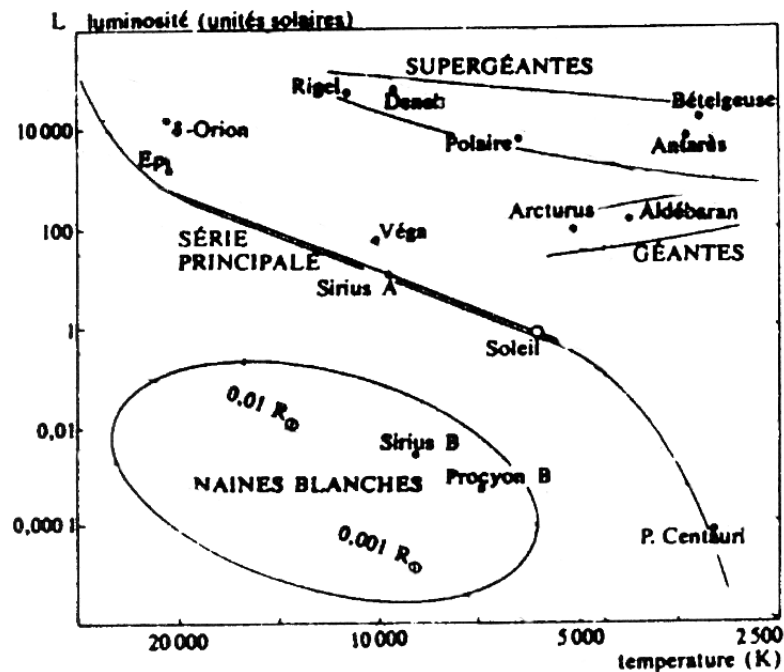


FIG. 1 – Position de quelques étoiles connues dans le diagramme HR.

– les étoiles de la séquence principale :

Cette région du diagramme HR qui forme une diagonale descendante contient les **naines** et les **étoiles bleues très lumineuses** possédant des densités moyennes égales à un et un état d'équilibre.

– la bande des géantes rouges et jaunes :

Les densités de ces étoiles sont faibles : comprises entre $1/100^e$ et $1/10\,000^e$ de celle de l'eau. Elles sont situées dans la zone en haut à droite du diagramme HR.

– le groupe des naines blanches :

Elles correspondent à des astres dégénérés marquant la fin de la vie d'une majorité d'étoiles et dont la densité frôle la tonne par centimètre cube. Ces êtres moribonds occupent le coin inférieur gauche du diagramme HR.

La densité varie au cours de la vie d'une étoile, mais son destin est catalysé par la valeur de sa masse initiale (masse prise au moment du démarrage des réactions nucléaires dans le gaz tout fraîchement effondré). Il y a ainsi des catégories de "poids", comme cela se pratique en boîte :

- Si $M < 0,08 M_{\odot}$: aucune étoile ne peut briller, c'est une naine brune ;
- Lorsque $0,08 M_{\odot} < M < 0,8 M_{\odot}$: l'étoile reste "éternellement" une naine ! En effet, une étoile de $0,7 M_{\odot}$ mettrait 25 milliards d'années à devenir une géante rouge : c'est plus que l'âge de la galaxie ;

- Pour $0.8 M_{\odot} < M < 8 M_{\odot}$: l'étoile finit en **naine blanche** (NB) en offrant d'abord une extase sous forme de **nébuleuse planétaire** (NP) ;
- Avec $M > 8 M_{\odot}$: la fin est plus extrême et c'est une **étoile à neutrons** (EN) qui trônera au centre d'une **supernova** (SN) ;

À part ces grandes classes d'étoiles, on distingue les étoiles par leur variation de luminosité.

Voici ci-dessous, quelques-uns des représentants de ces étoiles variables positionnés dans le diagramme HR.

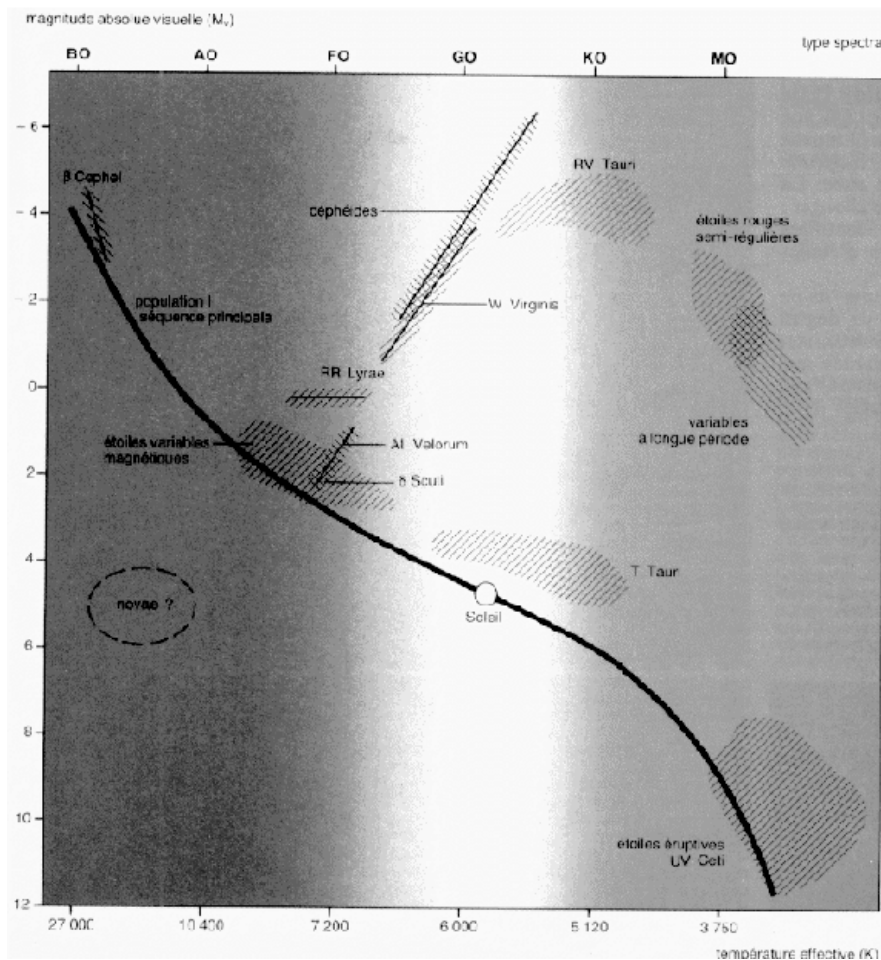


FIG. 2 – Diagramme HR des étoiles variables.

Comme elles ne se comportent pas toutes de la même manière, on procède à un typage dont voici les catégories :

1. Les variables périodiques :

- céphéides et RR Lyrae ;
- variables de longue période (VLP) : Mira Ceti ;
- les δ Scuti et céphéides naines ;

- les β Canis Majoris (très chaudes) ;
- les étoiles magnétiques.

2. Les variables irrégulières :

- les R Coronæ Borealis possédant un voile de suie carbonée ;
- les T Tauri et étoiles éruptives ;
- les novæ ;
- les U Geminorum dites novæ naines ;
Explosions pseudo-périodiques et récurrentes.
- les supernovæ (elles peuvent être récurrentes).

3. Les T Tauri, UV Ceti, étoiles à flash, objets Herbig Haro et RW Aurigæ :

Elles sont encore en formation et donc associées à une nébulosité et subissent plusieurs flashes en 24 heures.

Nous verrons dans le paragraphe 2.4 pour quelles raisons les étoiles adoptent un tel comportement durant leur vie et dans le paragraphe 5.3 et 5.4 quelle est leur place dans l'évolution.

2.2 Quelques outils pour se repérer :

• Les types spectraux d'étoiles :

Durant leur vie, toutes les étoiles ne synthétisent pas les mêmes éléments. Il faut des étoiles plutôt massives pour créer des métaux tandis que toutes vont produire de l'hélium, parfois du carbone et de l'azote.

Les étoiles ont alors été classées selon l'abondance des différentes espèces atomiques, abondance directement liée à la température (ici en ordre décroissant) qui règne à leur surface.

| Type spectral | Couleur | T (K) | Espèces atomiques | Exemples |
|---------------|--------------|-----------------|---|----------------------------|
| O | bleu-blanc | 30 000 | peu de raies en absorption, He ⁺ , X ³⁺ , H très faible | <i>Naos</i> |
| B | bleu-blanc | 12 000 – 25 000 | He, H | <i>Rigel, Spica</i> |
| A | bleu-blanc | 7 500 – 11 000 | H fort, Mg ⁺ , Si ⁺ , Fe ⁺ , Ti ⁺ , Ca ⁺ , métaux neutres. | <i>Sirius, Vega</i> |
| F | blanc | 6 000 – 7 500 | H, métaux ⁺ et neutres | <i>Canopus, Procyon</i> |
| G | blanc-jaune | 5 000 – 6 000 | Ca ⁺ , métaux ⁺ et neutres | <i>Soleil, Capella</i> |
| K | jaune-orange | 3 500 – 5 000 | métaux neutres | <i>Acturus, Aldébaran</i> |
| M | rouge | 3 500 | métaux neutres et molécules | <i>Béltegeuse, Antarès</i> |

Toutefois, elle ne correspond pas à la chronologie de l'existence de l'astre. Cette séquence s'ordonne par des lettres que voici ici avec une phrase mémotechnique :

$$\underbrace{W}_{\text{Willie,}} - \underbrace{O}_{\text{Oh}} - \underbrace{B}_{\text{Be}} - \underbrace{A}_{\text{A}} - \underbrace{F}_{\text{Fine}} - \underbrace{G}_{\text{Girl}} - \underbrace{K}_{\text{Kiss}} - \underbrace{M}_{\text{Me !}}$$

À chaque type correspond alors une température, donc une couleur et des raies spectrales caractéristiques comme on peut le voir dans le tableau récapitulatif des types spectraux.

• Le diagramme Hertzsprung-Russel :

Il est assez naturel de penser que la température d'une étoile est d'autant plus importante que sa luminosité est grande. Mais le rayon de l'astre représente l'autre facteur influençant la luminosité. C'est à partir de cette réflexion qu'en 1913, Hertzsprung et Russel ont créé un diagramme liant température et luminosité - autrement dit couleur et magnitude - qui porte leur nom (HR).

En traçant un tel diagramme, on s'aperçoit que les étoiles ne tombent pas au hasard et se regroupent le long d'une bande étroite que l'on nomme séquence principale SP :

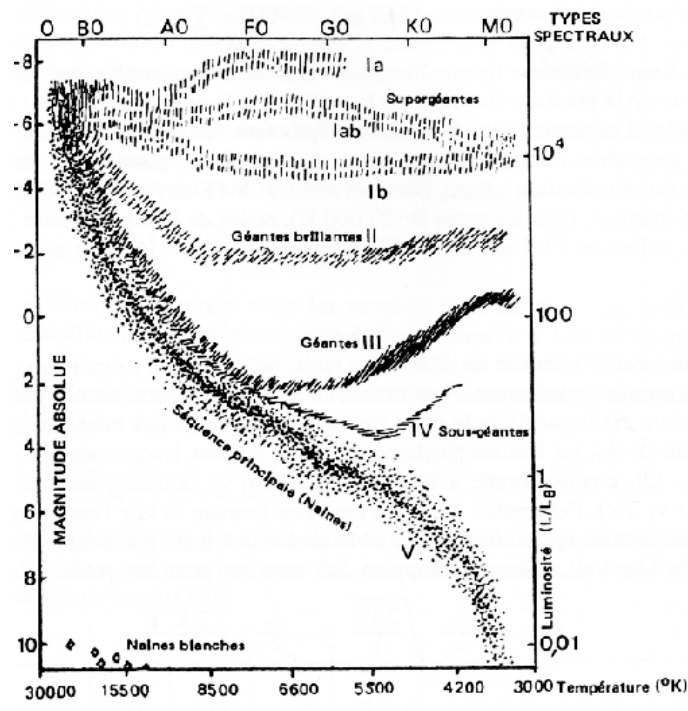


FIG. 3 – Diagramme HR où apparaissent les types d'étoiles.

La séquence principale correspond au moment où l'étoile brûle son hydrogène. Ensuite, elle se déplacera dans ce diagramme de façon différente selon sa masse initiale et sa composition chimique.

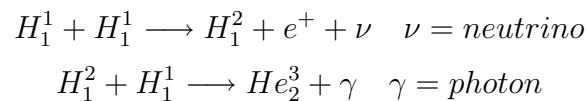
On sait qu'une couleur correspond à une température de la même manière que lorsqu'un bout de métal est chauffé, sa couleur passe du rouge au jaune-orangé, puis au blanc. Par ailleurs, on a associé à chaque couleur une longueur d'onde λ repérable dans un spectre comme on peut le voir dans un arc-en-ciel : le bleu correspond à $\lambda = 4\,500 \text{ \AA}^1$ et le rouge à $6\,500 \text{ \AA}$. Ainsi, a-t-on tout naturellement fait **correspondre un type spectral d'étoile à une température**.

De plus, **la luminosité est directement liée à la masse** ($L \approx M^{3.3}$) qui est elle-même **proportionnelle à la densité**. Le diagramme HR peut donc se lire en masse et cette relation permet alors de comparer les temps et les chemins d'évolution de masse (donc de luminosité) différente.

Cela constitue donc un outil très utile aux astrophysiciens pour suivre la vie des étoiles.

2.3 Les mécanismes de l'énergie nucléaire :

Tout commence lors de la naissance de l'étoile, lorsque la contraction du nuage proto-stellaire permet à la partie centrale d'atteindre une température de 6 millions de degrés. Les conditions sont alors réunies pour engendrer la première réaction de fusion : celle de l'hydrogène. C'est la chaîne proton-proton PP I :



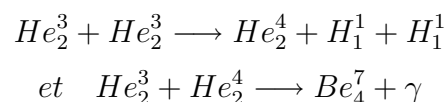
- Étoiles de masse voisine de celle du Soleil :

C'est le cas de Sirius, Capella, Véga et près de 90% des étoiles de notre galaxie. Il règne au centre une température T d'environ 10 millions de K et une pression p avoisinant le milliard d'atmosphère terrestre. Ces conditions permettent à **l'hydrogène de se transformer en hélium via trois réactions** :

1. **la chaîne PP I** : décrite ci-dessus

2. **les chaînes PP II et PP III** :

Passage de l'hélium He au béryllium Be en passant soit par le lithium Li ou soit par le bore B. À la fin, Be, instable, se transmutera en hélium.



3. **le cycle CNO** :

Il conduit à l'hélium en utilisant le carbone C, l'azote N et l'oxygène O présents. Ces trois derniers éléments sont ici des catalyseurs qui sont alors régénérés en fin de réaction.

1. Une longueur d'onde a pour unité l'angström noté \AA qui est égale à 10^{-10} mètres.

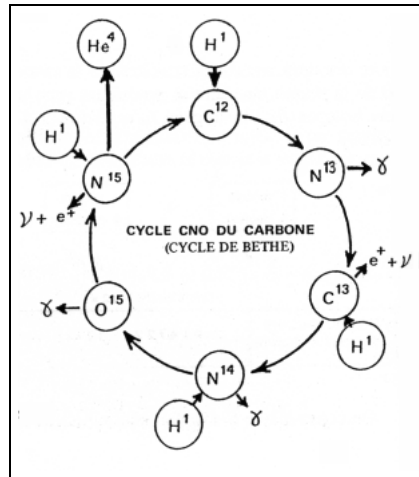
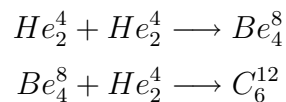


FIG. 4 – Cycle CNO de combustion de l'hydrogène.

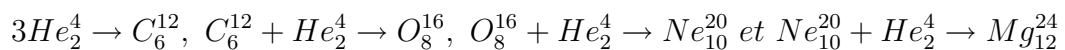
Ces réactions durent pendant plusieurs milliards d'années selon la masse de l'étoile. Une fois que l'hydrogène a été entièrement consommé, le noyau d'hélium ne peut se transformer aux températures régnant à ce stade. L'étoile ne produit plus assez d'énergie pour permettant de contrebalancer la force gravitationnelle: le noyau s'effondre augmentant ainsi la température et la pression.

- Étoiles plus massives que le Soleil ($\sim 2 M_{\odot}$):

Des étoiles comme Aldébaran ou Antarès voient au cours de cette contraction leur température augmenter jusqu'à 100 millions de K, d'où la possibilité de démarrer une nouvelle réaction nucléaire: **la fusion de l'hélium** se traduisant par un **flash**.



Cependant, les éléments de numéro atomique plus petit que 12 sont instables et ne peuvent subsister. Les autres éléments (O, Ne, Mg) provenant de la fusion de l'hélium survivent et l'énergie dégagée au cours de ces réactions est considérable.

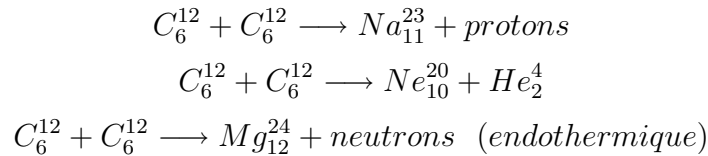


Du silicium Si et de grandes quantités de neutrons sont aussi créés.

- Les étoiles géantes ($\sim 5 M_{\odot}$):

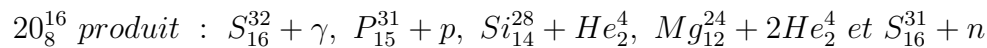
La masse de ces étoiles est alors suffisante pour permettre une nouvelle contraction réchauffant le cœur de C, N, O et autres éléments lourds jusqu'à 500 à 800 millions de K. Survient alors le **flash du carbone**.





- Les supergéantes ($\sim 10 M_\odot$):

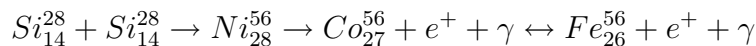
La température atteint le milliard de degrés et **la fusion de l'oxygène** s'opère alors :



L'élément le plus abondant est le silicium Si qui est très stable car composé de 7 noyaux d'hélium.

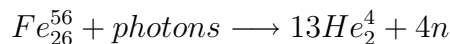
- Étoiles supergéantes de plus de $10 M_\odot$:

La température du centre peut être alors portée à plusieurs milliards de degrés conduisant à une dernière réaction : **l'équilibre fer-silicium**.



Le noyau de fer est le point d'arrivée de ces chaînes car la gravitation ne pourra pas fournir une énergie suffisante pour transmuter cet élément en un autre plus massif.

Malgré tout, il peut arriver que des photons de grande énergie viennent "briser" les noyaux de fer :



Les réactions qui peuvent alors suivre sont très endothermiques et nécessitent une contraction très importante de l'étoile. **Cet acte final engendre l'explosion en supernova.**

2.4 Pourquoi les étoiles varient :

Il faut tout d'abord comprendre ce qu'est le Soleil et sa philosophie de vie. Une étoile est une importante masse de gaz chaud dont la cohésion est assurée par la gravitation et qui possède parfois un léger renflement équatorial lorsqu'elle est en rotation.

Cependant sa contraction n'entraîne pas l'étoile jusqu'à devenir un point car **la pression du gaz** ainsi que **la pression de rayonnement** s'oppose à la force gravitationnelle. D'un autre côté, la pression de rayonnement variant selon la puissance quatrième de la température, l'astre pourrait alors être totalement soufflé par sa propre lumière. Cela fixe donc une limite supérieure à la masse de l'étoile : **100 fois celle du Soleil.**

La vie d'une étoile est une histoire d'équilibre. La chaleur s'écoule des régions chaudes vers celles qui sont froides, c'est-à-dire du cœur vers la surface. Le rayonnement visible et invisible trouve là son origine : l'action de la gravité comprime le gaz et l'échauffe. De l'énergie s'échappe alors de l'astre. Pour maintenir alors sa température, il se contracte, ce qui augmente la pression et la température des régions centrales. Voici l'affaire réglée pour un "tour".

Cependant, en cas d'emballement des réactions nucléaires, l'étoile se dilate, donc refroidit, ce qui modère le taux de production d'énergie nucléaire. Inversement, si la production d'énergie se tarit par manque de combustible, il y a contraction, ce qui réchauffe le cœur et démarre un nouveau cycle de fusion brûlant les cendres du précédent.

Ainsi, au cours de leur vie, les étoiles traversent des étapes où l'état d'ionisation de l'hydrogène et de l'hélium peut permettre le développement d'instabilités. Ces dernières donnent alors naissance à des pulsations qui se manifestent par des variations d'éclat.

En effet, l'éclat est maximum quand l'étoile se dilate et minimum lorsqu'elle se contracte.

Cependant de nombreuses questions restent à résoudre, comme par exemple l'influence de la composition chimique sur les modèles de structure interne et le développement des pulsations car l'introduction de la convection dans les modèles évolutifs pose des difficultés au niveau théorique.

3 Les différents cheminement stellaires :

3.1 États d'une étoile donnant une NP :

Voici le chemin dans le diagramme HR de ce type d'étoiles :

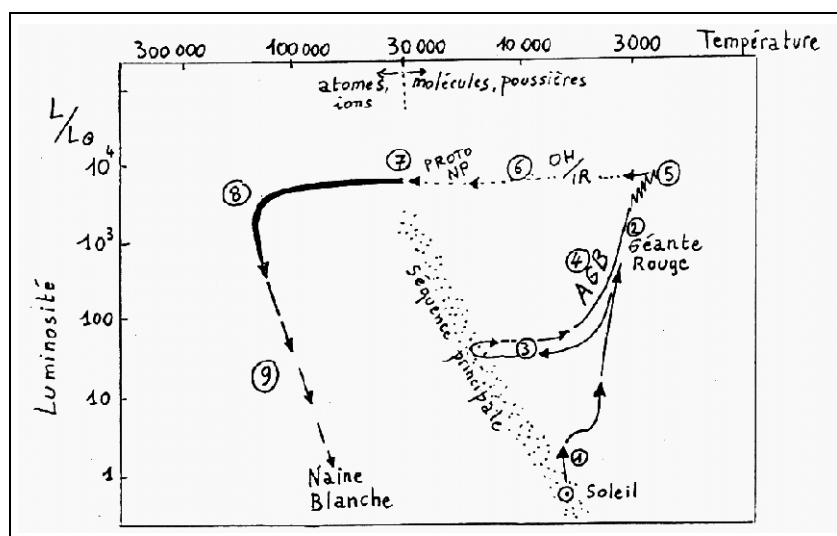


FIG. 5 – Chemin suivi par les étoiles donnant une NP.

Voici en 12 étapes, le déroulement typique de la vie d'une étoile qui donnera naissance à une NP :

- Ainsi, comme nous l'avons vu dans les réactions de nucléosynthèse, les étoiles de type solaire vont **transformer l'hydrogène en hélium** pendant 10 milliards d'années. Cette activité a lieu d'abord dans le noyau de l'étoile, où la température est la plus élevée au départ. Pour s'évacuer en surface, l'énergie provoque une dilatation de l'étoile qui voit alors sa température externe diminuer.

- Peu à peu, les réactions de transmutation de l'hydrogène en hélium atteignent les couches externes du noyau : c'est la **combustion en coquilles**. Celle-ci durera environ 1 milliard d'années. Durant cette phase, l'étoile gonfle pour évacuer l'énergie jusqu'à **aboutir à une géante rouge** constituée d'un cœur de carbone et d'oxygène (branche AGB décrite plus loin).

- Ces coquilles provoquent une augmentation de la température centrale qui entraîne alors une réaction explosive : **le flash de l'hélium**. Ce dernier fusionnera pour donner le carbone. À ce stade, l'étoile brille comme 4 000 Soleils et l'étoile se situe alors sur la "branche horizontale" (BH) du diagramme HR.

- Ensuite **la combustion de l'hydrogène s'amorce dans les couches périphériques**. Ceci contribue fortement à la dilatation de l'étoile. L'étoile est alors positionnée sur la branche AGB (Asymptotic Giant Branch) : l'évacuation de l'énergie fait gonfler cette dernière jusqu'à $100 R_{\odot}$. Autant dire que la Terre ainsi que Mars seront réduites à l'état de brasier.

- Cette expansion des couches externes de l'étoile a pour conséquence la baisse de la température de surface. Il s'ensuit alors un **rougissement caractéristique** qui est du même ordre que celui que l'on peut observer lors de la baisse de température des braises dans notre cheminée. La dilatation de l'étoile est telle qu'elle expulse **un premier vent gazeux** qui sera à l'origine de la nébuleuse planétaire.

- Par suite, des **instabilités thermiques** apparaissent dans les différentes couches de l'étoile : elle se met à **pulser**. Ce sont en fait de véritables soubressauts convectifs qui l'animent. Le volume et la luminosité augmentent. L'étoile est devenue *une géante rouge variable à longue période dont Mira Ceti* en est une représentante typique.

- Les mécanismes nucléaires finissent par s'emballer pour aboutir à **un second vent très épais** qui crée une couronne de gaz. Celle-ci se mêle à des semis de poussières riches en silicates, en graphite et en molécules complexes (hydrocarbures polycycliques aromatiques). À ce moment, l'étoile rayonne comme 50 000 Soleils et occupe la branche Post-AGB du diagramme HR. C'est un objet OH/IR² qui reste caché derrière son manteau de poussière et qui n'est détectable que dans l'infrarouge.

2. voir le glossaire

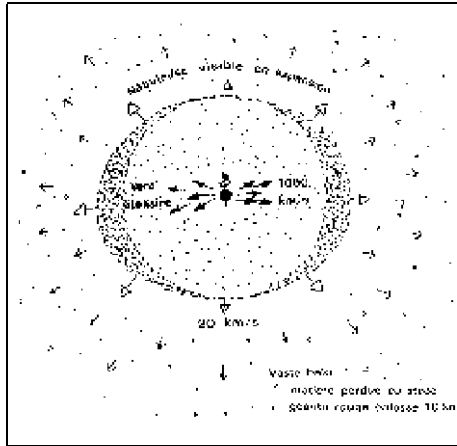


FIG. 6 – Structure des vents d'une NP.

- À la suite de cet événement, l'étoile est dépouillée d'un cinquième de sa masse. La température ayant diminué, les réactions thermiques ne sont plus assez intenses pour contrebalancer la force gravitationnelle ce qui provoque la **contraction de l'astre** et autorise la reprise de la combustion en coquille de l'hydrogène car la température est devenue plus importante.

- Aussi, l'énergie des photons ultraviolets (UV) produits par les réactions est-elle suffisante pour détruire les poussières, dissocier les molécules et ioniser les atomes. *Ce phénomène permet de rendre visible le halo gazeux formé. La nébuleuse planétaire est née* (figure 6).

- L'énergie produite par la reprise de la combustion en coquille (qui s'éloigne du centre) soumet l'étoile à un **troisième vent très ténu et rapide** (de l'ordre de $3\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$). C'est ce vent qui créera la si caractéristique **cavité centrale étayée de globules cométaires**. À titre d'exemple, la nébuleuse Helix se trouve à ce stade d'évolution : on peut d'ailleurs remarquer sur les clichés des traînées partant du centre vers l'extérieur, ce sont les fameux globules (figure 7).

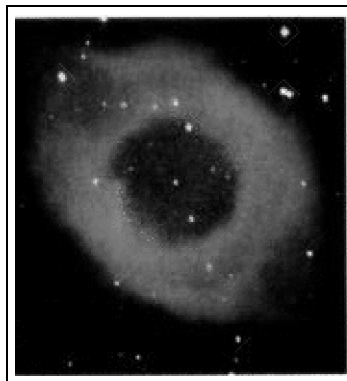


FIG. 7 – Globules cométaires visibles dans Helix Nebula.

D'autre part, l'onde de choc produite par ce dernier vent comprime la matière éjectée lors du second vent et rend le gaz visible par ionisation. Il se forme alors une jolie coquille brillante telle que nous pouvons l'observer dans la nébuleuse de la Lyre (M 57) qui nous apparaît comme un anneau.

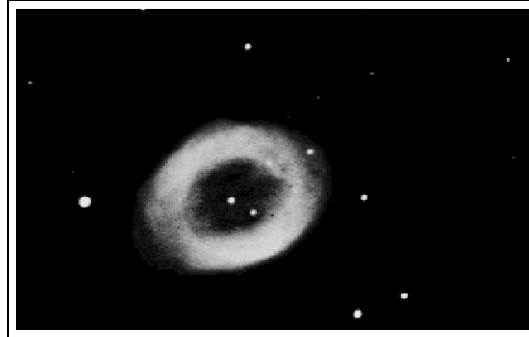


FIG. 8 – Cavité centrale de la très caractéristique M 57.

- Suite à la baisse d'activité nucléaire vue précédemment, l'énergie produite diminue, ce qui fait chuter la température et la pression thermique dite *pression de radiation*. Alors, la force gravitationnelle prend le dessus et fait **s'effondrer le résidu stellaire en naine blanche**.

Seule la pression des électrons ultrarapides dite *pression de dégénérescence* (voir lexique) pourra freiner cette contraction brutale. Ainsi, l'étoile est devenue un astre au cœur solide de quelques 10 000 km de diamètre et d'une masse d'environ $0,6 M_{\odot}$ à $1 M_{\odot}$. La compression induit des densités de l'ordre de 300 kg par cm^3 en moyenne voir même 1 tonne/cm^3 au centre.

- Enfin, suit une **lente agonie** qui caractérise la **naine blanche**. En effet, après ce vent, la combustion de l'hélium au centre ralentit jusqu'à s'arrêter. Parallèlement, l'enveloppe de gaz devient très grande jusqu'à se diluer dans l'espace. Les irrégularités de structure s'estompent peu à peu pour disparaître totalement dans le "vide" inter-stellaire. La jolie nébuleuse planétaire aura été visible en moyenne 30 000 ans.

- Cependant, les reliquats les plus massifs subiront un **flash de l'hélium inespéré** qui fera repasser l'ex-étoile par le stade de géante rouge pour parcourir **une deuxième fois le chemin qui mène à la naine blanche**.

3.2  tats d'une étoile donnant une SN :

A contrario de ce que l'on a vu précédemment, le temps que mettra une étoile massive (masse supérieure à $7-9 M_{\odot}$) pour aboutir à la supernova est relativement plus court et va de quelques millions et 20 millions d'années.

Comme on vient de le voir, ce sont donc les "poids lourds" qui sont en fait les plus pressés et les plus violents. Les représentants de tels astres sont des supergéantes telles

Deneb, Rigel, le groupe des Pléiades... toutes teintées d'une couleur bleue trahissant leur température importante.

Ainsi, les principales étapes seront :

- **La combustion de l'hydrogène** qui dure moins de 10 millions d'années ;
- **Une forte expansion** accompagnée d'un refroidissement de plusieurs dizaines de milliers d'années pour atteindre le stade de supergéante rouge ;
- **Une phase d'instabilité** qui pourra la mener, selon sa métallicité, vers une étoile de **Wolf-Rayet azotée** pour finir enfin en supernova.

Plus l'étoile est massive, plus la température des régions centrales atteint des valeurs élevées qui permettent à plusieurs épisodes de combustion nucléaire de se succéder.

Nous avons vu qu'à la suite de la combustion de l'hydrogène en hélium, il s'effectuait une réaction explosive : **le flash de l'hélium**. Cette fusion produit du carbone, de l'oxygène, parfois du néon et du magnésium. Les réactions s'arrêtaient là.

Mais, pour les supergéantes, une nouvelle contraction réchauffe le cœur et entraîne alors la **fusion du carbone**. Il peut aussi s'opérer la **fusion de l'oxygène**. Cette dernière génère du silicium en grande quantité.

Quant aux étoiles supermassives (masse $> 20 M_{\odot}$), le cœur peut être porté à plusieurs milliards de degrés. À cette température naît **la réaction d'équilibre entre le silicium et le fer**.

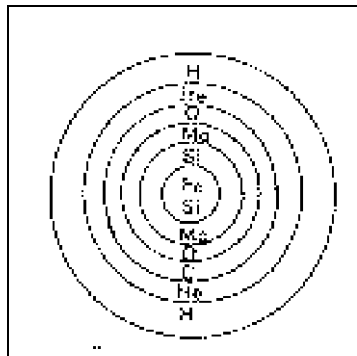


FIG. 9 – Structure en oignon des espèces atomiques créées par l'étoile.

Parallèlement, à la suite de combustions dans les couches internes de l'étoile, **une violente phase d'expulsion de plasma** (matière composant l'étoile) s'amorce. Selon la masse de la supergéante, le déroulement de cette phase est très différent (figure 9).

- Cas des étoiles moyennement lourdes $8 M_{\odot} < M < 12 M_{\odot}$:

Au sein de ces étoiles, le noyau, riche en carbone et en oxygène est inerte. Autour de lui, il y a successivement une couche d'hélium et d'hydrogène où s'effectue leur combustion.

Par ailleurs, les pertes de masse commencent à devenir non négligeables mais n'affectent pas encore le chemin suivi dans le diagramme HR.

- Cas des étoiles de $12 M_{\odot} < M < 60 M_{\odot}$:

Ces étoiles ont la particularité d'effectuer des aller-retours horizontaux dans le diagramme HR une fois qu'elles ont quitté la SP. Ces mimiques traduisent en fait des variations de rayons importantes car l'étoile réagit à ses variations de structure interne par gonflement-dégonflement.

La plus célèbre de ce type d'étoiles bleues est certainement *Deneb*. Voici le cheminement qu'elle suivra dans le diagramme HR décrit dans la figure 8.

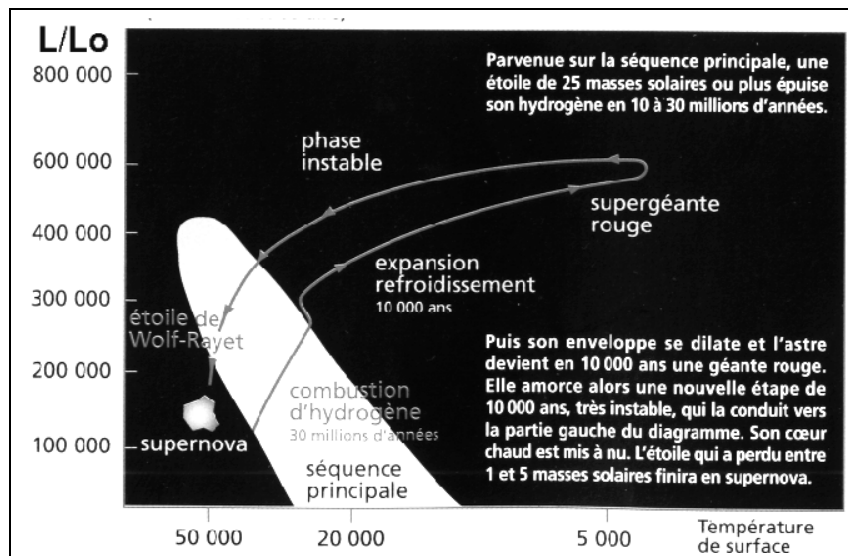


FIG. 10 – Cheminement des supergéantes.

- Cas des étoiles de $M > 60 M_{\odot}$

Elles deviendront des étoiles de Wolf-Rayet où les pertes de masse frisent l'exubérance. À ce sujet, on se référera au paragraphe 6.3.

La puissance du flux rayonnant de l'étoile qui repousse en permanence ses couches externes, provoque **des pertes de masse**. On a ainsi remarqué que les astres lumineux et étendus possèdent une atmosphère en expansion rapide. Ceci durera jusqu'à la production du fer au cœur de l'étoile. Cette dernière réaction nucléaire marquera le départ d'un inexorable effondrement de l'étoile sur elle-même qui formera une étoile à neutrons.

En effet, à cause de **l'énorme stabilité du fer**, sa fusion nécessite beaucoup plus d'énergie que les réactions précédentes. Ce brusque besoin énergétique provoque alors une contraction du noyau qui dans son effondrement, produirait une onde. Celle-ci serait alors réfléchiée par le cœur de l'étoile et se propagerait vers l'extérieur, entraînant avec elle toutes les couches périphériques. La supernova (SN) vient de naître.

4 Les stades intermédiaires des étoiles de masse inférieure à $8 M_{\odot}$:

4.1 Étoiles mort-nées :

- Commençons par les astres de masse $M < 0.08 M_{\odot}$:

Aucune réaction nucléaire n'est possible : l'astre est alors soit une planète, soit une naine brune.

Une propriété les caractérise : l'importance de l'énergie gravitationnelle engendre une augmentation de la température. En effet, les observations de Jupiter dans l'infrarouge mettent en évidence un important rayonnement.

- Les étoiles de faible masse $0.08 M_{\odot} < M < 0.8 M_{\odot}$:

Ces étoiles ne connaîtront que la phase de combustion de l'hydrogène. Leur masse reste trop insuffisante pour entraîner une contraction gravitationnelle permettant les réactions de fusion de l'hélium.

Sa vie se déroulera au voisinage de la séquence principale (SP) sans jamais devenir une géante et elle finira en naine blanche (NB). Ces étoiles nombreuses et peu lumineuses vivent durant plusieurs dizaines de milliards d'années comme dans le cas d'une étoile de $0.7 M_{\odot}$ (voir page 3).

- La destinée des naines rouges :

Ce sont en fait toutes les étoiles qui évoluent sur la séquence principale et dont le **type spectral est compris entre K et M**.

Le Soleil ne sera pas une naine rouge car au moment de devenir une étoile de type K ou M il sera une géante rouge, loin de la SP et plus massive que la naine. En effet, la combustion de l'hélium qui s'est déclenchée en son cœur produit une telle énergie qui, en s'évacuant, fait augmenter son diamètre et sa luminosité tandis que sa température diminuera entraînant une coloration rouge.

4.2 L'évolution des naines jaunes lourdes , notre Soleil :

C'est la situation de notre Soleil. On lui donne ce nom lorsqu'il se trouve sur la séquence principale et que son type spectral est alors G.

On connaît sa vie, avec ses périodes d'activité, ses vents de matière dont nous ressentons les effets par des orages magnétiques et des perturbations électriques. Enfin, son étude est bien précisée depuis que Fraunhofer en a tiré et interprété les premiers spectres qui aujourd'hui comptent plus de mille raies.

À la suite de ces événements sur la séquence principale, la naine jaune deviendra une géante rouge, puis passera à la combustion de l'hélium sur la branche horizontale pour subir ensuite des pulsations thermiques qui la mèneront à la NP.

Voici le cheminement dans le diagramme HR de ces étoiles au comportement voisin de celui du Soleil.

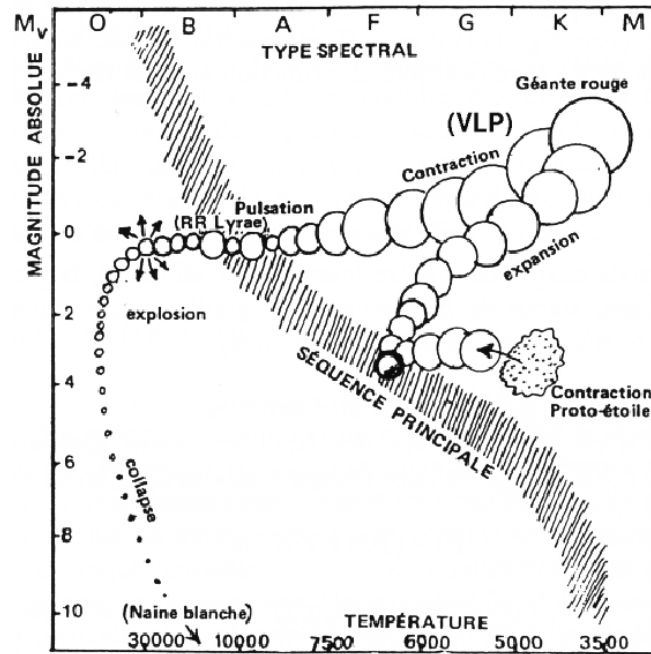


FIG. 11 – Chemin évolutif simplifié d'une étoile de $1.2 M_{\odot}$.

4.3 Étoiles subissant la dégénérescence de la matière :

- Étoiles de masse comprise $0.5 M_{\odot} < M < 2.25 M_{\odot}$:

La masse est alors suffisante pour que l'hélium puisse fusionner. Le noyau de l'étoile sera alors **partiellement dégénéré**³.

Du fait de cet état, la fusion va démarrer brutalement : ce sera le **flash de l'hélium**. À ce stade, l'étoile est devenue une **géante rouge** et le restera jusqu'à la fin de cette fusion pour finir ensuite en naine blanche. Le Soleil suivra la même destinée.

- Les étoiles moyennement lourdes $2.25 M_{\odot} < M < 4-6 M_{\odot}$:

Ce seront des géantes rouges dont les réactions de **combustion interne se limitent à celle de l'hélium** car leur masse est trop faible pour engendrer la fusion du carbone. La masse ne permet alors que d'augmenter la dégénérescence de la matière de l'étoile.

Par contre, la structure de l'étoile géante subira des modifications qui vont entraîner des variations de sa luminosité pendant quelques millions d'années. Ceci se remarque bien dans le diagramme HR où elles dessinent des boucles dans la région des géantes.

3. Voir à ce sujet le glossaire.

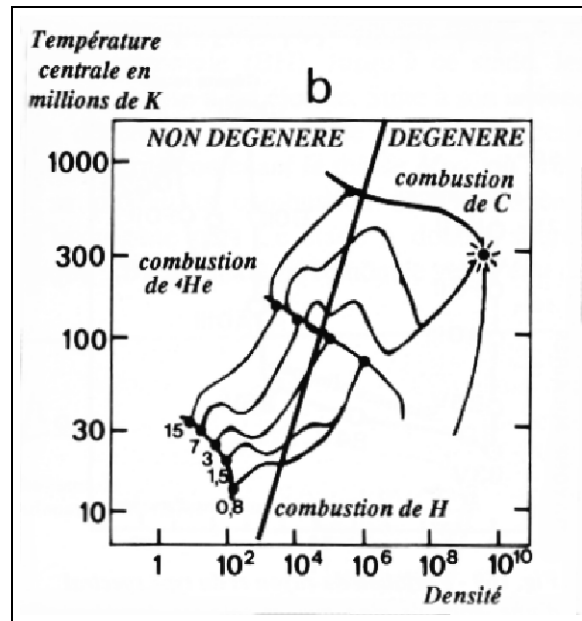


FIG. 12 – Limite de dégénérescence selon les étoiles.

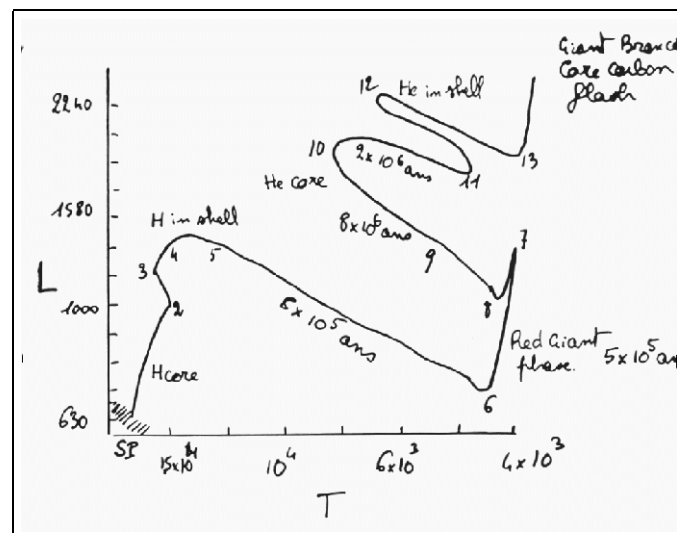


FIG. 13 – Étoile de $5 M_{\odot}$ quittant la séquence principale.

Malgré tout, ces géantes rouges ne présentant **pas de flash de l'hélium car les électrons ne sont pas dégénérés**. Le démarrage de la fusion de l'hélium sera donc plus calme que dans le cas du Soleil.

En ce qui concerne les spécimens les plus massifs ($5-6 M_{\odot}$), la fin de la combustion de l'hélium sera suivie par une dégénérescence électronique. La suite des événements devient alors plus complexe et donne lieu à deux issues :

- S'il y a eu suffisamment de perte de masse : l'étoile expulsera ses couches externes sous forme d'une NP et finira en NB ;

- Sinon, la température imposée par la contraction du noyau permet la combustion du carbone : c'est le **flash du carbone**. Mais, ce dernier possède un caractère destructeur que n'a pas le flash de l'hélium et cette réaction explosive entraîne l'étoile vers un final détonant qu'est la supernova ;

Cependant, la limite entre une fin de type NB ou EN dépend à la fois de **la masse initiale**, de **la composition chimique** et de l'importance **des pertes de masse**. Ainsi, il est difficile de prévoir le déroulement de la fin de la vie des étoiles de masse comprise entre $5 M_{\odot} < M < 9 M_{\odot}$ si l'on n'a pas suffisamment d'informations à son sujet.

4.4 Les étoiles géantes variables :

Les étoiles varient à différents âges de leur existence. Ainsi, plutôt que de procéder à une description typologique des étoiles variables, nous allons relier le type de variable à la catégorie d'étoile dont elle provient et préciser à quel moment de son évolution elle correspond. En grande partie, les variables sont situées en haut à droite du diagramme HR, dans zone s'appellant **la bande d'instabilité**. On pourra se référer au diagramme HR de la figure 5, où le tracé dessine des oscillations.

Les étoiles variables ont été classées puis nommées d'après la première étoile découverte ou la plus brillante étoile de la classe. En effet, le nom comporte souvent une lettre grecque suivie d'un nom de constellation : δ Scuti (delta de l'Écu), T Tauri (tau du Taureau), etc.

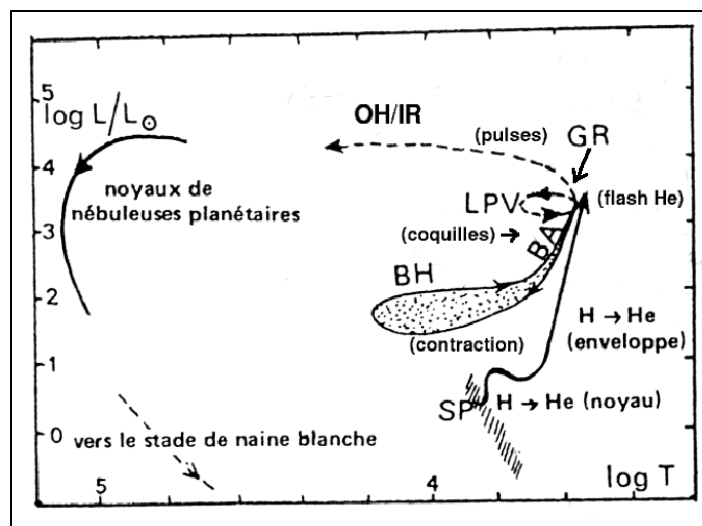


FIG. 14 – Position dans le diagramme HR des géantes variables .

Cependant, parmi toutes ces classes, nous ne décrivons pas ici les variables éruptives de type *T Tauri* et *UV Ceti* qui correspondent aux étoiles tout juste naissantes et ne se trouvent qu'à l'entrée de la séquence principale. De plus, *les céphéides*, *les Mira*, *les β Canis Majoris* et *les R Coronæ Borealis* étant des variables massives seront abordées dans le paragraphe 5.3. Enfin, **pour mieux se retrouver parmi les différentes classes d'étoiles variables**, on se reportera au tableau à l'annexe 8.4.

Tout d'abord, la plus pertinente des classes de variables de moins de $8 M_{\odot}$ et celle des *variables à longues période* car elles représentent une phase importante des étoiles de type solaire où se crée les objets OH/IR (se reporter au glossaire) précurseurs des nébuleuses planétaires.

- **Les variables à longue période dites VLP ($1 M_{\odot}$) :**

Les VLP correspondent à des étoiles de masse inférieure à $8 M_{\odot}$ dans un état de **géante rouge en fin d'évolution**, lorsque que l'hélium brûle en coquilles. L'énergie nucléaire ne peut être ainsi évacuée facilement et les pulses alors engendrées soulèvent les couches profondes de matière pour les mélanger aux gaz riches en hydrogène de la surface. Ceci conduit à un zoo d'éléments (H, He, O et C moléculaires, oxydes métalliques) dans l'atmosphère de l'étoile. Le flash de la coquille d'hélium signe ainsi la dernière étape de la vie de l'astre et transforme son cœur en carbone et oxygène.

Le spectre de ces étoiles est alors fort compliqué. Il comprend de nombreuses **bandes moléculaires en absorption** ainsi que des **raies d'émission** dues principalement à **une enveloppe très étendue faite d'hydrogène**.

Ces variables rouges, donc froides ont une période comprise entre 30 et 1000 jours. **Le prototype de ces étoiles est *Mira Ceti*** dont la variation de l'éclat est spectaculaire puisqu'elle peut perdre 7.5 magnitudes ! Autant dire que *o* de la Baleine s'éteint littéralement au cours de son cycle de 11 mois. Le Soleil aboutira au même stade dans environ 7 milliards d'années.

- **Les variables semi-régulières dites VSR ($\leq 1 M_{\odot}$) :**

Étoiles naines et âgées parvenues à **la fin du stade de refroidissement** (couleur rouge). Vivant longtemps, elles possèdent une masse plutôt faible ($\leq 1 M_{\odot}$).

- **Les δ Scuti ($2 M_{\odot}$) :**

Ce sont des céphéides naines, peu nombreuses et de période très courte allant de 0.02 à 0.2 jours. Les *Al Velorum* possèdent des propriétés voisines mais **n'ont qu'une masse de $2 M_{\odot}$** . **Ces étoiles viennent juste de quitter la séquence principale et sont donc relativement jeunes**.

- **Les RR-Lyræ ($1 M_{\odot}$) :**

Ces étoiles varient avec une période n'exédant pas 1.5 jour et se déplacent perpendiculairement à la galaxie à une vitesse importante. Ce sont donc de **vieilles étoiles** qui appartiennent à la population II et sont ainsi situées dans les amas globulaires.

Elles sont assez chaudes (type spectral A2 à F2) tout en étant situées dans la zone des géantes. **Elles correspondent alors aux étoiles de type solaire ($\sim 1 M_{\odot}$) brûlant leur hélium en couche (branche AGB du diagramme HR)**.

- **Les W Virginis :**

Elles appartiennent à la population II mais possèdent une période plus longue que les RR-Lyræ.

- **Les RV Tauri ($\leq 8 M_{\odot}$) :**

C'est une population stellaire intermédiaire à **la métallicité** (voir à ce sujet le paragraphe 4.5) **proche de la normale** (environ 2%), a contrario des VLP. Ces géantes de la population II se trouvent alors dans la bande d'instabilité.

4.5 Influence de la métallicité sur les poids lourds :

Les specimen ayant une masse entre 5 et 9 M_{\odot} passeront par un stade d'étoile de Wolf-Rayet mais finiront en NP. Ces Wolf-Rayet sont particulières car elles sont **riches en carbone au contraire des Wolf-Rayet issues des supergéantes bleues qui sont riches en azote**.

En effet, la masse des étoiles de cette catégorie ne va pas permettre au cœur d'être sous une forme dégénérée et l'intense production d'énergie sera évacuée sous forme de pertes de masse. Ces pertes ont lieu durant la fusion de l'hélium qui engendre le carbone et ses oxydes qui sont si caractéristiques dans le spectre de ces étoiles.

Ainsi, **au centre de certaines NP**, il n'est pas rare de rencontrer une étoile de Wolf-Rayet carbonée (WRC) qui est en fait une naine blanche très carbonée et ayant eu beaucoup de pertes de masse.

Par ailleurs, il s'avère que plus l'étoile est riche en métaux - **on parle de la métallicité de l'étoile ($X=\%$ en H, $Y=\%$ en He et $Z=\%$ en métaux lourds)** - plus les pertes seront importantes et donc plus la durée de vie sera brève.

4.6 Les étoiles Be :

Les étoiles Be sont par définition **des étoiles possédant des raies d'émission dans leur spectre** alors qu'en général, les spectres stellaires n'ont que des raies d'absorption, comme c'est le cas pour le Soleil, où plus de 1 000 ont été répertoriées. Les raies les plus intenses sont celles de Balmer (raies de l'hydrogène : H_{α} , H_{β} ...) et celles de He I. Ceci explique le nom donné à ces étoiles de type B : **on rajoute un "e" pour raie d'émission**.

Ces étoiles correspondent aux classes III et V (cf. figure 2 paragraphe 2.2) et seulement 10% des géantes de type spectral B0 à B7 possèdent les caractéristiques des étoiles Be dont 5% sont de type O8-O9 et 1% sont de type A0-A1.

Un aspect remarquable dans les étoiles Be est que **leur spectre est variable** surtout les raies H_{α} et H_{β} ! Les périodes de variations s'étalent de l'heure à l'année. Mais la question qui nous vient immédiatement à l'esprit est : «d'où vient cette "anomalie" ?»

L'origine de ces raies d'émission se trouve dans **la présence d'un disque ou d'une enveloppe**, voire les deux, de gaz et de poussières **en rotation rapide autour de l'étoile**. Souvent ces étoiles possèdent un intense champ magnétique et sont **dotées d'un compagnon avec lequel elles opèrent un transfert de masse**. La vitesse de rotation pouvant dépasser les 300 km.s^{-1} , cela induira alors un élargissement des raies du à l'effet DOPPLER. **On observera ainsi une large raie d'émission possédant un creux qui de son côté trahit l'effet absorbant de l'enveloppe gazeuse :**

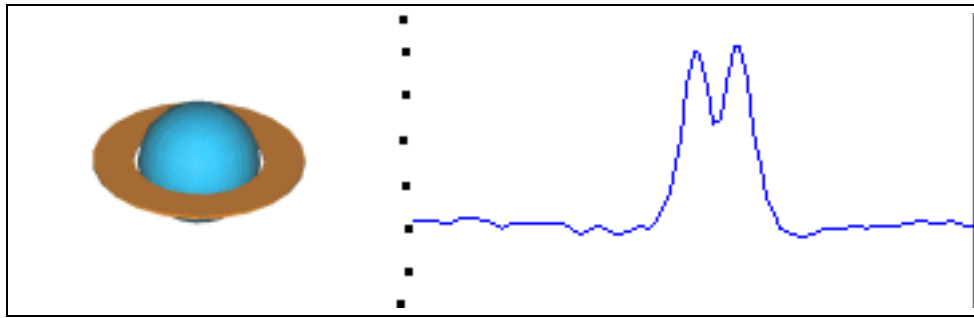


FIG. 15 – Profil de raie d'une étoile Be vue sous un angle de 14° (C. Buil).

Cependant, les mécanismes décrivant les variations à court, moyen et long terme ne sont pas encore tous expliqués.

5 Les stades intermédiaires des étoiles de masse supérieure à $8 M_\odot$:

5.1 Quelques caractéristiques communes :

Pour nous repérer dans le diagramme HR, on retiendra que ces étoiles peuplent le haut de la séquence principale. Ce sont des **supergéantes**. Durant leur vie, ces étoiles voient leur rayon varier énormément pouvant atteindre $1000 R_\odot$ tandis que leur luminosité reste à peu près constante. Elles passeront par le stade de supergéante rouge.

Au cours de leur évolution, toutes les étoiles sont le siège de vents, surtout si elles sont massives. La formule magique permettant de connaître ce taux de perte annuelle est la suivante :

$$dM = -2.10^{-13} \frac{L^{1.4} R^{0.6}}{M_*}$$

On trouve ainsi, que le Soleil perd $2.10^{-5} M_\odot$ par an, que pour les géantes les pertes sont de l'ordre de 10^{-8} à $10^{-6} M_\odot$ par an et dans le cas des supergéantes elles s'élèvent entre $5.10^{-6} M_\odot$ et $4.10^{-5} M_\odot$ par an.

De plus, en mesurant la masse du résidu stellaire, on peut connaître la masse initiale de l'étoile et dire qu'entre $8 M_{\odot}$ et $40 M_{\odot}$ l'étoile moribonde finira en étoile à neutrons. Au delà, l'issue sous forme de trou noir dépend de l'importance de ces pertes.

Au delà de $50 M_{\odot}$, les étoiles ne passent plus par le stade de supergéante rouge et deviennent le plus souvent des étoiles de Wolf-Rayet que l'on décrit plus amplement dans le paragraphe 5.5.

Ces mastodontes théoriques qui sont les plus lourds que la nature puisse former⁴ quittent alors rapidement la SP après avoir consommé leur hydrogène en étant une brève étoile de Wolf-Rayet.

Leur durée de vie est très courte, de l'ordre de quelques millions d'années et leur fin tragique : ce sera une supernova si les pertes de masse au cours de la vie permettent de laisser un résidu de masse comprise entre $1.44 M_{\odot}$ et $2 M_{\odot}$. Au delà de $2 M_{\odot}$, les modèles prédisent la formation de **trous noirs**...

5.2 Les étoiles de la bande d'instabilité :

Ces étoiles ont généralement une masse allant de 7 à $9 M_{\odot}$. Durant leur vie, en moyenne 8 millions d'années, il va se développer **des instabilités type céphéides** lorsque qu'elles vont être dans la zone post-AGB (après géante/supergéante rouge).

Elles seront alors le **siège de pertes de masse et de pulses thermiques** dues aux réactions nucléaires très énergétiques qui ont lieu en leur centre.

Le destin de ces étoiles est directement lié à l'importance de ces pertes de masse et reste cependant une zone assez floue dans les modèles théoriques de l'évolution stellaire.

Il s'avère que si la composition chimique initiale de l'étoile est déjà riche en métaux lourds, c'est-à-dire une métallicité importante, les pertes de masse seront plus conséquentes. À ce moment là, même des étoiles de masse supérieure à $8 M_{\odot}$ pourront se contracter en naine blanche plutôt qu'en étoile à neutrons.

5.3 Les supergéantes variables :

Une des classes de variables les plus importantes en astronomie sont les céphéides car elles ont été pendant longtemps un moyen de mesure pour les distances intra et extragalactiques.

- **Les céphéides (3.7 à $14 M_{\odot}$) :**

- **Propriété communes aux céphéides :**

Leur période va de 1.5 à 50 jours. Les variations sont attribuées à **des pulsations radiales**. Les phénomènes d'absorption des couches d'ionisation de H et He provoque une croissance de l'opacité lors des phases de compression de l'étoile lors des petites perturbations radiales. **L'opacité empêchant**

4. Si les abondances chimiques sont de 70% de H, de 27% de He et 3% d'éléments lourds.

l'évacuation de l'énergie, l'étoile devient alors le siège d'**instabilités vibrationnelles**.

Donc, comme les périodes théoriques correspondent bien à l'observation, l'interprétation théorique des céphéides est des plus remarquables par sa justesse.

Les céphéides sont d'autant plus chaudes que leur période est longue. Leur type spectral varie de F0 à G0 se modifiant au cours d'une période. **Ces étoiles correspondent donc à une large gamme d'étoiles : de 3.7 à 14 M_{\odot} .**

– **Les céphéides de type I :**

Ce sont des étoiles riches en hélium et sont situées dans le plan galactique avec des vitesses faibles. Elles sont alors **jeunes et appartiennent à la population I**.

Le type I est majoritaire parmi les céphéides et **est utilisé comme indicateur de distance** car sa courbe de luminosité ne varie qu'en fonction de la distance où les céphéides se trouvent.

L'influence de l'abondance en hélium engendre des excursions en direction de la SP plus ou moins importants dès le démarrage de la réaction 3α , traduisant dans le diagramme HR les pulsations dont elles sont victimes.

– **Les céphéides de type II :**

Elles correspondent à la partie des céphéides les plus pauvres en hélium.

• **Les β Canis Majoris (15 M_{\odot}) :**

Ces étoiles massives, environ 15 M_{\odot} , **sont relativement jeunes : elles viennent tout juste de quitter la séquence principale.**

Ce sont des astres, **très chaud et à variations irrégulières et rapides** (quelques heures). Elles ont la particularité de présenter d'infimes changements dans leur spectre (dédoublage des raies, élargissement) et surtout, d'avoir leur éclat maximal lorsque leur rayon est le plus petit ! Il est possible que ces variables soient l'étape intermédiaire des étoiles B qui deviennent une étoile Be.

• **Les R Coronæ Borealis ($\geq 10 M_{\odot}$) :**

Ces étoiles présentent à intervalle très irrégulier une brusque diminution de leur éclat de 4 à 5 magnitudes sur une période de moins de 100 jours. **Elles ressemblent à des supergéantes de type F à leur maximum** et montrent souvent dans leur spectre **des bandes d'absorption** dues à des molécules carbonées, dénotant de leur stade d'évolution avancée.

5.4 Variables cataclysmiques et éruptives :

- **Les variables éruptives :**

Ce genre d'étoiles voit leur éclat augmenter en quelques jours, parfois quelques heures jusqu'à 16 magnitudes. Cependant, ce dernier se met ensuite à décroître durant quelques mois pour à nouveau augmenter. Ce phénomène peut ne pas être récurrent mais entraîne toujours d'importantes modifications du spectre.

Cela s'interprète par un changement de la composition des couches externes de l'étoile dû à un bouleversement soudain des réactions nucléaires et à la présence d'une étoile compagne très proche.

D'ailleurs, *les novæ* appartiennent à ce groupe ainsi que les *U Geminorum*, les *Z Camelopardis* et les *R CoronæBorealis*.

- **Les variables cataclysmiques :**

Ces variables sont surprenantes puisqu'elles présentent brusquement une fantastique augmentation de leur éclat pouvant atteindre 18 magnitudes. Ce phénomène intervient au sein des étoiles opérant la fusion du fer ou lors d'un transfert de masse entre une supergéante rouge et un compagnon plus dense.

Il se produit alors un véritable feu d'artifice où l'étoile massive et convulsive impose littéralement en supernova.

5.5 Les étoiles de Wolf-Rayet :

- **Les supergéantes bleues :**

Leur couleur bleue les classe parmi les étoiles très chaudes et **de type spectral O ou B**. Elles sont situées dans la partie supérieure gauche du diagramme HR. Très lumineuses, ces étoiles possèdent surtout des dimensions tout à fait astronomiques pouvant atteindre 800 R_{\odot} dans le cas de Bételgeuse !

Elles deviennent en quelques millions d'années des étoiles de Wolf-Rayet. La fin inexorablement violente, mêlée de vents est terminée par un effondrement implacable sur elle-même en étoile à neutrons.

Ce sont des étoiles très massives où la température des régions centrales permettent la succession de plusieurs épisodes (cycle CNO⁵) de combustion nucléaire. Elles seront alors particulièrement **riches en azote**. Ce phénomène a lieu lorsqu'elles sont en train de **brûler leur hydrogène sur la séquence principale** mais à très haute température.

Ces réactions sont si intenses que le flux énergétique (photons entre autre) rayonnant provoque alors des pertes de masse qui repoussent en permanence les couches

5. Voir le glossaire.

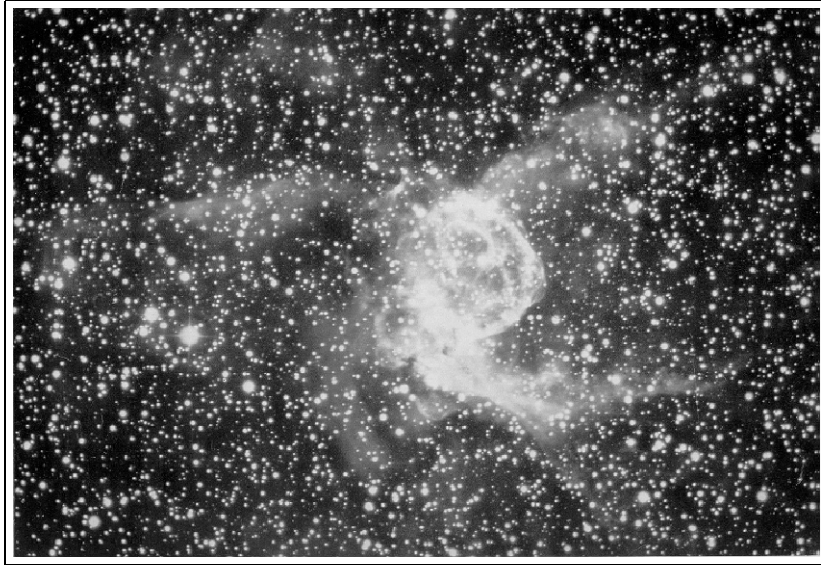


FIG. 16 – *NGC 2359, photographiée par D. Malin (AATB).*

externes de l'étoile pleines d'atomes plus lourds que l'hydrogène. La pression de radiation entraîne alors avec elle les atomes lui “barrant” la route. Cette atmosphère est alors en expansion rapide et **ce seront 40% de la masse de l'astre qui seront volatilisés !** Par exemple, une étoile de $20 M_{\odot}$ expulsera dix millions de fois plus de matière que le Soleil.

Ces pertes de masse sont entraînées par des vents d'une indescriptible violence en avoisinant les 3000 km.s^{-1} qui mettent ainsi l'étoile à nue. Bien que l'origine de ces pertes ne soit pas encore totalement comprise, le modèle le plus fidèle à la réalité fait intervenir à la fois la pression du rayonnement émergeant du cœur stellaire et la présence d'instabilités vibrationnelles centrales.

Il s'avère que plus l'étoile est riche en métaux, plus les pertes seront importantes et donc plus la durée de vie sera brève (voir paragraphe 4.5).

Il y a deux origines possibles de ce type d'étoiles :

- **Une étoile solitaire** de masse au moins supérieure à $60 M_{\odot}$ et dont les **pertes de masse atteignent au minimum $10^{-6} M_{\odot}$ par an.** Ces étoiles ont perdu leur atmosphère et laissent apparaître les régions centrales où les réactions thermonucléaires ont profondément modifié la composition chimique. La combustion de l'hydrogène enrichit alors le milieu en hélium, carbone et azote ;
- **Un système double et massif** (par exemple $20 M_{\odot}$ et $8 M_{\odot}$) où la moins lourde va aspirer la matière de l'autre. Le **compagnon massif sera dépouillé de ses couches extérieures.** Une Wolf-Rayet naît alors très chaude donc très lumineuse dont le noyau est riche en hélium. Ensuite il s'effectue **un transfert de masse inverse**

qui créera une autre WR mais qui entraînera l'effondrement de la première en une étoile à neutrons.

Cette matière éjectée contient autant de poussières que de gaz. Ce dernier est rendu visible grâce aux photons ultraviolets émis par la nucléosynthèse s'opérant au centre de l'étoile. Il apparaît alors de spectaculaires structures comme on peut les observer dans la nébuleuse NGC 2359 ou Éta de la Carène.

• Les étoiles de $60 M_{\odot} < M < 150 M_{\odot}$:

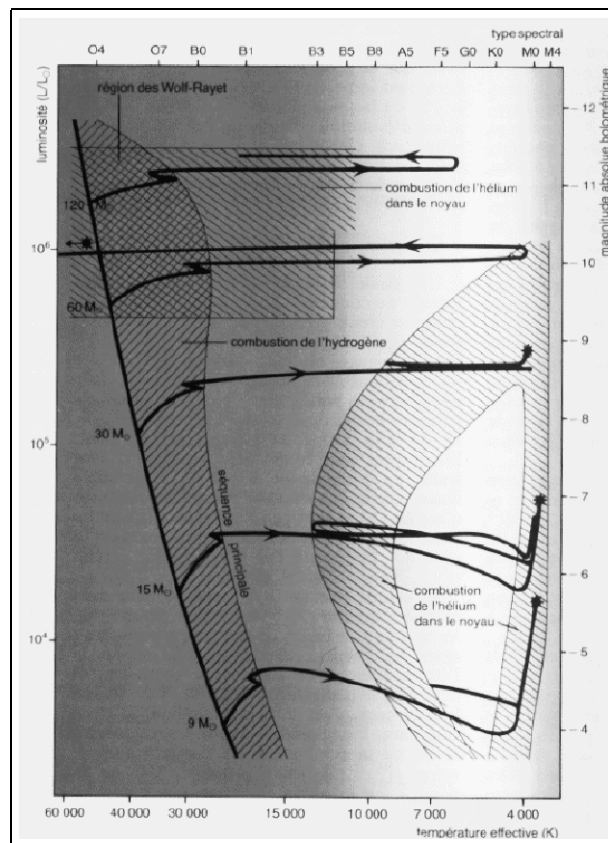


FIG. 17 – Diagramme HR des étoiles de Wolf-Rayet.

Sachant qu'il n'y a qu'une étoile sur un million qui peut avoir une telle masse, il est clair que ces phénomènes ne courent pas les galaxies. Et ceci, d'autant plus que la durée de leur existence est des plus brèves du fait de leur masse. Avec de telles masses, l'étoile devient instable à la moindre oscillation.

Il est à noter qu'au delà de $100 M_{\odot}$, la pression de radiation sera toujours supérieure à la gravité de l'étoile et cette dernière se trouvera sans arrêt en situation de déséquilibre car les réactions nucléaires produisent des métaux lourds en son cœur.

Ces monstres constituent les éléments typiques des Wolf-Rayet les plus brillantes. Leurs pertes de masse sont impressionnantes et leur confèrent de spectaculaires enveloppes gazeuses aux volutes colorées.

5.6 Êta Carinæ, un phénomène hors paire :

Ces étoiles constituent les éphémères feux d'artifices que les galaxies sont susceptibles d'engendrer. **Le représentant typique** de ces monstres **est sans conteste Êta Carinæ**. Voici l'histoire de cette étoile hors du commun. À la fin des années 1830, cet astre était devenu la deuxième étoile la plus brillante du ciel avant que son éclat ne baisse 20 ans plus tard.

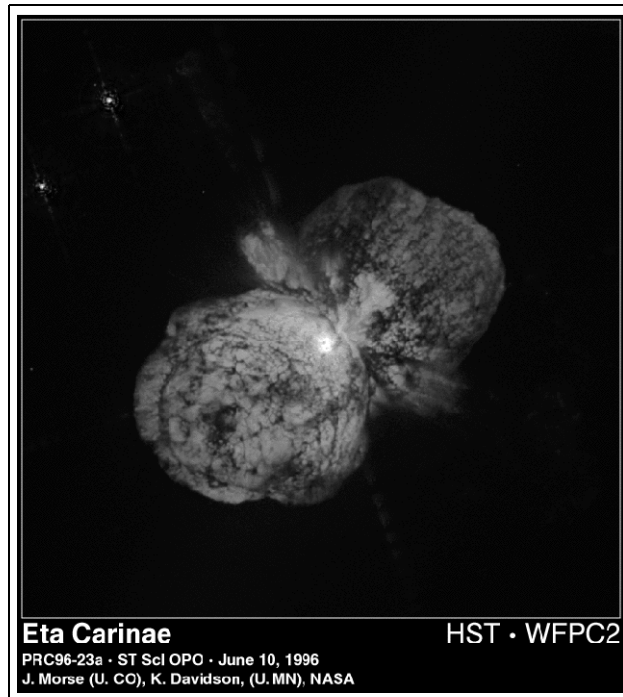


FIG. 18 – *L'homuncule vu par le télescope spatial Hubble.*

Sur les photos, on remarque les deux énormes lobes nommés *l'homuncule* qui datent de la période de 1840 où une éjection de 2 à 3 M_{\odot} avait eu lieu (voir figure 17).

Êta Carinæ est l'astre de tous les excès. Elle est soupçonnée d'être composée par un couple d'étoiles qui pèsent 64 à 68 M_{\odot} pour l'un et 65 à 71 M_{\odot} pour l'autre. Tout ceci tournant dans un mouchoir de poche puisque les deux astres tiennent dans l'orbite d'Uranus. Par ailleurs, son rayonnement infrarouge est le plus intense de notre galaxie !

Plusieurs explications permettent de décrire le comportement de ces monstres. Certains astronomes penchent pour des mécanismes de pression de radiation⁶ interne, d'autres privilégient des phénomènes de turbulence, d'autres enfin pensent que seul un couple d'étoiles peut produire de tels cataclysmes.

Cependant, le modèle du système binaire ne résout pourtant pas le problème. En effet, la friction des vents stellaires provenant de chacune des étoiles ne suffirait pas à expliquer l'explosion de 1843. Seule une interaction beaucoup plus violente le permettrait, comme l'arrachement de matière de l'une par l'autre. Ceci aurait alors suffisamment perturbé la victime pour la destabiliser et provoquer chez elle une crise majeure.

6. Voir la définition dans le glossaire.

Aujourd'hui, les deux lobes de gaz continuent de se déployer sur 4 000 à 5 000 milliards de kilomètres avec une vitesse de 600 km.s^{-1} . Au final, toutes deux deviendront en quelques 500 000 ans une étoile à neutrons lors d'une explosion fatale.

6 Observation de l'évolution stellaire :

6.1 La température des étoiles :

Nous pouvons tous observer dans le ciel que les étoiles n'ont pas les mêmes couleurs : cela est une indication sur leur température. Cette dernière nous donne une bonne idée de la phase que traverse l'étoile ainsi que son gabarit⁷. Voici trois exemples représentatifs.

- Notre *Soleil* :

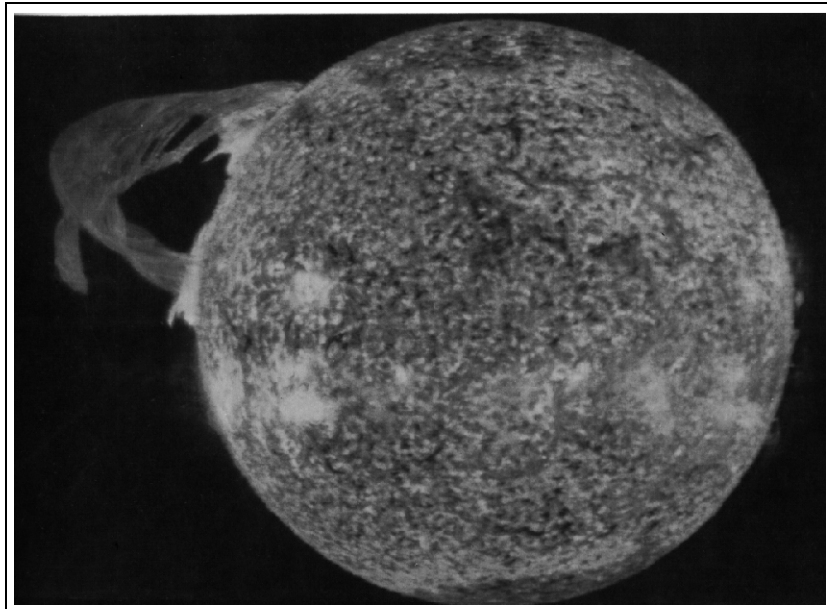


FIG. 19 – Photo du Soleil où sa couleur jaune rayonne.

La couleur jaune caractéristique des étoiles naines se remarque bien. Notre Soleil entre tout juste dans le dernier tiers de sa vie⁸ où il continue de brûler son hydrogène. Il se trouve donc sur la séquence principale et la suite de sa destinée correspond au cas des étoiles de masse comprise dans $0.5 M_{\odot} < M < 2.25 M_{\odot}$.

- *Aldébaran* la rougeoyante :

7. Il est clair qu'une étoile type naine ne pourra jamais avoir une couleur bleue, synonyme de chaudière galactique.

8. La durée de vie du Soleil, compte tenue de sa masse, est estimée à 15 milliards d'années.

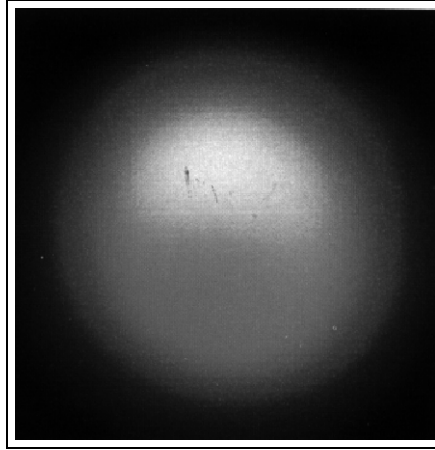


FIG. 20 – Sa couleur rouge caractéristique se remarque dans le ciel hivernal.

Avec ses $7 M_{\odot}$ et sa température d'environ 4 000 Kelvin, à n'en pas douter, **c'est une géante rouge**. D'ailleurs, sa classe spectral K5 et sa couleur rouge-orangée que l'on peut observer durant les longues nuits d'hiver ne nous trompent pas.

Cette étoile a quitté la séquence principale pour gonfler jusqu'à $22 R_{\odot}$ et finira en NP. Cependant, attention à ne pas confondre avec ce qu'est Antarès qui elle fait $320 R_{\odot}$ et pèse 10 à $15 M_{\odot}$ et est donc une supergéante rouge !

- *Rigel*, la gigantesque :



FIG. 21 – Le bleu frappant des Pléiades.

Ses $250 R_{\odot}$ et sa couleur bleue lui confèrent sans ambiguïté le statut de **supergéante bleue**. Par ailleurs, son type spectral B8 la positionne bien dans la partie supérieure gauche du diagramme HR. Peut-être nous donnera-t-elle une étoile de Wolf-Rayet ?

Les Pléiades sont aussi un très bel exemple de supergéantes bleues où l'on peut même y voir le reste de la nébuleuse gazeuse qui leur a donné naissance.

6.2 Les étoiles Be :

Leur observation pourrait se borner à constater leur variabilité mais le plus spectaculaire se manifeste dans leur spectre. Il est donc nécessaire de posséder un spectromètre ainsi qu'un support d'acquisition, en l'occurrence une caméra CCD.

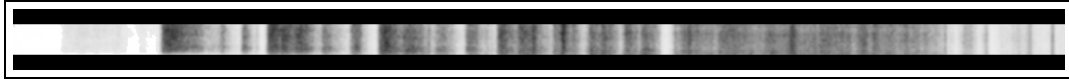


FIG. 22 – Spectre d'une étoile normale de type M : présence de raies d'absorption.

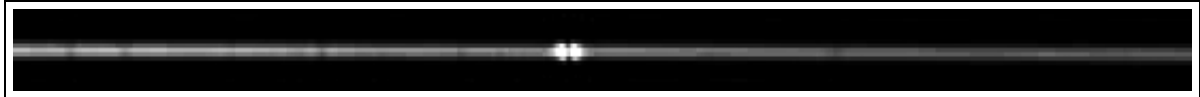


FIG. 23 – Spectre d'une étoile Be (HD 193 182) : raie d'émission d' H_{α} .

Les victimes privilégiées seront celles dont le spectre varie rapidement. Voici une petite liste des proies possibles :

| Étoile | Constellation | Spectre | Remarque |
|--------------|---------------|----------|----------|
| γ Cas | Cassiopee | B0 | multiple |
| ω Ori | Orion | B3 | variable |
| ν Gem | Gémeaux | B5 | multiple |
| HD 168 957 | Hercules | B3 | |
| HD 171 780 | Lyre | B6 | |
| σ Her | Hercule | B9-A0 | double |
| HD 171 406 | Lyre | B5 | |
| 66 Oph | Ophiucus | B2 | variable |
| 88 Her | Hercule | B7 | variable |
| 12 Vul | Flèche | B2 | variable |
| HD 162 428 | Hercules | B7-A0 | |
| 25 Cyg | Cygne | B3 | variable |
| HD 174 237 | Dragon | B2-5 var | |
| 4 Her | Hercules | B9 | variable |
| 59 Cyg | Cygne | B1 | multiple |
| HD 199 356 | Cygne | B0 | |

L'allure classique d'un spectre d'étoile est caractérisé par une série de raies d'absorption sur un continuum. Tandis que pour les étoiles Be, le spectre observable comporte une voire deux raies en émission.

6.3 Les nébuleuses planétaires :

Les NP recèlent de mille et une formes mais toutes représentent la douce fin des étoiles en deça de $8 M_{\odot}$. Ci-dessous, quelques exemples aux formes variées :

- NGC 6826, dite *Blink nebula*:

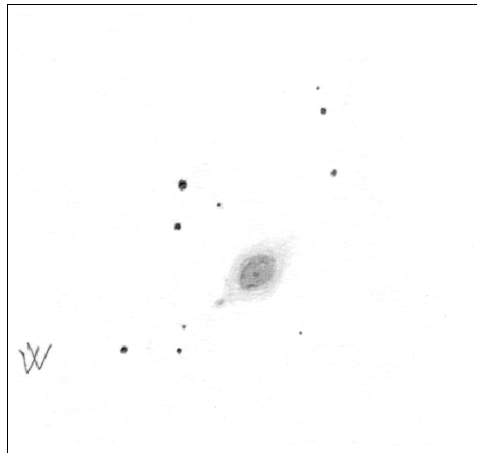


FIG. 24 – NGC 6826 au T450×260, La Sinne (13, France).

“Blinky” est une NP très lumineuse au teint bleu-verdâtre et possède des détails de structure accessible à 250×. On y distingue une forme ovale entourant la brillante centrale, qui se superpose à une plus faible enveloppe ronde terminée aux extrémités équatoriales par deux petites nodosités.

NGC 6826 doit son nom au phénomène de clignotement observé à faible grossissement qui apparaît lorsque l’on regarde successivement la centrale puis la nébulosité.

- NGC 6302, alias *la nébuleuse du Papillon*:

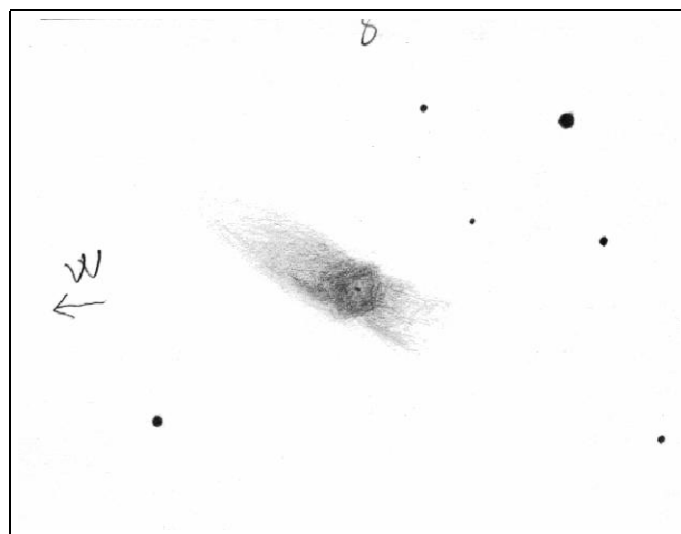


FIG. 25 – NGC 6302 au T450×260 OIII, Riboux (13, France).

Cette NP est un bon exemple de la diversité des formes que l'on peut rencontrer dans les NP. Sa structure bipolaire est probablement due à l'intense champ magnétique de l'étoile moribonde ou au fait que la centrale serait en réalité une binaire ... L'été, ne manquez pas cette spectaculaire NP du Scorpion.

- NGC 246, la grande :

Située dans Pégase, cette NP est souvent oubliée des amateurs durant la saison hivernale. Pourtant sa beauté n'a d'égale que sa taille de 240" ! Il faut néanmoins un bon ciel ainsi qu'une ouverture de 250-300 pour y déceler des détails.

Sa grande taille indique que le gaz a eu le temps de se dissiper dans le milieu interstellaire et donc que NGC 246 est une vieille NP qui ne tardera pas à se dissoudre totalement dans l'espace.

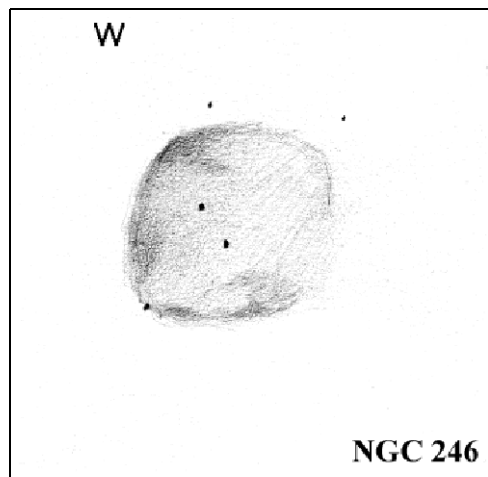


FIG. 26 – NGC 246 au T630×200 et OIII, Montagne de Lure (04, France).

6.4 Les étoiles de Wolf-Rayet :

Voici deux spécimens de WR, un pour l'hiver et un pour l'été.

- La spectaculaire NGC 2359 dite *Casque de Thor* :

Aussi appelée nébuleuse du Sifflet, NGC 2359 nécessite le filtre UHC pour bien se détacher du fond du ciel. On remarque bien les volutes gazeuses enlaçant le bulbe au centre duquel réside l'étoile HD 148 937. La masse gazeuse est estimée à 20 M_{\odot} .



FIG. 27 – NGC 2359 au T450×150 et UHC, La Sinne (13, France).

- NGC 6888, la nébuleuse du Croissant:

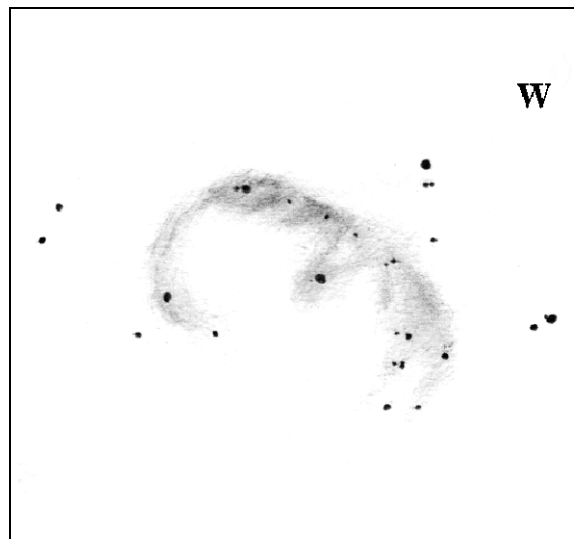


FIG. 28 – NGC 6888 au T450×150 et UHC, Ceillac (05, France).

C'est une très jolie nébuleuse de la constellation du Cygne. Située au milieu d'un champ stellaire riche, on peut y observer à l'aide d'un filtre UHC des condensations formant un grand arc avec une bande centrale se superposant à l'étoile de Wolf-Rayet (SAO 69611 de classe F5) qui lui a donné naissance. C'est un objet à ne vraiment pas manquer.

D'autres objets comme NGC 7635, NGC 6164-5 ou encore IC 2220 sont des Wolf-Rayet qui sont souvent spectaculaires sur les photographies.

6.5 Les supernovæ :

Malheureusement, les SN sont rares et seules quelques unes sont encore visibles de nos jours. Ceci s'explique par la faible fréquence des naissances des étoiles massives.

- M1, *le Crabe* :

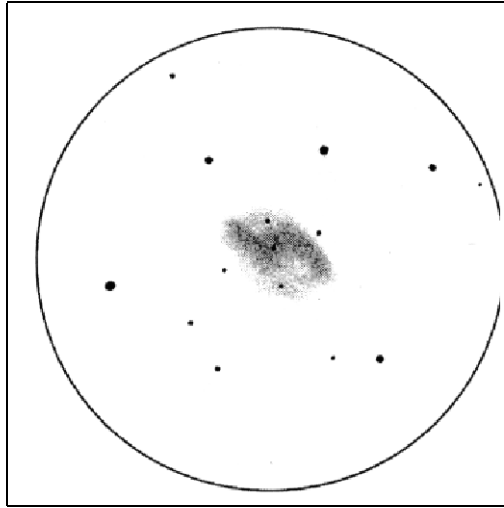


FIG. 29 – M1 au T200×100-250, Montredon par Emmanuel Pelegrin.

Apparaissant souvent assez floue, elle nécessite un T250 et peu de turbulence pour pouvoir y discerner quelques détails. Sur les photos, on distingue bien les filaments témoignant de la violence de l'explosion finale. Cette SN datant de l'an 1054 héberge un pulsar preuve de la présence d'une étoile à neutrons rayonnant dans le domaine des rayons X.

On dénombre au total 8 résidus de SN dont une partie n'est visible que dans les ondes radio. Les dates historiques sont : -3 300 AJ, 185, 386, 1 006 (SN du Scorpion), 1 054 (SN du Crabe), 1 181, 1 572 (Stella Nova de Cassiopée) et 1 604 (SN de Kepler dans Ophiucus).

- Les enivrantes *Dentelles du Cygne* :

Cette nébuleuse est l'une des plus belles du ciel de part sa taille et de part les détails que l'on peut y voir. Lors de chaque observation de l'été, je ne manque pas de faire un détour par le Cygne pour y contempler les volutes de ce rémanent de SN.



FIG. 30 – *Dentelles du Cygne au T500×160, Restefond (05) par Gilles Meuriot.*

7 Conclusion :

Toutes les étoiles ne possèdent pas une vie paisible comme celle du Soleil actuellement. Parfois le tumulte, voire la violence viennent animer les plus massives d'entre elles mais le principe reste simple et épicurien : plus il y a de matière, plus elles vont vivre intensément.

Cependant, même le Soleil subira des pulsations qui signeront les derniers soubresauts de notre astre roi.

Mais en finissant de la sorte, toutes les étoiles offrent à la galaxie, en guise de dernière volonté, la matière qu'elles ont généré au cours de leur vie.

8 Annexes :

8.1 Origine des classes d'étoiles :

Dans le diagramme HR, les classes de luminosité sont caractérisées par des différences spectrales :

- Les étoiles naines présentent des raies bien plus larges que celles des géantes dont la densité est faible. Leur densité plus importante induit une pression interne plus importante qui provoque plus de chocs entre les atomes ;
- Pour une température ou un type spectral donné, l'atmosphère d'une géante sera plus ionisée que celle d'une naine. Ceci est dû au fait que la probabilité qu'un électron provenant d'une ionisation entre en collision avec un autre ion est d'autant plus petite que la densité est faible ;

Ces critères permirent de repérer les étoiles faisant partie d'une catégorie plutôt qu'une autre.

8.2 Les produits de la nucléosynthèse :

| Type de fusion | Produits | T ° (K) | Masse minimale (M _☉) |
|----------------|------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| de H | He | 1 – 3.10 ⁷ | 0.1 |
| de He | C, O | 2.10 ⁸ | 1 |
| de C | O, Ne, Na, Mg | 8.10 ⁸ | 1.4 |
| de Ne | O, Mg | 1, 5.10 ⁹ | 5 |
| de O | Mg→S | 2.10 ⁹ | 10 |
| de Si | éléments ≤ au Fe | 3.10 ⁹ | 20 |

8.3 Récapitulatif de l'évolution selon la masse :

- **M < 0.01 M_☉** : planète

Comme Jupiter, avec un cœur inerte et magmatique.

- **0.01 M_☉ < M < 0.085 M_☉** : naine brune

Il n'y a pas de combustion nucléaire stable de l'hydrogène bien que l'énergie gravitationnelle engendre une augmentation de la température. Ces objets ont un intense rayonnement dans l'infrarouge.

- **0.085 M_☉ < M < 0.8 M_☉** : naine légère

Assez chaude pour brûler l'hydrogène, elles mèneront une vie paisible sur la SP pendant plusieurs dizaines de milliards d'années sans passer par l'état de géante rouge. Autant dire que leur fin n'est pas observable.

- **0.8 M_☉ < M < 1.2 M_☉** : naine jaune (le Soleil)

À la suite de la combustion de l'hydrogène, la masse est alors suffisante pour brûler l'hélium en carbone durant une phase de géante rouge. Le chemin suivi sera celui de notre Soleil.

- **$1.2 M_{\odot} < M < 2.25 M_{\odot}$** : les géantes

La température est telle que l'étoile est partiellement dégénérée. La combustion de l'hydrogène se fait alors via le cycle CNO tandis que la réaction de fusion de l'hélium sera explosive : c'est le flash de l'hélium.

- **$2.25 M_{\odot} < M < 5-7 M_{\odot}$** :

Les électrons ne sont pas dégénérés et l'étoile ne présente pas de flash de l'hélium.

- **$5-7 M_{\odot} < M < 8-10 M_{\odot}$** :

La combustion de l'hélium sera ici suivie par une dégénérescence électronique totale. Selon les pertes de masses, l'étoile finira soit en naine blanche, soit en étoile à neutrons.

- **$8-10 M_{\odot} < M < 12 M_{\odot}$** :

L'évolution de l'étoile devient plus tumultueuse une fois quittée la SP. Le rayon stellaire prend d'énormes dimensions et le flash du carbone marque l'effondrement en EN.

- **$12 M_{\odot} < M < 30 M_{\odot}$** :

L'étoile deviendra une supergéante rouge puis implosera en supernova.

- **$30 M_{\odot} < M < 60 M_{\odot}$** :

Ces astres sont très sensibles à l'influence de la métallicité. Les pertes de masse pourront alors être importantes et donner naissance à une étoile de Wolf-Rayet.

- **$60 M_{\odot} < M < 150 M_{\odot}$** :

Seule une étoile sur un million peut avoir une telle masse. Ces monstres seront constamment en déséquilibre et subiront d'énormes soubressauts convectifs à la durée de vie très brève (quelques millions d'années).

8.4 Table des indices de couleurs et de température :

| | B-V | T ° (K) | Type spectral |
|-------|-------|---------|---------------|
| U-V | -0.32 | 47 000 | O5 |
| Bleu | -0.29 | 30 300 | B0 |
| | -0.16 | 15 300 | B5 |
| Blanc | 0.00 | 9 410 | A0 |
| | +0.14 | 8 210 | A5 |
| | +0.43 | 6 560 | F5 |
| Jaune | +0.66 | 5 780 | G5 (Soleil) |
| Rouge | +1.61 | 3 260 | M5 |

8.5 Classes d'étoiles variables :

Récapitulation de la place de chaque de classe de variables dans la vie des étoiles :

| Classe | Période (jrs) | Type spectral | Masse (M_{\odot}) | Position dans l'évolution |
|-----------------------|---------------|---------------|-----------------------|--|
| δ Scuti | 0.02 à 0.2 | A2 à F2 | 2 | naines sortant de la SP |
| AI Velorum | 0.02 à 0.2 | A2 à F2 | 0.5 | sous-naines sortant de la SP |
| W Virginis | 5 à 40 | F2 à G8 | ~ 1 | combustion de He ; présence de métaux |
| Céphéides | 1.5 à 50 | F6 à K2 | ~ 3.7 à 14 | supergéante en fin de vie |
| RR Lyræ | 0.25 à 1 | A2 à F2 | 1 | combustion de He sur la branche AGB avec vents |
| VLP (rouge) | 30 à 1000 | M, R, N, S | $\leq 8 M_{\odot}$ | géante rouge en fin d'évolution (OH/IR) |
| VSR | ~ 100 | M | ~ 1 | naine rouge vieillissante |
| RV Tauri | 40 à 150 | F5 à K5 | $\leq 8 M_{\odot}$ | géante (jaune-rouge) de la bande d'instabilité |
| β Canis Majoris | 0.1 à 0.3 | B0 à B3 var. | 15 | étoiles massives sortant de la SP |
| R Coronæ Borealis | ~ 100 | F | $\geq 10 M_{\odot}$ | supergéante à leur maximum brûlant He |

Nombre de variables de population II contenu dans des types d'amas globulaire :

| Spectre de l'amas | Composition en métal | RR lyræ | W Virginis | RV Tauri | Var. semi-régulière | Var. longue période |
|-------------------|----------------------|----------|------------|----------|---------------------|---------------------|
| A5 à A9 | très pauvres | 7.7 | - | - | - | - |
| F3 à F5 | pauvres | 21.4 | 1.38 | 0.25 | - | - |
| F6 à F9 | moins pauvres | 60.7 | 1.71 | 0.14 | 0.43 | 0.29 |
| G0 à G3 | proche de la normale | 0.3 | 0.83 | 0.33 | 0.50 | 0.50 |
| Période | (jours) | 0.25 à 1 | 5 à 40 | > 40 | $\simeq 100$ | 100 à 700 |

9 Glossaire :

Classe de luminosité : Classification stellaire selon la luminosité et le spectre, en relation avec la densité et le rayon stellaire.

Cycle CNO : Dite aussi réaction triple alpha, cette réaction nucléaire transforme 4 noyaux d'hydrogène ($4p$) en 1 atome d'hélium ($2p+2n$) avec comme catalyseur le carbone. Ce dernier se transformera en isotope de l'azote et de l'oxygène puis retrouvera son état initial. Cette réaction exige une température supérieure à 4.10^6 K.

Dégénérescence : État de la matière condensée par la contraction de l'étoile où les électrons se trouvent forcés d'occuper le même état quantique (ici, le plus bas) malgré le principe d'exclusion de Pauli. Les électrons sont alors animés d'un mouvement très rapide pour tenter de respecter ce principe et créent alors une sorte de pression qui met un terme à l'action de la gravitation.

Étoiles symbiotiques : Nom donné au compagnon le plus froid d'un couple constitué d'une étoile rouge de type M associée avec un partenaire plus dense (une NB) tournant lentement en une centaine de jours. Leur nom provient du fait que les raies d'émissions possèdent un haut degré d'excitation alors que la température de l'astre (M) est plutôt basse.

Étoiles Be : Étoiles de type spectral B mais possédant d'étonnantes raies d'émission au profil variable dans le temps.

Étoile à neutron : Étoile hypothétique en fin d'évolution, de densité très élevée (km/cm^3), composée entièrement de neutrons. Elles peuvent être observées sous forme de pulsar.

Géante : Étoile à grande luminosité, à rayon important et de densité faible.

Géante rouge : Étape de l'évolution stellaire correspondant à la phase d'équilibre d'une étoile provenant de la séquence principale (diagramme HR). C'est le chemin que suivent les étoiles de masse inférieure à $8 M_{\odot}$.

Nébuleuse planétaire : Nébuleuse résultant de l'expulsion des couches externes d'étoiles arrivées au stade de géantes rouges. Leur ressemblance avec le disque coloré des planètes vues au télescope leur ont valu ce nom par William Herschel au XVIII^e siècle. L'excitation des gaz par le rayonnement UV de l'étoile centrale en effondrement leur permet d'être visible.

Naine : Étoile appartenant à la séquence principale (classe de luminosité V), de densité et rayon comparable à ceux du Soleil.

Naine blanche : Étoile en fin d'évolution issue de géant ayant une masse de 0.08 à $7 M_{\odot}$. Leur rayon est d'environ $10\,000$ km pour une masse de $1 M_{\odot}$ et leur masse volumique avoisine la tonne par centimètre cube.

Nova : Étoile dite "nouvelle" car présentant une brusque et importante recrudescence d'éclat.

Pression de radiation : Force exercée par les photons créée par les réactions nucléaires de l'étoile sur la matière qu'il rencontre lors de son cheminement à travers l'astre.

Wolf-Rayet (étoile) : Classe d'étoiles très chaudes, entourées d'une enveloppe gazeuse éjectée à grande vitesse, produisant un spectre caractéristique de raies d'émission.

HR (Hertzsprung-Russel) diagramme : Diagramme reliant la magnitude absolue (luminosité) au type spectral (température) et permettant de repérer le cheminement d'une étoile au cours de sa vie.

Pulsar : Étoile à neutron dont l'axe de ses pôles magnétiques s'aligne périodiquement avec la direction de visée de la Terre. Ceci est dû à la rotation (généralement autour d'un axe différent) de l'étoile moribonde. Elle émet par ses axes polaires un rayonnement radio qui est caractéristique.

Supernova : Explosion violente d'étoile arrivée au stade de supergéante rouge au cours de laquelle une fraction importante de la masse de l'étoile est projetée dans l'espace avec formation de métaux lourds et de rayonnement X. Il y a deux origines aux supernovæ donnant lieu aux types AI et AII.

Type spectral : Classification stellaire d'après les caractéristiques du spectre, en relation avec la température de l'étoile.

10 Bibliographie :

Références

- [1] Louis d'HENDECOURT. *Cours d'astrophysique*. Supélec, 1992.
- [2] Agnès ACKER. In *Les Nébuleuses Planétaires*, number 72 in Les Cahiers Clairaut, Hiver 1995-96.
- [3] Agnès ACKER. *Astronomie Introduction*. Masson, 1992.
- [4] Agnès ACKER. La tempête avant la mort douce. In *La saga des étoiles*, number 8 in Ciel et Espace No spécial, 1995.
- [5] Lawrence H. ALLER. *The Planetary Nebulæ*. Sky and Telescope Monographic Series, 1965.
- [6] Stuart CLARK. *L'astrophysique/Stars and atoms*. France loisirs/Andromeda Oxford Ltd, 1995.
- [7] Philippe COTARDIÈRE de la. *Astronomie*. Larousse, 1991.
- [8] Michèle GERBALDI. In *L'évolution des étoiles*, Le grands atlas Universalis de l'astronomie. Encyclopædia Universalis, 1990.
- [9] Steven J. HYNES. *Planetary Nebulæ*. Willmann-Bell, 1991.
- [10] James KALER. *Les étoiles : vie et mort des soleils lointains*. Pour la Science, 1992.
- [11] Benjamin MAUCLAIRE. In *Cendres d'étoiles*, Conférences mensuelles. AAAOV, janvier 1997.
- [12] Jean-Claude PECKER. *La nouvelle astronomie*. Hachette, 1971.