

**Société Astronomique de Bourgogne**

# **LES ETOILES**



# INTRODUCTION

L'univers fascine les hommes depuis des dizaines de milliers d'années. Pour trouver des repères dans cet univers immense et inconnu, il cherche à donner une explication aux différents phénomènes qu'il observe. Les mythes et les légendes lui permettent ainsi de doter l'univers d'une histoire et d'une structure.

Quelle est la place des étoiles dans l'immense structure de l'univers ?

Pendant des siècles, les hommes pensent que les étoiles sont toutes fixes les unes par rapport aux autres et qu'elles sont situées sur une voûte à une même distance de la terre. Leur éclat est dû au matériau brillant qui les compose. Leur existence, leur disposition et leur mouvement sont l'œuvre des dieux et il y a donc nécessairement une cohérence dans la disposition des astres. Les dessins, formés par les étoiles dans le ciel et qui illustrent leurs croyances, sont appelés « constellations ».

Les hommes observent et enregistrent le mouvement des constellations dans le ciel : ils s'en servent pour rythmer les saisons, annoncer les cultures ou s'orienter en mer.

Avec l'apparition des mathématiques dans l'antiquité, les hommes comprennent que les étoiles sont à des distances gigantesques. Mais ces distances les empêchent d'en savoir plus. Ils se contentent de les répertorier et c'est Hipparque qui crée le premier catalogue d'étoiles.

Au 18<sup>ème</sup> et 19<sup>ème</sup> siècle, les technologies font un bon en avant, la puissance des télescopes augmente et donc la précision des mesures. Les découvertes s'enchaînent et permettent d'expliquer les principales caractéristiques des étoiles :

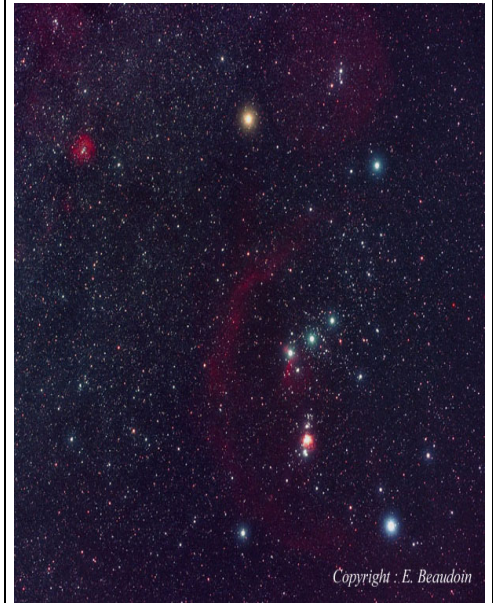
- mouvement et distance
- luminosité et couleur
- composition chimique
- taille et masse

Au 20<sup>ème</sup> siècle, l'étude du fonctionnement des étoiles permet de découvrir les différents mécanismes qui engendrent leur naissance, régissent leur vie et provoquent leur mort.

## Résumé :

- ⇒ **Pendant des siècles, les hommes considèrent que les étoiles sont constituées d'un matériau brillant et qu'elles sont fixes, placées sur une voûte, à des distances gigantesques. Les dessins qu'elles forment dans le ciel symbolisent leurs croyances et sont appelés constellations.**
- ⇒ **Il faut attendre le 19<sup>ème</sup> et le 20<sup>ème</sup> siècle, avec l'avènement de l'astrophysique, pour accéder à la compréhension des caractéristiques et du fonctionnement des étoiles.**

## Etoiles de la constellation d'Orion :



Copyright : E. Beaudoin

# MOUVEMENT ET DISTANCE

## Mouvement des étoiles

Jusqu'au milieu du 18<sup>ème</sup> siècle, les astronomes pensaient que les étoiles, autre que le soleil, étaient parfaitement immobiles dans le ciel. Cette perception s'accordait très bien avec la vision que l'on avait de l'univers : un univers immuable, fermé par une immense voûte sur laquelle étaient fixées les étoiles.

En 1718, Edmond Halley s'aperçoit que les coordonnées relevées dans l'antiquité ne correspondent pas avec celle qu'il trouve. Il vient de découvrir que les étoiles ne sont pas fixes et qu'elles peuvent se mouvoir les unes par rapport autres. Chaque étoile est donc animée d'une vitesse dans l'espace. Par exemple, le soleil se déplace à plus de 200 km/s, soit plus de 700 000 km/h !

Mais les étoiles sont si éloignées de nous qu'il est impossible, à l'échelle humaine, de détecter leur mouvement.

## Distance des étoiles

Bessel est le premier à mesurer la distance qui nous sépare d'une autre étoile que le soleil. En utilisant la méthode de parallaxe<sup>1</sup>, il parvient à estimer la distance d'une étoile de la constellation du Cygne : il trouve 100 000 milliards de kms. Cette valeur révèle aux astronomes l'immensité de l'univers.

Pour rendre plus facile la manipulation des distances « astronomiques » des étoiles, les astronomes utilisent d'autres unités de mesure. La plus utilisée est « l'année lumière ».

La lumière est une onde qui se propage à la vitesse de 300 000 km/s. La lumière émise par n'importe quel objet met donc un certain temps pour nous parvenir. Ainsi, la lumière du soleil met 8 minutes pour arriver sur terre. La lumière de l'étoile la plus proche, Proxima, distante de 4 années lumière, met 4 années à nous parvenir.

La distance des étoiles est donc exprimée en années qu'il faut à la lumière pour arriver jusqu'à nous. 1 année lumière = 10 000 milliards de kms.

Les autres unités de mesure, utilisées principalement dans les milieux scientifiques, sont :

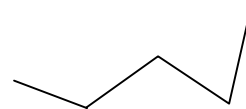
- Ua : unité astronomique. 1 ua = 150 000 000 km = distance de la terre au soleil
- Parsec : il est défini comme étant la distance à laquelle une unité astronomique sous-tend un angle d'une seconde d'arc. 1 parsec =  $3.085 \cdot 10^{13}$  km

## Résumé

- ⇒ Les étoiles se déplacent dans l'univers à des vitesses de plusieurs dizaines de kilomètres par seconde.
- ⇒ Les distances des étoiles sont si importantes que les unités de mesure ont été adaptées : on ne mesure plus en km, mais en années lumière.

## Conséquence du mouvement des étoiles :

Cassiopeée aujourd'hui :



Cassiopeée dans 30 000 ans :



## Appréhender les distances :

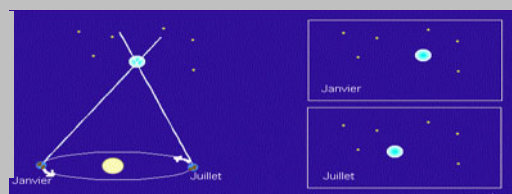
- A 130 km/h, il faudrait 34 millions d'années pour atteindre l'étoile la plus proche, distante de 4 AL. Et il faudrait 27 milliards d'années pour atteindre Deneb, étoile du Cygne, située à 3200 AL de la terre.

- Si nous réduisions le soleil à une boule de 10 cm, alors la terre ferait 1 mm et se placerait à 10 m du soleil. Pour respecter l'échelle, l'étoile la plus proche devrait être placée à Moscou.

## Notes :

### 1. La méthode de parallaxe :

Du fait de la révolution de la Terre autour du Soleil, les observateurs terrestres sont en mouvement. Ainsi, la position apparente d'une étoile proche par rapport au fond constitué par les étoiles plus lointaines change légèrement. Si le petit déplacement angulaire est mesurable, on peut à partir de quelques connaissances géométriques calculer la distance de cette étoile.



# LUMINOSITE, COULEUR ET TEMPERATURE

## Luminosité des étoiles :

Lorsque nous observons les étoiles du ciel, nous nous apercevons que certaines brillent plus que d'autres. Cette luminosité, sous laquelle nous apparaît l'étoile, est appelée, magnitude apparente, notée  $m$ . Cette luminosité dépend de la luminosité intrinsèque de l'étoile, mais aussi de sa distance<sup>2</sup> : ainsi, une étoile très lumineuse et très éloignée de nous, brillera moins qu'une étoile peu lumineuse mais très proche.

La luminosité intrinsèque de l'étoile, qui représente la luminosité réelle de l'étoile est appelée magnitude absolue, notée  $M$ .

Historiquement, c'est Hipparque qui réalisa la première classification des étoiles selon leur luminosité : les étoiles les plus brillantes étaient dites de « première grandeur », donc de première magnitude et les étoiles les moins brillantes de « sixième grandeur », donc de sixième magnitude.

Ainsi donc, plus la luminosité est importante, plus la magnitude est faible.

## Couleur et température des Etoiles :

Lorsque l'on chauffe une lame de métal, elle se met à rougir, puis elle devient jaune et enfin, à très haute température elle nous apparaît bleue. Ainsi donc, il y a un lien entre la température d'un corps et la couleur de la lumière qu'elle émet.

Ce phénomène est identique pour les étoiles : une étoile qui nous apparaît bleue a une température de surface très élevée et une étoile rouge a une température de surface peu élevée.

Pour évaluer de façon précise la température d'une étoile, les astronomes font appel à l'analyse du spectre de la lumière émise par l'étoile.

### Spectre de la lumière :

Lorsque le soleil réapparaît après un orage, sa lumière est décomposée par les gouttelettes contenues dans l'air ambiant : on assiste à un arc-en-ciel. Ce phénomène nous montre que la lumière du soleil est constituée d'un mélange de couleur, d'intensités différentes. Cet ensemble de couleur qui caractérise la lumière est appelé **spectre**. A chacune des couleurs correspond une longueur d'onde.

Toutes les sources lumineuses, donc les étoiles, possèdent un spectre qui leur est propre.

Le physicien Wien, a montré qu'il y a une relation entre la longueur d'onde qui a le maximum d'intensité dans le spectre et la température de l'étoile<sup>3</sup>. L'analyse du spectre de l'étoile permet donc de calculer la température de surface de l'étoile.

### Spectre d'une étoile chaude :

L'étoile émet son rayonnement lumineux dans le bleu : sa température de surface est supérieure à 10 000 K<sup>4</sup>



### Spectre d'une étoile de température moyenne :

L'étoile émet son rayonnement lumineux dans les jaunes/vert : sa température de surface est comprise entre 3500 et 7500 K



A l'œil nu, la limite de visibilité est la magnitude 6, tandis qu'avec le plus puissant des télescopes, on peut atteindre la magnitude 25.

## Magnitude absolue de quelques étoiles :

Soleil : -27

Sirius : -1,5

Bételgeuse : 0

Etoile polaire : 2

Proxima : 13

### Etoiles chaudes :

Spica : 20 000 K

Regulus: 11 000 K

### Etoile de température moyenne :

Soleil : 5 600 K

## Notes :

### 2.Relation entre $M$ et $m$ :

La magnitude apparente dépend de la distance  $d$  de l'étoile :  $M = m + 5 - 5 \cdot \log d$

### 3.Loi de Wien :

Connaissant  $\lambda_m$ , la longueur d'onde du spectre qui correspond au maximum d'intensité lumineuse, la loi de Wien donne la relation entre cette longueur d'onde et la température de l'étoile par la formule  $\lambda_m \cdot T = \sigma$  où  $\sigma$  est une constante.

### 4.Le degré K

Le degré Kelvin (K) est utilisé par les astronomes pour mesurer les températures. 0 K correspond au zéro absolu. 0 K = -273,15 °Celsius.



### Spectre d'une étoile froide :

L'étoile émet son rayonnement lumineux dans le rouge : sa température de surface est inférieure à 3500 K.



### Relation entre Luminosité et Température :

Au début du 20<sup>ème</sup> siècle, E.Hertzsprung et H.Russel découvrent, par deux méthodes différentes, qu'il existe une corrélation entre la luminosité des étoiles et leur température. Cette corrélation est illustrée par un diagramme qui porte le nom des 2 chercheurs : diagramme HR.

Ce diagramme permet de conclure qu'il existe 3 catégories d'étoiles :

#### Les étoiles de la séquence principale :

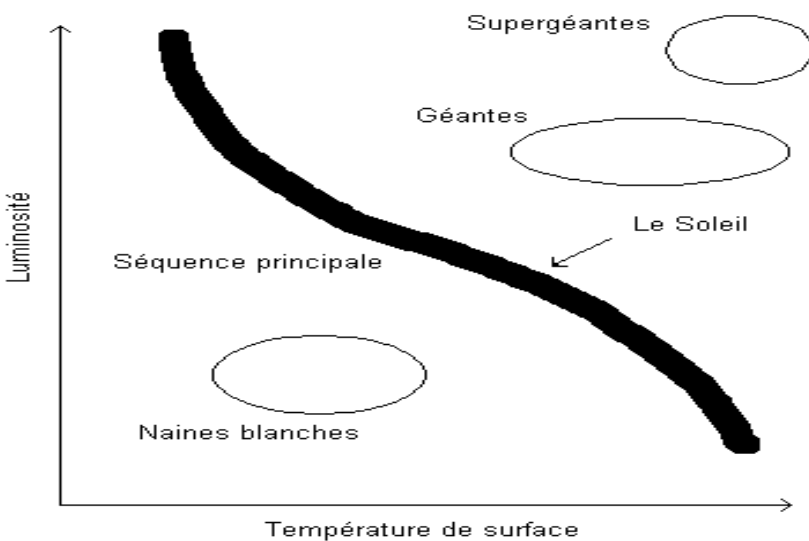
La grande majorité des étoiles se placent sur une grande diagonale, appelée « séquence principale ». La relation entre luminosité et température est une simple relation de proportionnalité : plus l'étoile est lumineuse, plus elle est chaude.

#### Les géantes :

Certaines étoiles, pourtant relativement froides, sont très lumineuses : ce phénomène provient de leur taille exceptionnellement grande : elles sont appelées géantes et même parfois « Supergéantes ». Comme nous le verrons à la fin du document, cet état d'étoile géante, correspond à une phase transitoire d'une étoile en fin de vie.

#### Les naines blanches :

Certaines étoiles sont très peu lumineuses mais de températures relativement élevées. Comme nous le verrons un peu plus loin, ce sont des étoiles en train de s'éteindre.



### Etoiles froides :

Bételgeuse : 3 500 K  
Antares : 2 700 K

### Etoiles de la séquence principale :

Soleil, Procyon, Sirius A, Spica, Altaïr

### Géantes et Super-géantes :

Bételgeuse, Antares, Aldébaran

### Naines :

Sirius B

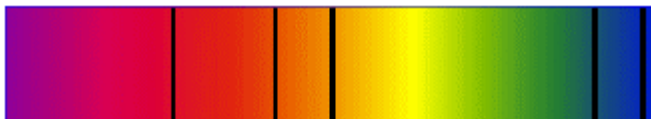
### Résumé :

- ⇒ La luminosité d'une étoile telle que nous la percevons depuis la terre est caractérisée par sa « magnitude ». Par convention, elle est d'autant plus faible que l'étoile est brillante.
- ⇒ La couleur d'une étoile indique sa température : une étoile bleue est chaude. Une étoile rouge est froide.
- ⇒ Pour la plupart des étoiles, luminosité et température sont liées par une relation de proportionnalité. A taille égale, une étoile chaude est lumineuse, une étoile froide est peu lumineuse. Ces étoiles sont dites de la « séquence principale »

# COMPOSITION CHIMIQUE

## Les raies d'absorption du spectre :

Si l'on regarde plus en détails les spectres présentés au chapitre précédent, on s'aperçoit que les couleurs du spectre peuvent être entrecoupées de bandes noires. En schématisant, on obtient un spectre similaire à celui présenté ci dessous :



Ces bandes noires indiquent qu'il manque plusieurs couleurs dans le spectre. Tout se passe comme si ces couleurs n'avaient pu être transmises, ou comme si elles avaient été « absorbées » par quelque chose.

Au milieu du 19<sup>ème</sup> siècle, Kirchhoff montre que si l'on place un gaz de sodium devant un faisceau de lumière, une bande sombre apparaît sur le spectre. Le gaz a donc « absorbé » la couleur.

Si l'on place un autre gaz, par exemple un gaz d'hydrogène, une autre bande va apparaître, à un autre endroit dans le spectre.

**Conclusion :** les raies sombres des spectres indiquent qu'un gaz a absorbé la couleur correspondante. On les appellent « raies d'absorption » du spectre. La position de ces raies dépend de la nature chimique du gaz.

## Application aux propriétés chimiques des étoiles :

Les bandes sombres présentes dans les spectres des étoiles indiquent que leur lumière a traversé des couches de gaz. Les 2 couches de gaz traversées sont principalement :

- l'atmosphère terrestre
- la couche de gaz qui entoure l'étoile

Si l'on enlève les bandes sombres qui correspondent à l'atmosphère, on a accès à la composition chimique de l'enveloppe gazeuse de l'étoile.

L'analyse des spectres des étoiles montre que la composition chimique de l'étoile dépend essentiellement de sa température. A la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, les astronomes ont donné une classification des étoiles selon leur type spectral :

Type	Température (K)	Raies caractéristiques	Exemple
O	> 20 000	Hélium fort, Hydrogène faible	$\theta$ orionis
B	10 000 << 20 000	Hélium diminue, Hydrogène augmente	Regulus
A	7000 << 10 000	Hydrogène fort, Hélium faible	Sirius
F	6000 << 7000	Hydrogène diminue, calcium apparaît	Polaris
G	4800 << 6000	Hydrogène diminue, calcium augmente	Soleil
K	3100 << 4800	Calcium intense et métaux apparaissent	Aldébaran
M	2000 << 3100	Titane	Bételgeuse

## Résumé :

- ⇒ Les raies d'absorption du spectre des étoiles permettent de déterminer leur composition chimique.
- ⇒ La composition chimique d'une étoile dépend de sa température.

B :



A :



F :



G :



K :



M :



# TAILLE ET MASSE

## Taille des étoiles :

En 1879, le physicien J.Stephan énonce la loi mathématique qui lie la luminosité d'un corps de surface donnée avec sa température<sup>5</sup>. Connaissant la température de surface de l'étoile, on pouvait utiliser cette loi pour calculer la luminosité totale émise par une portion de surface donnée. Il suffisait alors de comparer ce résultat à la luminosité absolue, émise par le corps dans son ensemble, pour obtenir la surface de l'étoile, donc également sa taille.

Cette loi a d'abord montré que les étoiles de la séquence principale n'ont pas toutes la même taille, mais présentent néanmoins une gamme relativement restreinte. Les étoiles chaudes ont ainsi 10 fois la taille du Soleil, alors que les étoiles froides n'atteignent qu'un dixième de la valeur solaire. Les autres groupes du diagramme HR présentent des tailles très différentes. Les géantes rouges ont entre une dizaine et une centaine de fois la taille du Soleil. Les super-géantes peuvent quant à elles être un millier de fois plus grosses que notre étoile. L'énorme luminosité de ces étoiles est donc liée à leurs dimensions gigantesques. Enfin, les naines blanches sont de manière générale une centaine de fois plus petites que le Soleil, ce qui leur donne une taille similaire à celle de la Terre et explique leur faible luminosité.

## Masse des étoiles :

Celle-ci est beaucoup plus difficile à déterminer car ni les mesures de luminosité ni l'analyse spectrale ne sont d'aucun secours. La seule solution est de recourir à l'astrométrie, la mesure précise des positions stellaires, et de l'appliquer à ce que l'on appelle les systèmes binaires, des couples d'étoiles orbitant l'une autour de l'autre, liées par leur attraction gravitationnelle mutuelle.

Les astronomes utilisent alors la 3<sup>ème</sup> loi de Kepler<sup>6</sup> et calculent la masse totale du couple stellaire. Pour déterminer la masse de chaque étoile, pas seulement celle du couple, il doit encore étudier plus en détail le mouvement relatif des deux membres. Cela lui permet de déterminer la proportion de chacun dans le total du couple et finalement d'obtenir la masse de chaque étoile.

Des études de ce type ont été menées sur de nombreuses étoiles. Elles ont d'abord révélé que chaque groupe du diagramme HR a des propriétés différentes. Dans la séquence principale, l'éventail de masses est assez étendu, depuis moins d'un dixième de la masse solaire jusqu'à plusieurs dizaines de fois celle-ci. Les autres groupes ont une gamme plus limitée. Les super-géantes sont très massives, avec des valeurs de l'ordre de 20 masses solaires, alors que les naines blanches n'ont qu'une masse similaire à celle du Soleil.

La deuxième conclusion importante de ce genre d'étude est la mise en évidence d'une relation entre la masse et la luminosité absolue pour les étoiles de la séquence principale : plus une étoile est massive, plus elle brille. Ainsi, le paramètre principal qui dicte aux étoiles de la séquence principale leur position dans le diagramme HR est la masse. C'est elle qui détermine des propriétés telles que la luminosité et la température de surface.

## Résumé :

- ⇒ **Pour les étoiles de la séquence principale, les étoiles chaudes sont plus lumineuses et plus grande que les étoiles froides.**
- ⇒ **La masse est le paramètre qui détermine les propriétés d'une étoile de la séquence principale : plus sa masse est élevée, plus elle brille, plus elle est chaude, plus elle est grande.**

## Taille de quelques étoiles connues :

Sirius : 2 fois le soleil  
Bételgeuse : 650 fois le soleil  
Arcturus : 70 fois le soleil  
Proxima : 0,15 fois le soleil

## Notes :

### 5.Loi de Stephan :

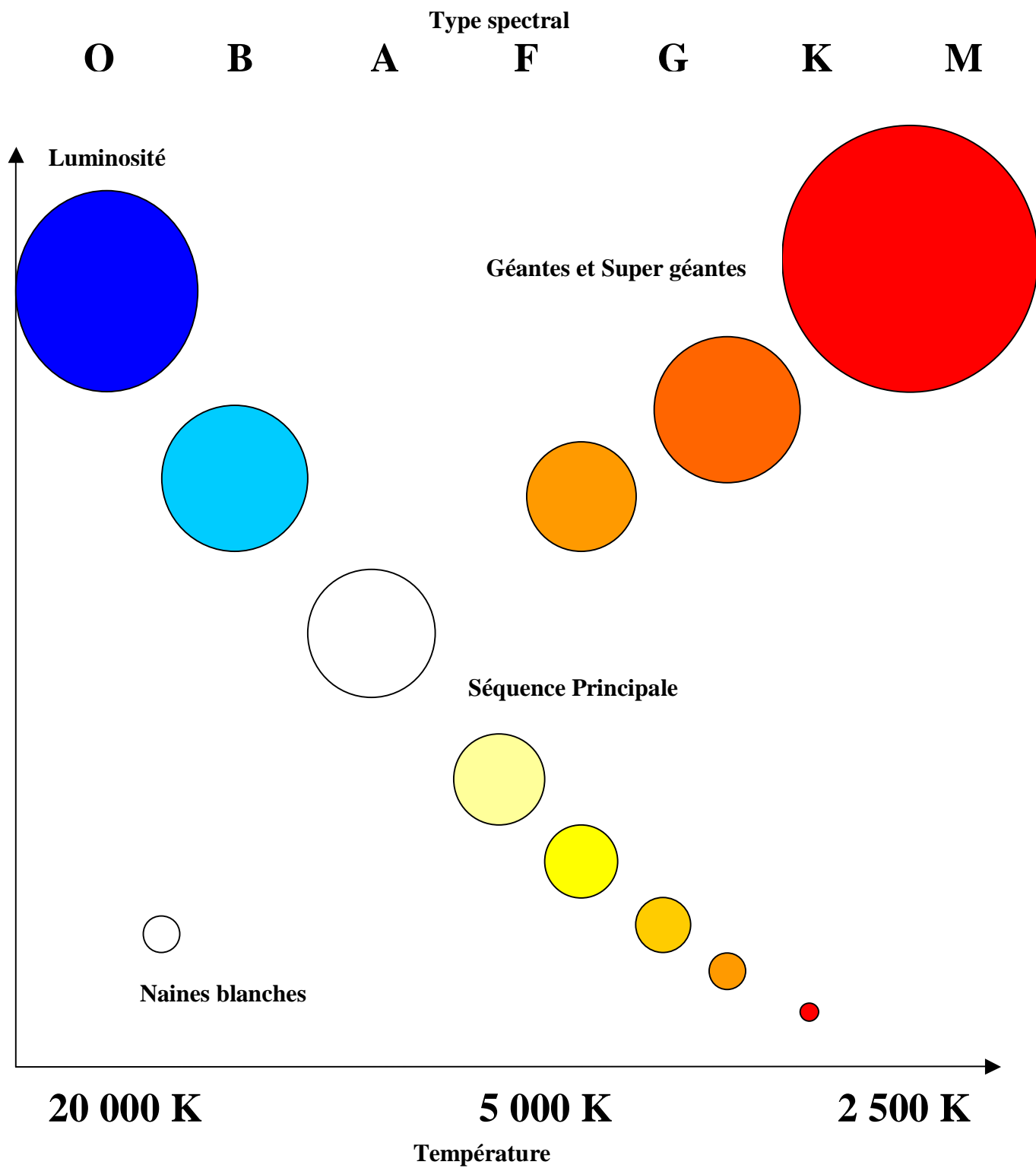
La formule utilisée par les astronomes est  $L = 4\pi\sigma R^2 \cdot T^4$  où L est la luminosité, T la température et R le rayon de l'étoile. L et T sont mesurés lors des observations. On peut en déduire le rayon de l'étoile, donc sa taille.

### 6.Troisième loi de Kepler :

Connaissant la période de révolution T de la terre autour du soleil et la distance d qui les séparent, la 3<sup>ème</sup> loi de Kepler permet d'accéder à la masse du soleil par la relation :  $T^2/d^3 = 4\pi^2/GM_{\text{soleil}}$ , où G est la constante de gravitation. On procède de la même manière pour déterminer la masse des étoiles binaires.

# PROPRIETES DES ETOILES

## Résumé





# FORMATION DES ETOILES

## Les nuages interstellaires :

Il existe dans l'univers de gigantesques nuages de gaz et de poussières. Si aucun événement extérieur n'intervient, ces nuages sont relativement stables. Il y a trois raisons principales à cela :

- Les étoiles proches réchauffent le gaz, ce qui entraîne une agitation des molécules qui le composent. Cette agitation crée une pression interne qui s'oppose à l'attraction gravitationnelle<sup>7</sup>.
- Le nuage n'est pas immobile mais tourne autour de lui-même et possède donc une vitesse centrifuge qui empêche le gaz de converger vers le centre du nuage.
- Le champ magnétique interstellaire contribue aussi à cette stabilité.

## L'effondrement gravitationnel des nuages interstellaire :

Mais lorsque le nuage de gaz est soumis à de fortes contraintes, cet équilibre est rompu et il se contracte et finit par s'effondrer sur lui-même. Les événements qui provoquent l'effondrement gravitationnel d'un nuage de gaz sont les suivants :

- Le nuage passe dans une zone à haute densité de matière : il subit alors une force de compression, qui entraîne le regroupement des molécules de gaz. Les zones les plus denses finissent par attirer le reste du nuage et il s'effondre sous l'action de la gravité.
- Une autre cause possible est l'explosion d'une Supernovae<sup>8</sup>. Ces explosions conduisent au même phénomène : compression, effondrement.

## Naissance de l'étoile :

En s'effondrant, le nuage se fragmente peu à peu et donne naissance à des nuages de plus en plus petit et de plus en plus dense. Lorsque la densité devient trop importante, les nuages ne peuvent plus évacuer leur surplus d'énergie : sa température augmente fortement atteignant plusieurs dizaines de milliers de degrés : ce nuage de gaz, contracté et incandescent est appelé proto-étoile.

Le gaz continue de se contracter et a température augmente de plus en plus. Lorsqu'elle atteint 10 millions de degrés, les réactions thermonucléaire se déclenchent. Ces réactions donnent naissance à une forte pression interne qui s'oppose à la force gravitationnelle. L'étoile se stabilise et commence sa vie sur la séquence principale.

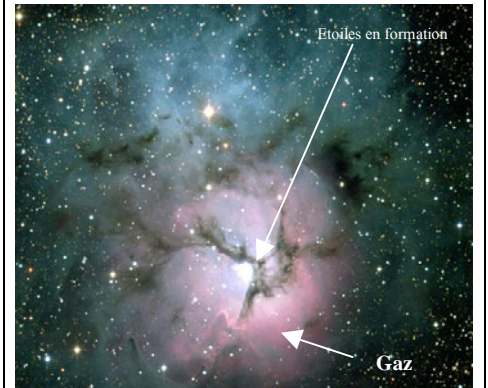
## Résumé:

- ⇒ **Les étoiles naissent de l'effondrement gravitationnel d'un nuage de gaz.**
- ⇒ **L'effondrement entraîne un échauffement du gaz. Lorsque la température atteint 15 millions de degré, les réactions thermonucléaire démarre et l'étoile s'allume.**
- ⇒ **Plusieurs étoiles naissent généralement d'un même nuage de gaz. A la fin du processus de formation, les étoiles sont regroupées et sont parfois entourées des restes du nuage: c'est un amas ouvert.**

## Nuage de gaz interstellaire :



## Etoiles en formation :



## Amas ouvert :



## Notes :

### 7.Attraction gravitationnelle :

Au 17<sup>ème</sup> siècle, Newton démontre que tous les corps s'attirent mutuellement. Cette force d'attraction est appelée force d'attraction gravitationnelle. Elle est proportionnelle aux masses des corps en présence et à l'inverse du carré de la distance qui les séparent.  $F = G \frac{mM}{d^2}$  où G est la constante de gravitation.

### 8.Supernovae :

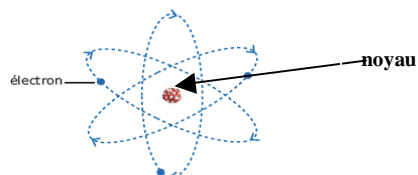
Explosion d'une étoile massive (au moins 3 fois la masse du soleil). Voir chapitre « Mort des étoiles ».

# VIE DES ETOILES

Dans l'antiquité, on pensait que le soleil et les étoiles étaient constitués d'un matériau brillant, source de lumière et de chaleur. Il faut attendre le début des années 1930 pour que les astronomes comprennent la nature de cette source d'énergie : les réactions de fusion nucléaire.

## Composition de la matière :

La matière est composée d'atomes. Ces atomes sont eux-mêmes un assemblage de particules encore plus petites : les protons, les neutrons et les électrons. Les électrons gravitent autour du noyau de l'atome, composée des protons et des neutrons.



## Réaction de fusion :

A très haute température, les particules sont très agitées et les électrons ne peuvent pas s'associer aux noyaux pour former des atomes. Les noyaux sont libres et peuvent se percuter et fusionner. Ainsi, pour une étoile comme le soleil, composée essentiellement d'hydrogène, les noyaux d'atomes d'hydrogène fusionnent pour donner de l'hélium. Il faut que 4 noyaux d'hydrogène fusionnent pour donner 1 noyau d'hélium. Cette réaction est appelée « réaction de fusion nucléaire ».

## L'énergie des étoiles :

Cette réaction possède une particularité de taille : la masse du noyau d'hélium formé est inférieure à la somme des 4 noyaux d'hydrogène : il y a eu perte de masse. Cette énigme sera résolue par les travaux d'A.Einstein et sa célèbre formule  $E=mc^2$ . Cette équation traduit que la masse et l'énergie sont liées et même équivalentes. La matière n'est qu'un cas particulier de l'énergie. L'application de cette équation à notre problème de perte de masse permet de comprendre le processus de fusion et ses conséquences : la masse perdue s'est transformée en énergie : énergie thermique et lumineuse.

## Durée de vie des étoiles :

Pendant des millions d'années, les étoiles transforment l'hydrogène en hélium, par le biais des réactions de fusion. Leur durée de vie dépend de leur masse : Pour une étoile massive, les réactions de fusion sont intenses : l'étoile vit quelques centaines de millions d'années. Pour une étoile peu massive, la durée de vie peut atteindre plusieurs milliards d'années.

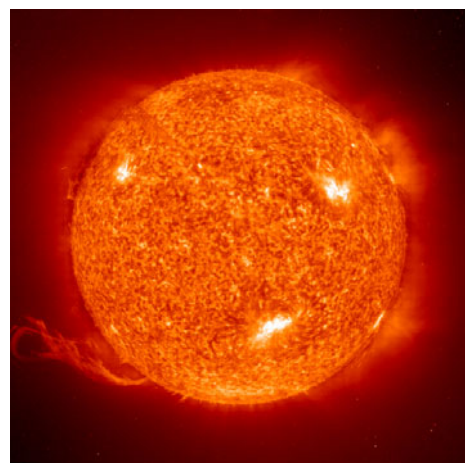
## Résumé :

- ⇒ Une étoile tire son énergie lumineuse et thermique de la réaction de fusion de l'hydrogène en hélium.
- ⇒ Plus une étoile est massive, plus sa durée de vie est courte

## Une gigantesque bombe H :

Les réactions de fusions nucléaires qui se produisent dans le cœur d'une étoile sont les mêmes que celles qui se produisent dans une bombe H.

## Soleil en activité « nucléaire » :



# MORT DES ETOILES

L'étoile brûle ainsi son carburant pendant des centaines de millions d'années, voire des milliards d'années. Lorsque ses réserves de carburant sont épuisées, elle entre dans un processus de transformation qui conduit à son extinction.

Tout au long du 20<sup>ème</sup> siècle, les scientifiques vont décrire et affiner les mécanismes qui conduisent à la mort des étoiles, pour finalement en distinguer 3, dépendant de la masse de l'étoile :

## Etoile dont la masse est comprise entre 1 et 3 masses solaires :

Lorsque la réaction de fusion s'arrête, l'équilibre entre la pression due à la réaction de fusion et la gravité est rompu. L'étoile se contracte et la température du noyau augmente. La chaleur dégagée par le noyau réchauffe les couches externes de l'étoile qui contiennent encore beaucoup d'hydrogène. La fusion de l'hydrogène reprend et engendre la dilatation, de l'étoile qui devient une géante. En se dilatant, elle refroidit, donc devient rouge.

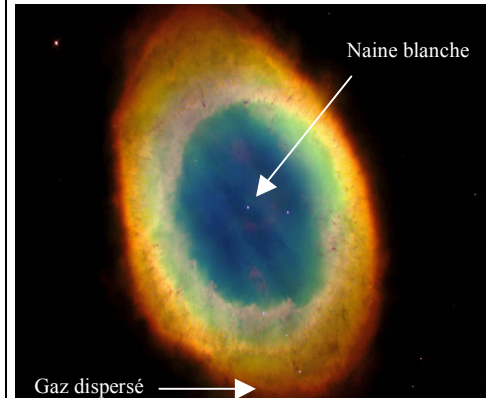
Parallèlement, le noyau continue de se contracter et lorsque la température atteint les 100 millions de degrés, l'hélium entre à son tour dans un processus de fusion, qui le transforme en carbone, qui peut lui-même se transformer en oxygène.

Puis, une nouvelle fois, les réactions de fusion s'arrêtent, faute de carburant. L'étoile est maintenant composée d'un noyau de carbone et d'oxygène, entourée d'une enveloppe d'hélium en fusion, entourée elle-même d'une enveloppe d'hydrogène en combustion.

La coquille d'hélium est très instable et provoque des pulsations, qui éjectent une partie de l'enveloppe de gaz qui entoure le noyau.

Celui-ci se retrouve mis à nu. Puisqu'il est très chaud, il va ioniser les gaz éjectés : L'ensemble de l'étoile se met à briller et apparaît comme un noyau brillant entouré d'une enveloppe lumineuse : ce système porte le nom de « nébuleuse planétaire » et le noyau brillant une naine blanche. Sa taille est comparable à la terre mais sa densité est énorme : un petit pois pèserait 1 tonne.

Mort d'une étoile comparable au soleil : nébuleuse planétaire :



## Etoile dont la masse est comprise entre 3 et 25 masses solaires :

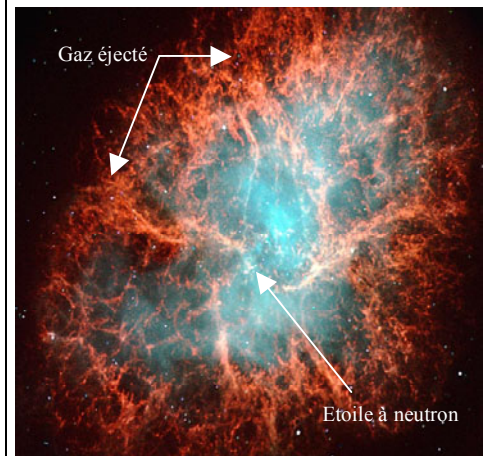
Les cycles de fusion de l'hydrogène et de l'hélium sont semblables à ceux décrits dans le mécanisme ci-dessus. Dans le cas des étoiles massives, la quantité de matière est suffisante pour que la contraction du noyau soit très importante. La température va donc augmenter très fortement et permettre la réaction de fusion du carbone, à 600 millions de degrés.

Puis la réaction s'arrête, la température décroît, l'étoile se contracte, la température augmente de nouveau, un nouveau cycle de fusion est enclenchée produisant un élément plus lourd et ainsi de suite... Plus l'étoile est massive, plus le nombre de cycle est élevé. Par exemple, pour une étoile de 10 masses solaires, le noyau peut atteindre 1 milliard de degrés et déclencher la fusion de l'oxygène. Pour une étoile de 20 masses solaires, la température peut dépasser plusieurs milliards de degrés et déclencher la fusion du silicium : l'étoile devient alors une super-géante rouge.

A un moment pourtant, un élément ne peut plus entrer en fusion, car il est parfaitement stable : le Fer. Le noyau d'une super-géante rouge est donc un noyau de fer qui refroidit peu à peu et se contracte et atteint une taille minimum.

Les couches externes de l'étoile s'effondrent alors sur ce noyau incompressible, et rebondissent dessus. Cette « collision » engendre une onde qui s'éloigne du noyau en balayant tout sur son passage, dispersant les gaz à des vitesses de plusieurs milliers de km par secondes : c'est une supernovae. Le résidu d'étoile s'appelle une « étoile à neutron »<sup>9</sup> ou « pulsar ». Sa taille est comparable à une grosse montagne et sa densité est gigantesque : une tête d'épingle pourrait contenir la masse d'un paquebot.

Mort d'une étoile 10 fois plus massive que le soleil : Supernovae :



## Notes :

### 9. Etoile à neutron :

Elle doit son nom au fait qu'elle n'est plus constituée que de neutrons. Caractérisée par une densité extrêmement élevée, elle tourne très vite sur elle-même en émettant de l'ordre de cinquante impulsions radio par seconde, avec une régularité parfaite (comme les signaux d'un phare). C'est pour cette raison que les étoiles à neutrons portent aussi le nom de « pulsar ».

### **Etoile dont la masse est supérieure à 25 masses solaires :**

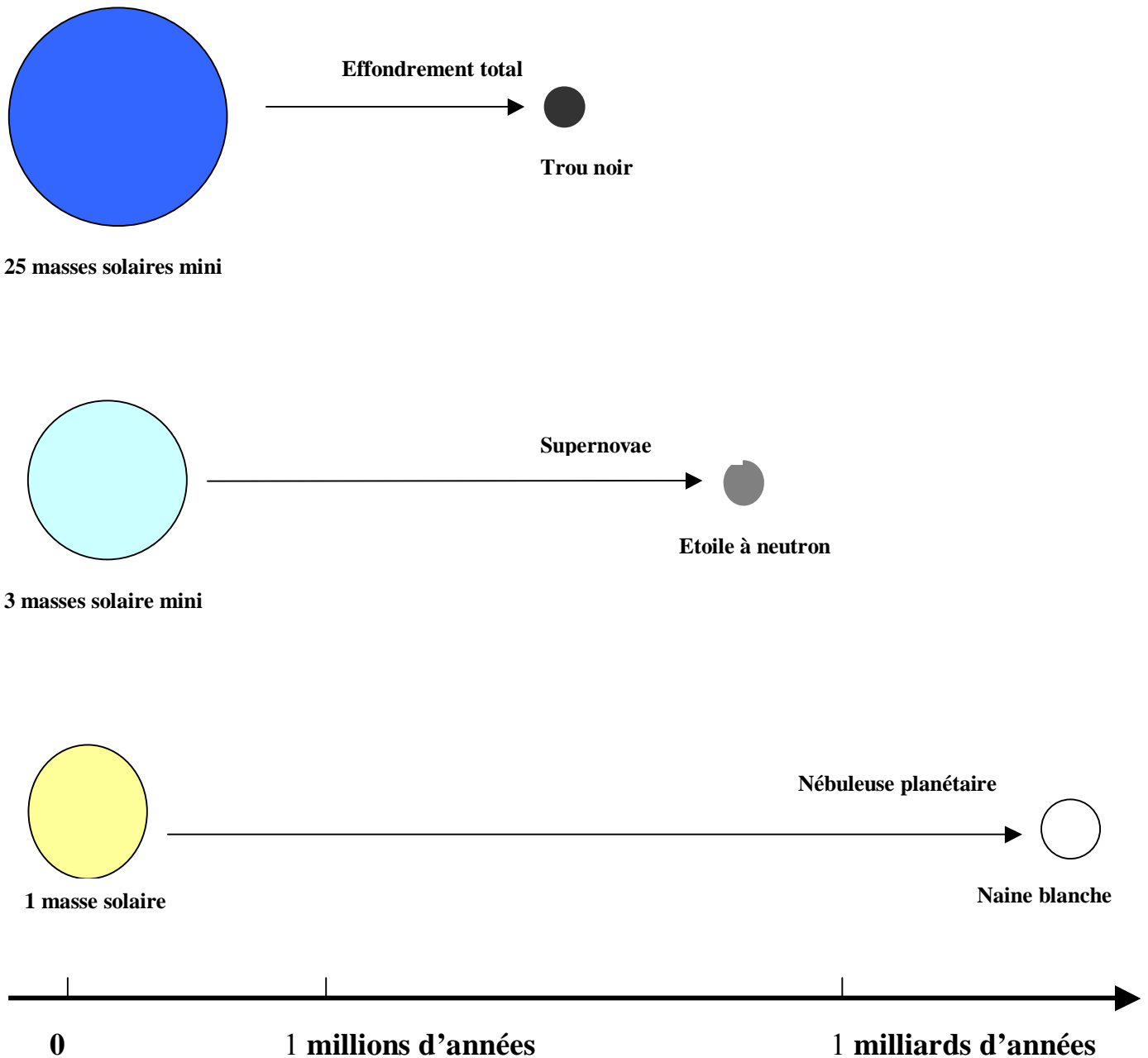
Lorsqu'une étoile est très massive, la contraction du noyau ne s'arrête pas à l'étoile à neutron. Il continue de se contracter jusqu'à atteindre un diamètre d'environ 20 kilomètres. Sa densité est telle que même la lumière ne peut échapper à son attraction gravitationnelle: c'est un trou noir.

#### **Résumé :**

- ⇒ Une étoile meurt quand elle a épuisé ses réserves d'hydrogène : les réactions de fusion s'arrêtent.
- ⇒ Une étoile de faible masse (1 à 3 soleils) devient une naine blanche. Elle est entourée des enveloppes de gaz qu'elle a éjectées et forme une nébuleuse planétaire.
- ⇒ Une étoile de masse importante (3 à 25 soleils) devient une étoile à neutron. Le processus qui engendre ce résidu stellaire se termine par une gigantesque explosion appelée supernovae.
- ⇒ Une étoile très massive (> à 25 soleils) devient un trou noir. Le résidu stellaire est si dense que la lumière elle même ne peut s'en échapper.

# VIE DES ETOILES :

## Résumé



# CONCLUSION

Quelles que soient ses caractéristiques physiques, une étoile finit sa vie lorsque les réactions nucléaires en son cœur ne sont plus possibles. Elle s'effondre alors sur elle-même et déverse dans l'espace des quantités gigantesques de gaz et de poussières. Ces gaz et poussières vont à nouveau se condenser, se réchauffer et faire naître de nouvelles étoiles, qui vont s'éteindre à nouveau. Les cycles stellaires se succèdent ainsi et enrichissent l'univers de molécules de plus en plus complexes (en particulier grâce aux éléments fabriqués par les Supernovae : oxygène, carbone....)

Ces molécules se sont un jour retrouvées dans le nuage de gaz qui a formé le soleil, puis dans les roches des planètes du système solaire. Grâce à un enchaînement de conditions favorables, ces molécules ont évoluées sur terre et peu à peu donner naissance aux premières cellules, aux premiers êtres vivant et donc aux premiers hommes.

**Comme le dit Hubert Reeves, : « nous sommes tous des poussières d'étoiles.... »**