

Mardi 4 décembre 1984

Vie et mort des étoiles

Le mardi 4 décembre, Madame GENOVA, astronome à l'Observatoire de Meudon nous a parlé de la "Vie et Mort des Etoiles".

Lorsque l'on regarde le ciel, le soir, on a l'impression de voir un ensemble figé, immuable de petites lumières qui scintillent au-dessus de nous.

Copernic (1473-1543) qui fut l'un des premiers astronomes de l'époque moderne a écrit : "Tout d'abord et au-dessus de tout se trouve la sphère des étoiles fixes se contenant elle-même ainsi que toute chose et pour cette raison même immuable". On savait à cette époque que le soleil avait un certain mouvement dans le ciel, au cours de l'année. Copernic défendait l'idée d'un mouvement uniformément circulaire des planètes.

C'est plus tard seulement que l'on commença à penser que l'Univers n'est pas semblable à la description de Platon, d'Aristote ou des Ecritures, que l'Univers évolue.

Maintenant on essaie non seulement de décrire mais de comprendre.

Dans le ciel, il existe deux types "d'objets" :

- . des points brillants
  - planètes aux mouvements errants\* (proches)(photo 1)
  - étoiles aux mouvements apparemment circulaires (éloignées)
- . des taches étendues
  - nuages de gaz (nébuleuses)
  - galaxies (éloignées)

#### I.- FORMATION DES ETOILES.-

Elles se forment à partir de nuages de matière interstellaire en contraction sur eux-mêmes.

La matière interstellaire actuelle, détectée grâce aux progrès de la radio-astronomie se compose d'éléments (H.C.O.N.), de radi-

\*Planète : du grec planêtês : errant

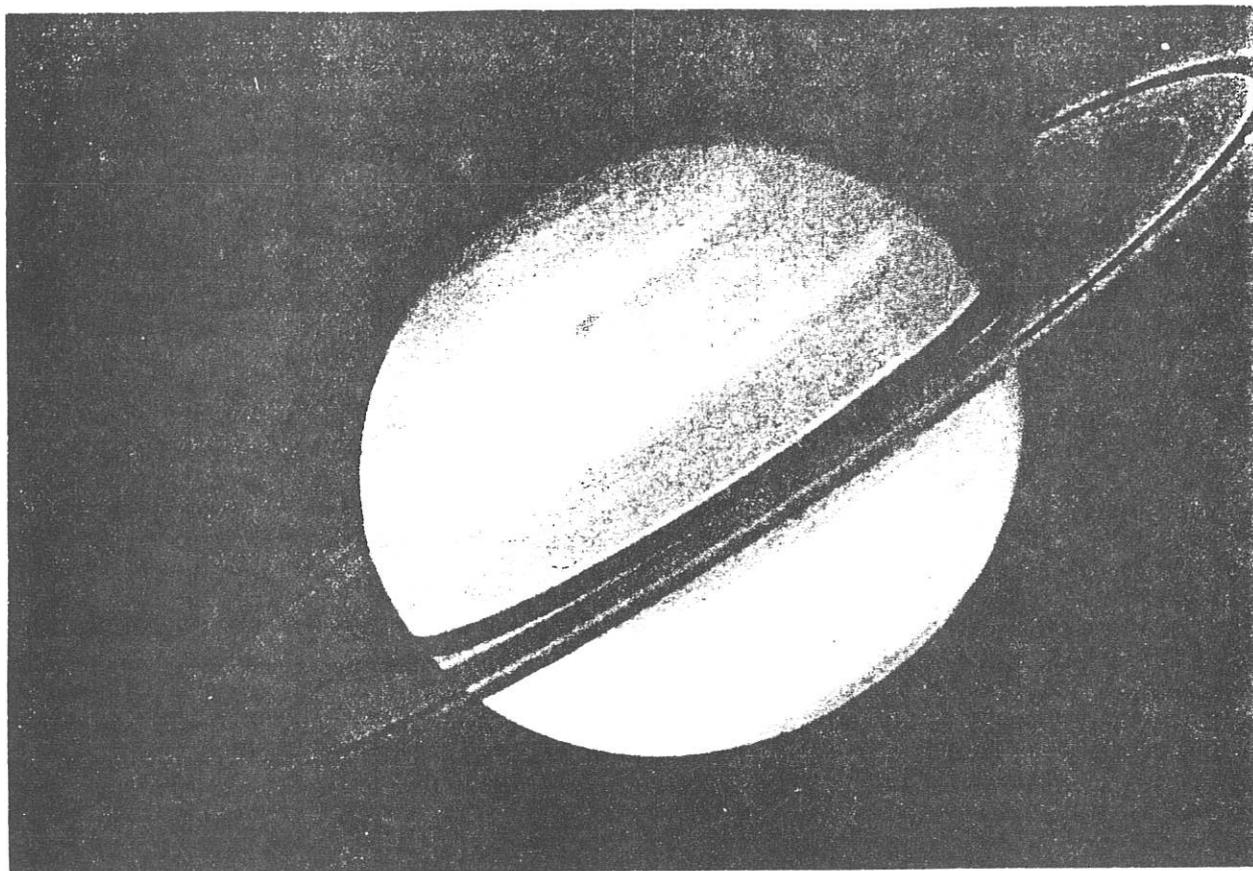
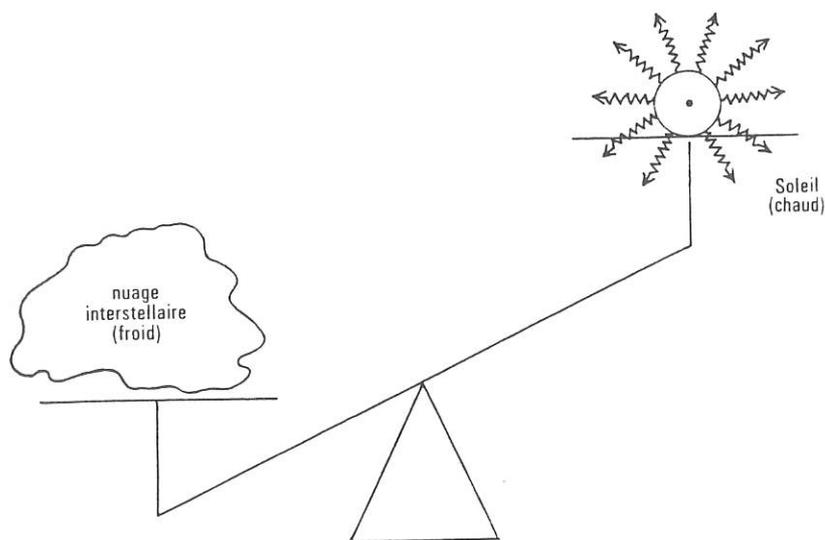


Photo 1.- Saturne

caux (CH, CN) ou de molécules (oxyde de carbone, vapeur d'eau) formant des nuages froids ( $-270^{\circ}\text{C}$  ou  $3^{\circ}\text{K}$ ) ainsi que d'une forte proportion de particules libres.

Considérons un tel nuage dans sa phase préstellaire, c'est-à-dire immédiatement avant qu'il ne devienne une étoile. Son diamètre est environ celui du système solaire ; il est suffisamment dense pour être opaque (croquis 2). Le nuage se contracte du fait de sa



Croquis 2.- La masse du Soleil. Le Soleil est plus léger que le nuage interstellaire dont il a hérité ses atomes. L'énergie gagnée a été transformée pour partie en rayonnement. L'autre partie a servi à le réchauffer.

propre masse, et l'énergie gravitationnelle récupérée est convertie en chaleur : c'est ainsi que la température du nuage est alors de quelques centaines de degrés absolus (kelvin), ce qui est encore peu pour une future étoile.

Arrivé à ce point de contraction, le nuage subit un événement catastrophique ; la température devient suffisante pour qu'une partie de l'énergie de contraction serve non plus à "chauffer" le nuage, mais à ioniser certains atomes et dissocier les molécules du nuage (surtout  $H_2$ ). Les molécules absorbaient beaucoup de l'énergie rayonnée ; leur disparition rend le nuage beaucoup moins opaque et il rayonne beaucoup plus d'énergie vers l'extérieur : il devient lumineux, il se métamorphose en étoile. Mais cette perte d'énergie engendre un net déséquilibre entre la force d'attraction et la pression gazeuse qui, normalement, la freine considérablement : le nuage s'effondre sur lui-même, quasiment à la vitesse de la chute libre, effondrement qui a pour effet de relever la pression gazeuse. Cette catastrophe s'arrête lorsque force gravitationnelle et pression gazeuse s'équilibrent à nouveau. A son terme l'étoile a un diamètre d'environ 100 fois celui du Soleil actuel, c'est-à-dire qu'elle remplit l'orbite de Mercure. La température, à sa surface, est proche de  $4000^\circ K$ , et elle rayonne 100 fois plus d'énergie que le Soleil (photo 3).

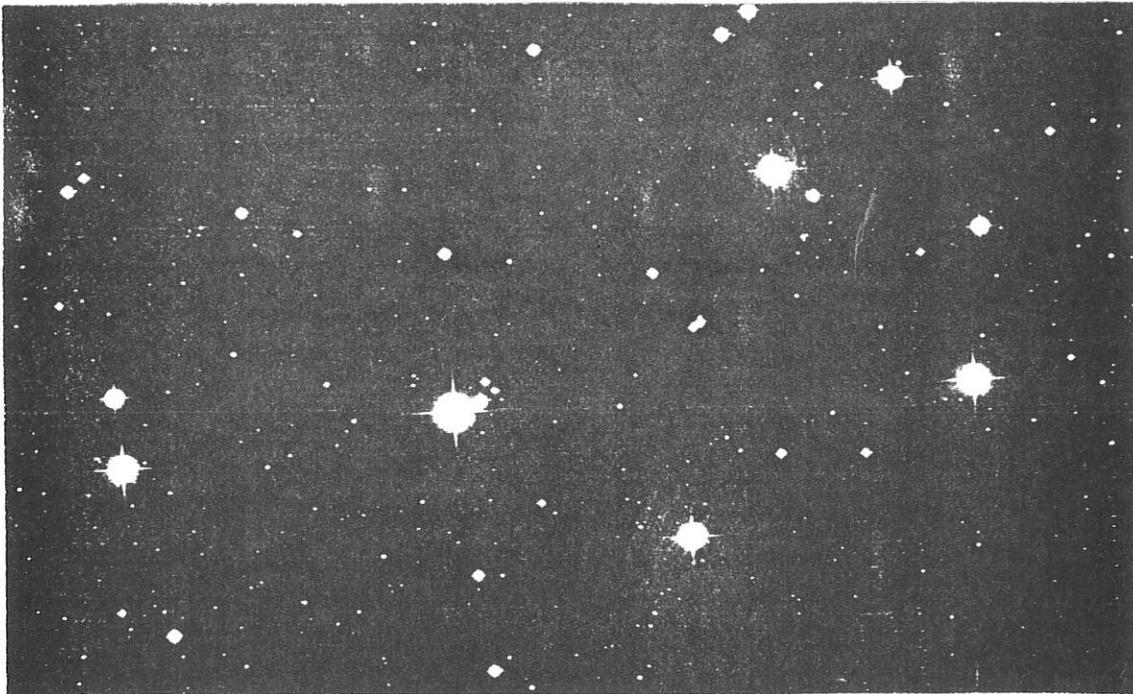


Photo 3.- Les Pléiades

Il n'y a formation d'étoiles que si le corps à l'origine n'est pas trop massif. Sa masse maximale doit être 200 fois celle du Soleil (qui est une étoile). Si elle dépasse cette masse, le corps est trop instable.

## II.- EVOLUTION DES ETOILES.-

D'où vient l'énergie des étoiles ? Cette question est restée pendant très longtemps sans réponse.

Il fallait trouver un moyen de fabriquer de l'énergie de façon régulière et pendant très longtemps.

En 1919 Jean Perrin eut l'idée que cette énergie avait une origine nucléaire.

Le début de la vie d'une étoile est assez "tranquille". L'hydrogène se transforme en hélium. C'est la phase la plus longue et la mieux comprise.

Le soleil existe dans l'état où il est actuellement depuis 4,5 milliards d'années. A l'échelle des observations humaines, on ne peut pas voir évoluer les phénomènes.

On observe donc un très grand nombre d'étoiles à différentes étapes de leur vie et l'on essaie de reconstituer l'évolution, la vie à partir d'un modèle d'étoile (schémas 4, 5, 6, 7, 8).

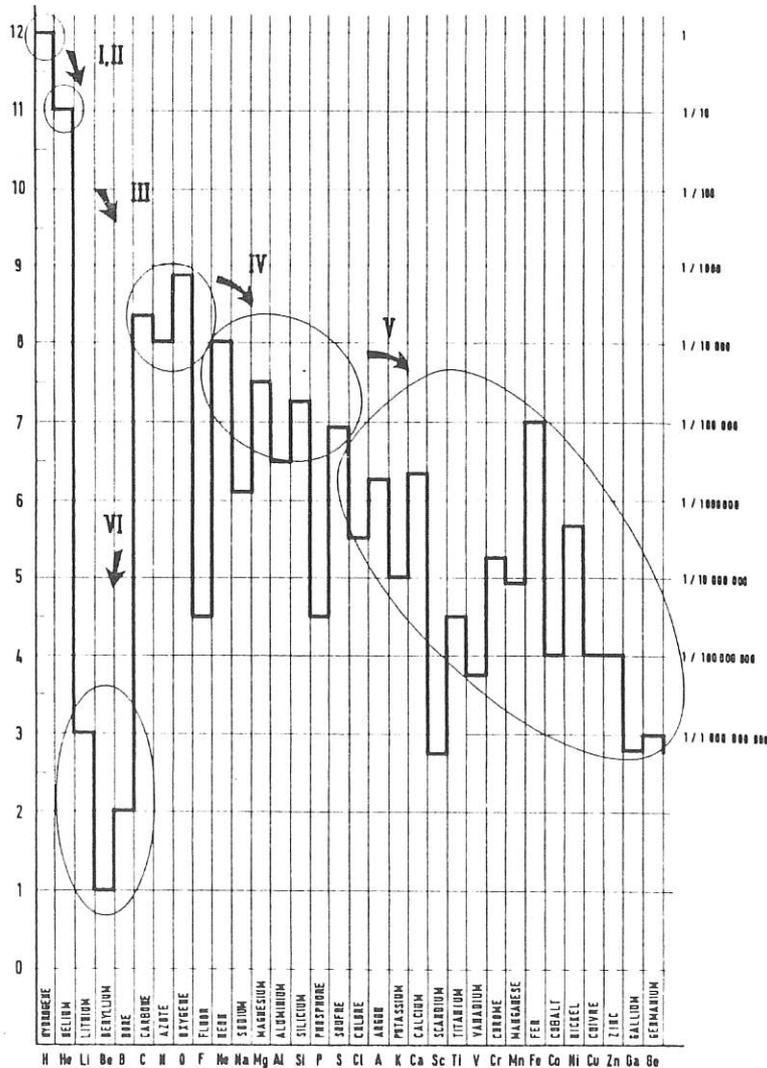
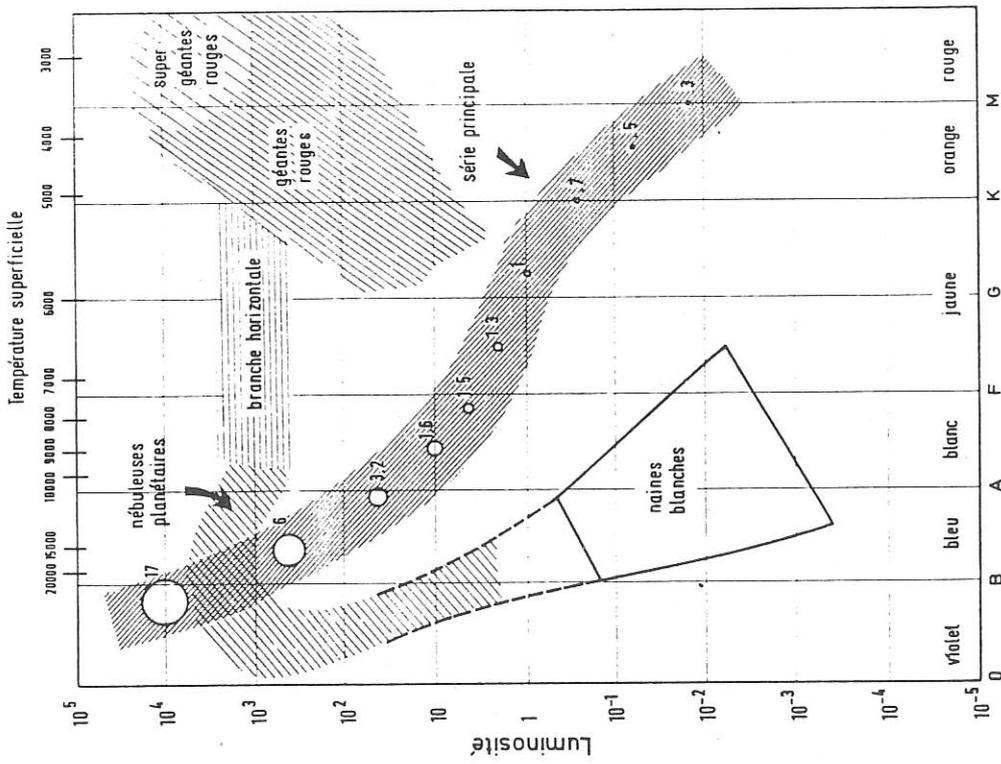
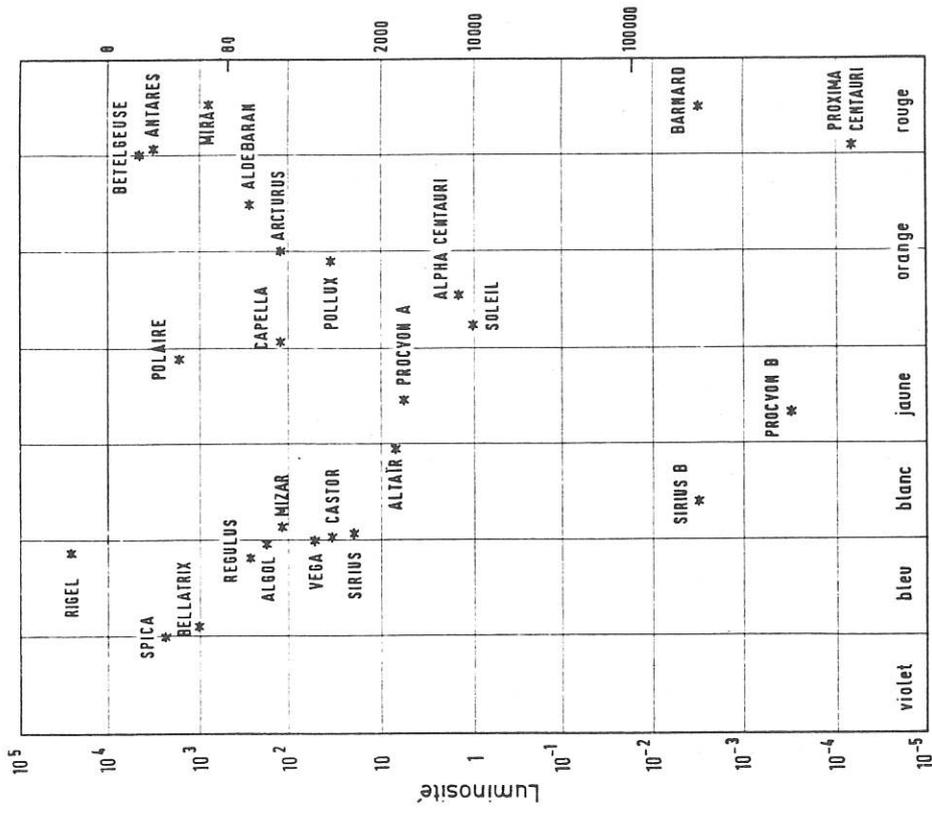


Schéma 4. L'abondance des trente-trois premiers éléments. Dans l'échelle de gauche, l'hydrogène a l'abondance  $10^{12}$  ou 1 000 000 000 000. Dans l'échelle de droite, l'hydrogène reçoit l'abondance unité. Les flèches rappellent les grandes phases de l'évolution nucléaire

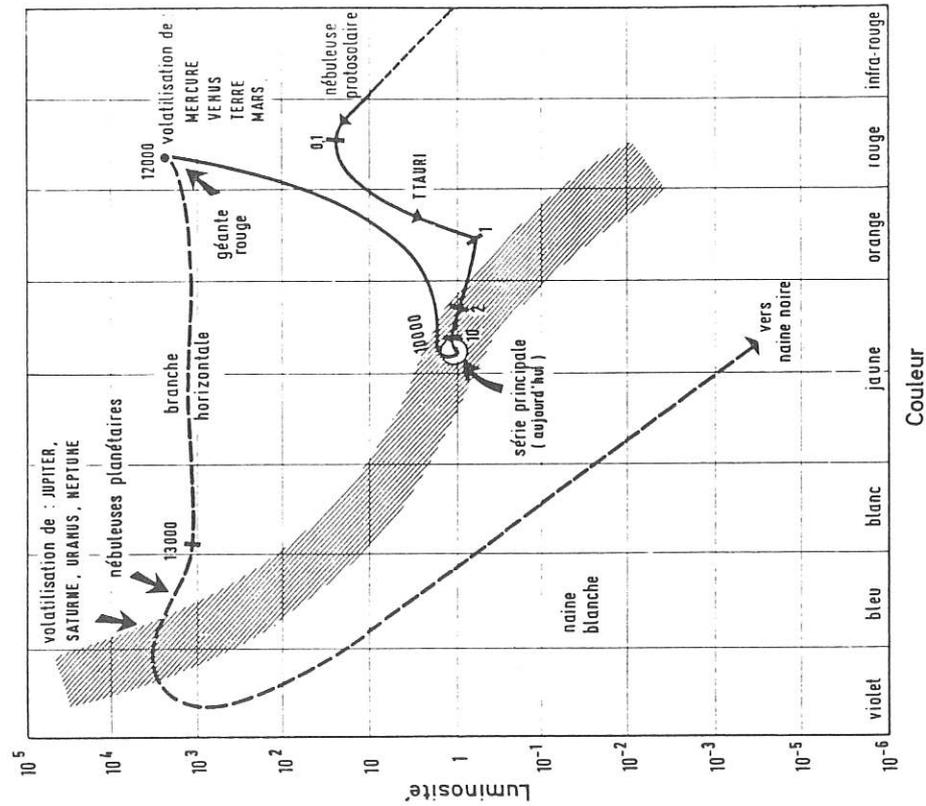


**Schéma 5** Diagramme couleur-luminosité des étoiles (diagramme de Hertzsprung-Russell). L'échelle verticale est graduée en luminosité stellaire absolue (en unité de luminosité solaire), tandis que l'échelle horizontale est en « couleur stellaire », ou, ce qui est équivalent, en température superficielle. Les astronomes utilisent une classification plus détaillée appelée « type spectral », et à laquelle correspondent les lettres O, B, A, F, G, K, M, inscrites sur l'échelle du bas. Sur la région hachurée de la séquence principale, le diagramme donne la masse des étoiles qui s'y trouvent situées, en unités de masse solaire.

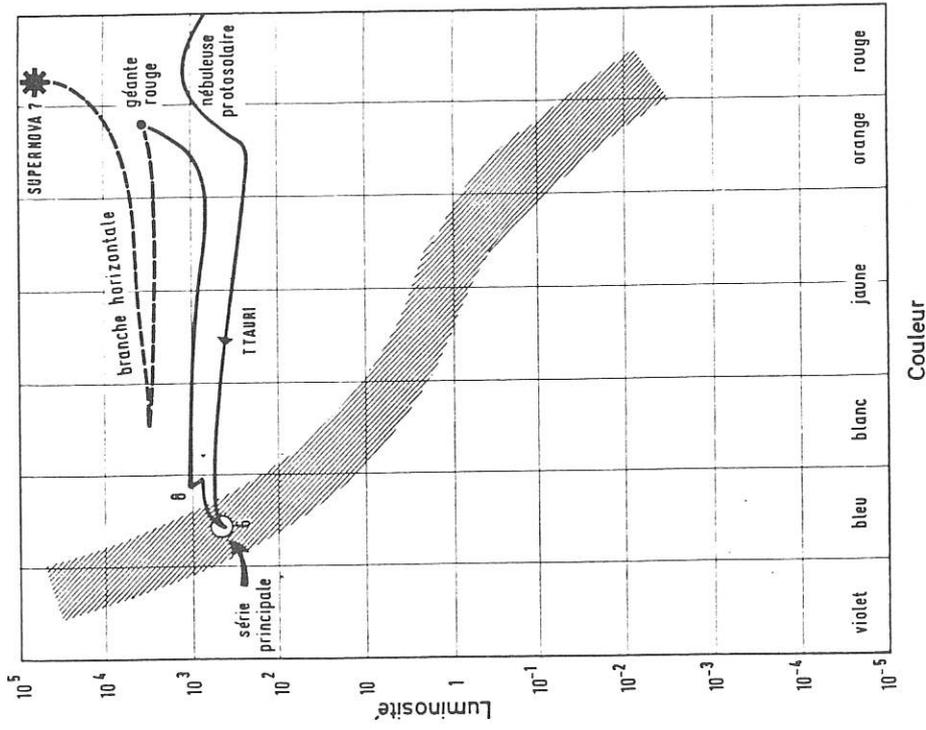


**Couleur superficielle**

**Schéma 6** Nos étoiles familières sur le diagramme H-R. Chaque étoile est disposée selon sa luminosité et sa couleur superficielle. On voit bien apparaître la séquence principale, la région des géantes rouges et deux naines : Sirius B et Procyon B. Sur l'échelle de gauche, on a indiqué, en millions d'années, le temps de séjour sur la séquence principale — ou le temps requis pour brûler l'hydrogène en hélium. Ce temps représente, à peu de chose près, la vie totale de l'étoile, puisque les autres phases stellaires se passent beaucoup plus rapidement. Spica et Bellatrix, par exemple, vivront toutes les étapes de leur vie en quelques dizaines de millions d'années, tandis que l'étoile de Barnard ou Proxima du Centaure brillent encore longtemps après que le Soleil sera devenu une naine noire.



**Schéma 7** *Le destin du Soleil.* Dans le plan H-R, on a marqué la trajectoire assignée au Soleil. Les chiffres, en millions d'années, désignent le temps écoulé depuis sa naissance dans l'effondrement d'un grand nuage interstellaire. Après la transformation de la nébuleuse protosolaire en « système solaire », après la traversée de la phase T Tauri, il s'est installé sur la série principale où il se trouve encore aujourd'hui. Dans cinq milliards d'années, il reprendra sa course vers la région des géantes rouges, puis le long de la branche horizontale, et, après être passé par la zone des nébuleuses planétaires, il ira mourir lentement sur la voie des naines blanches et des naines noires.



**Schéma 8** *Le destin d'une étoile massive.* La trajectoire d'une étoile beaucoup plus massive que le Soleil est parcourue à une allure autrement plus rapide. L'arrivée sur la série principale se fait en moins d'un million d'années et le séjour dans cette phase stellaire est terminé — par exemple pour Rigel — en moins de dix millions d'années. Les étapes « géante rouge » et « branche horizontale » sont encore plus brèves. On soupçonne, sans en avoir la certitude, que l'explosion finale en supernova se produit quelque part dans la région des supergéantes rouges.

Toutes les étoiles n'évoluent pas de la même façon. Le paramètre fondamental de l'évolution des étoiles est leur masse initiale.

Il faut une température minimale pour que les réactions nucléaires démarrent. Cette température dépend de la masse initiale.

Si le corps est trop léger : aucune réaction ne démarre :

$$\text{Ex : Jupiter } (M_{\text{Sup}} \sim \frac{M_{\text{Soleil}}}{1000})$$

La masse initiale intervient également sur la durée de vie d'une étoile.

Plus les étoiles sont massives, plus la température au centre est élevée. Le taux de réaction nucléaire est très grand et leur vie est brève.

Au contraire les étoiles peu massives ont une vie longue. Le soleil est une étoile peu massive. On prévoit que sa vie va durer 10 milliards d'années. Elle est à mi-course.

Le problème dominant d'une étoile est de rester en équilibre.

A l'intérieur d'une étoile de l'énergie nucléaire est produite continuellement. Les couches internes de l'étoile sont poussées vers l'extérieur.

Pendant ce temps le coeur de l'étoile attire vers le centre les couches externes.

Il faut donc un équilibre permanent entre les forces qui poussent vers l'extérieur et celles qui tirent vers l'intérieur :

- énergie nucléaire (vers l'extérieur)
- force de gravitation (vers l'intérieur)

Lorsque l'hydrogène est épuisé au centre de l'étoile, progressivement la coquille sphérique qui entoure le noyau et qui, elle, est encore riche en hydrogène non brûlé, va devenir le siège des réactions de combustion de l'hydrogène. L'énergie de l'étoile ne vient donc plus de son noyau mais d'une épaisse coquille qui se forme.

Cette coquille va s'éloigner du noyau de l'étoile au fur et à mesure de la combustion de l'hydrogène, pour aller en quelque sorte chercher de l'hydrogène frais dans le manteau stellaire (zone qui s'étend de la surface de l'étoile jusqu'à la couche d'hydrogène en combustion).

A mesure que la coquille s'étend, elle s'amincit. La température et la densité y augmentent ce qui accroît l'efficacité des réactions nucléaires. Mais cette augmentation ne compense que partiellement celle résultant de la diminution de l'épaisseur de la coquille.

La production d'énergie nucléaire diminue donc. De plus, cette production d'énergie est explosive, de sorte que de la matière est expulsée vers le manteau, provoquant une expansion rapide de celui-ci.

Puisqu'il se dilate, le manteau se refroidit ; la moitié de l'énergie nécessaire à cette expansion est puisée sur la production d'énergie de la coquille d'hydrogène en combustion ; l'autre moitié est prise sur l'énergie thermique du manteau lui-même, qui se refroidit donc d'autant plus rapidement.

L'énergie nucléaire ainsi transformée en énergie mécanique n'est plus rayonnée : outre son refroidissement en surface, l'étoile voit sa luminosité décroître.

A ce point de son évolution, l'étoile sera une "géante rouge".

Si l'étoile est assez massive c'est-à-dire au moins égale à la moitié de la masse du soleil, la température du noyau où tout l'hydrogène est remplacé par l'hélium atteindra une température suffisante pour qu'une nouvelle réaction nucléaire s'y déroule : celle de la combustion de l'hélium ; trois noyaux d'hélium fusionnent pour produire un atome de carbone, et, bien sûr, de l'énergie. A la suite de cette réaction, un atome de carbone peut fusionner avec un autre atome d'hélium donnant ainsi un atome d'oxygène, et encore de l'énergie :



Autour, l'hydrogène continuera à se transformer en hélium.

Ce nouvel état d'équilibre sera plus court que le précédent et durera à peu près 100 millions d'années.

Si l'étoile est peu massive ( $M \leq 0,5 M_{\text{soleil}}$ ) la température centrale est insuffisante pour "allumer" les réactions de combustion de l'hélium, l'étoile s'effondre. Le coeur se refroidit pour devenir une naine blanche puis une naine noire.

Si l'étoile est très massive, toujours par contraction du noyau de l'étoile, la température centrale continue à s'élever après la combustion de l'oxygène. Lorsque la température atteint 3 à 4 milliards de degrés, progressivement une partie des atomes de silicium et des autres atomes lourds est dissociée en particules légères (protons, neutrons et noyaux d'hélium). Les particules légères sont immédiatement capturées par les atomes restants de silicium, fabriquant

ainsi des atomes plus lourds, qui se dissocient bien sûr eux aussi, restituant en particulier du silicium.

Ces réactions atteignent un équilibre au terme duquel l'élément le plus abondant se trouve être le fer.

Le noyau stellaire continue d'évoluer, soit en atteignant des températures très élevées (7 milliards de degrés) soit des densités très élevées. Si la température est très élevée, tous les noyaux lourds au centre de l'étoile sont détruits. Ces réactions absorbent de l'énergie. Il en résulte une baisse de température au centre de l'étoile. Finalement la force gravitationnelle n'est plus équilibrée et l'étoile s'effondre sur elle-même.

Si, par contre, la température centrale n'atteint pas des valeurs aussi élevées, mais que la densité augmente considérablement, les électrons sont capturés par les noyaux atomiques. Comme ce sont les électrons qui contribuent le plus à la pression au centre de l'étoile, la diminution du nombre d'électrons entraîne une diminution de la pression. Si cette diminution intervient rapidement, l'étoile devient instable et s'effondre.

Dans les deux cas, l'énorme élévation de température qui accompagne l'effondrement gravitationnel transforme la plupart de la matière au centre de l'étoile en neutrons.

Lorsque les neutrons sont suffisamment comprimés, la pression due à ces neutrons s'oppose à l'effondrement et l'interrompt. A ces très hautes températures, le taux de formation de paires neutrino-antineutrino est très important. Ces neutrinos diffusent très rapidement vers l'extérieur du noyau stellaire et sont partiellement absorbés dans les couches extérieures de l'étoile. Ces couches s'échauffent ainsi considérablement, de sorte que la pression gazeuse y devient largement supérieure à la force gravitationnelle : le manteau de l'étoile est littéralement soufflé. C'est l'explosion de la supernova. L'éjection de matière peut s'effectuer à des vitesses aussi élevées que 10 000 km/s.

Ce processus contribue beaucoup à régénérer le milieu interstellaire : pendant l'explosion, les couches de carbone, d'oxygène et de silicium entrent en combustion, incomplètement en ce qui concerne ce dernier. La matière rejetée dans l'espace interstellaire est donc enrichie en éléments allant du silicium au fer.

Le manteau de l'étoile est donc complètement éjecté dans le milieu interstellaire ; par contre, son noyau, après implosion demeure, constitué presque exclusivement de neutrons et peut-être d'une infime fraction d'électrons.

Le rayon d'une étoile à neutrons est incroyablement petit : une étoile à neutrons d'une masse solaire a un rayon de 10 km ; sa densité est d'environ 500 millions de tonnes par centimètre cube ! Si la Terre avait une telle densité, son diamètre n'excéderait pas 30 m ; le mont Everest ne s'élèverait pas au-dessus de 2cm.

On estime que la masse d'une étoile à neutrons ne saurait dépasser 3 à 4 masses solaires.

L'examen de la nébuleuse du "Crabe" confirme cette théorie. C'est le reste d'une étoile qui a explosé en 1054 (Supernova observée, entre autres, par un mathématicien chinois). Elle comporte en son centre un pulsar et on a pu observer, au centre géométrique de la nébuleuse, une source lumineuse clignotante de même période.

L'existence des étoiles à neutrons a été prédite théoriquement dès 1935. Mais elles n'ont fait leur entrée dans le "monde astrophysique" qu'en 1967, lorsque les radioastronomes de Cambridge ont découvert le premier pulsar : une source émettant un éclair radio d'une durée de 50 millisecondes toutes les 1,33730 secondes ! Depuis plus de 400 pulsars ont été découverts.

Les pulsars sont des étoiles à neutrons en rotation rapide.

L'évolution des étoiles très massives (dépassant 8 masses solaires environ) au-delà de la phase de Supernova mène, vraisemblablement, à un noyau trop massif pour devenir une étoile à neutrons ; ce serait l'origine des "trous noirs".

Rien de ce qui tombe dans le trou ne peut jamais en ressortir ; aucun rayonnement en particulier ne peut s'échapper et nous parvenir d'où le nom de "trou noir" donné à un tel objet.

Madame GENOVA a illustré son exposé de nombreux croquis et plans qui nous ont permis de mieux suivre le développement de sa conférence. Elle a donné aux adhérents qui le lui demandaient les précisions claires qu'ils souhaitaient, insistant cependant sur le caractère évolutif de nos connaissances en matière d'astronomie et surtout d'astrophysique. Une mise à jour permanente est nécessaire car les découvertes se succèdent, certaines d'entre elles, quasars, pulsars, trous noirs, ne datant que de quelques décennies.

## VITESSES ET DISTANCES "ASTRONOMIQUES"

Vitesses terrestres du son  $\approx$  1000 km-heure  
de satellisation  $\approx$  30000 km-heure

Vitesse de la lumière 300 000 km/seconde  $\approx$  1 000 000 x vit. du son

Temps mis par la lumière pour parcourir :

Terre-Lune  $\approx$  1 seconde

Terre-Soleil  $\approx$  8m 18s  $\approx$  500 secondes

Mercure-Soleil  $\approx$  3mn

Pluton-Soleil  $\approx$  5 heures

Année-lumière  $\approx$  10 000 milliards de km

Le "Parsec"  $\approx$   $3\frac{1}{4}$  années-lumière  $\approx$  33 000 milliards de km

Etoiles (de la Galaxie) La plus proche  $4\frac{1}{4}$  années lumière

La plus lointaine (oeil nu) ordre de 3 à 400 A.L.

Distances interplanétaires < 5 heures .lumière

" " interstellaires > 4 années .lumière (soit  $\approx$  x 40.000)

" " intergalaxiques > 800 000 A.L. (soit  $\approx$  x 200 000)

"Notre Galaxie" diamètre 100 000 A.L.  
épaisseur 5 000 A.L.  
rotation en 200 000 d'années

comporte  $\approx$  dizaines de milliards d'étoiles  
nébuleuses "Orion" a 2000 A.L.

existe avec  $\approx$  100 millions d'autres dans  
l'Univers

Galaxies "proches" Andromède  $\approx$  1 000 000 A.L.

Quasars (quasi-stars)  $\rightarrow$  "Comme une étoile"  $\approx$  12 milliards d'années lumière

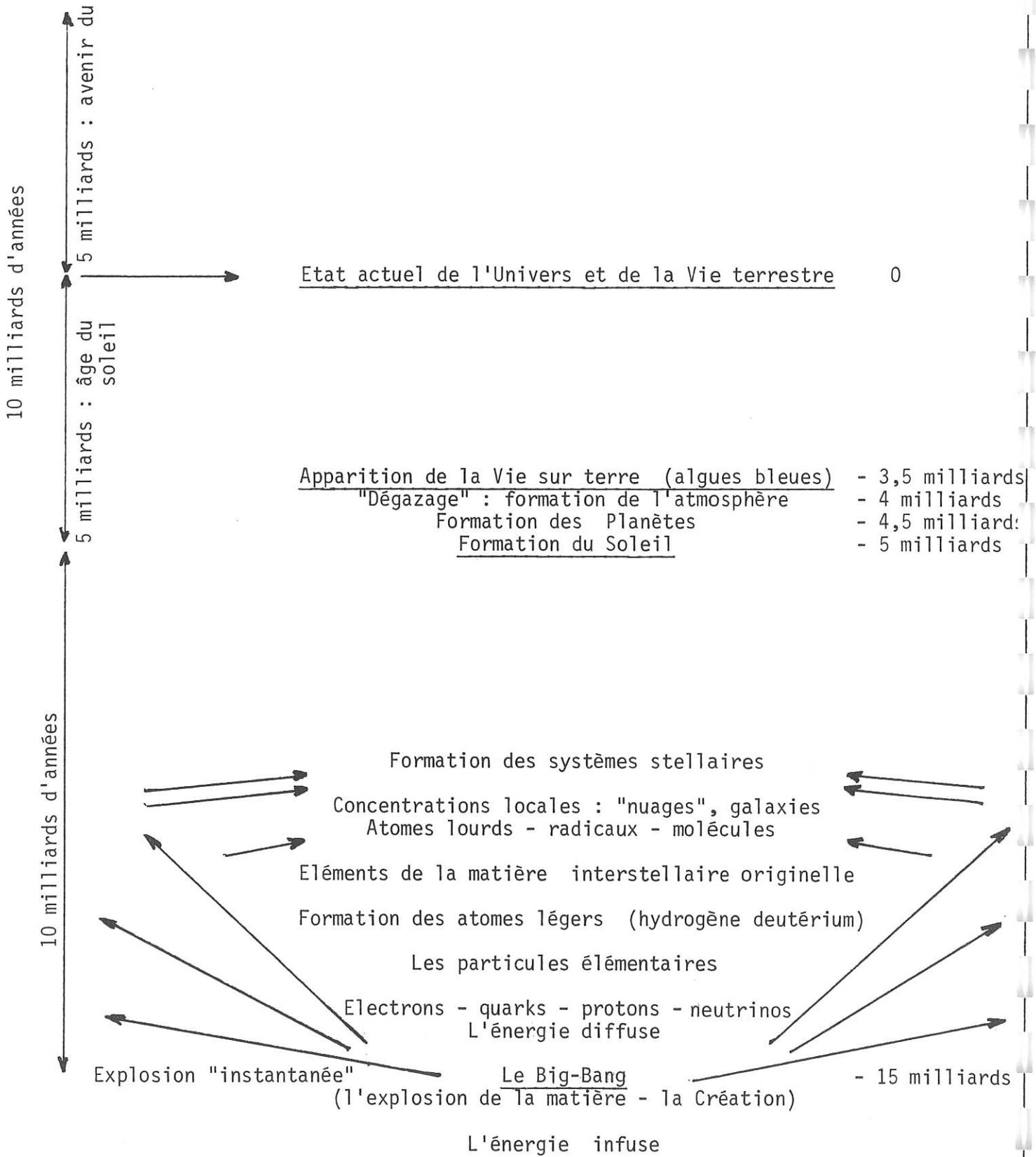
Pulsars Radio-sources vestiges très "concentrées" d'une  
supernova densité 10 000 milliards

Confins actuels de l'Univers 15 milliards A.L.  $\approx$  1 million de milliards de fois la distance Terre-Soleil

---

Le même vertige nous prendrait devant les distances et les masses moléculaires (l'Angstrom, le nombre d'Avogadro, les quarks.) et devant les temps géologiques ou la constitution des atomes, des molécules simples puis des gigantesques molécules comportant parfois plus d'un million d'éléments.

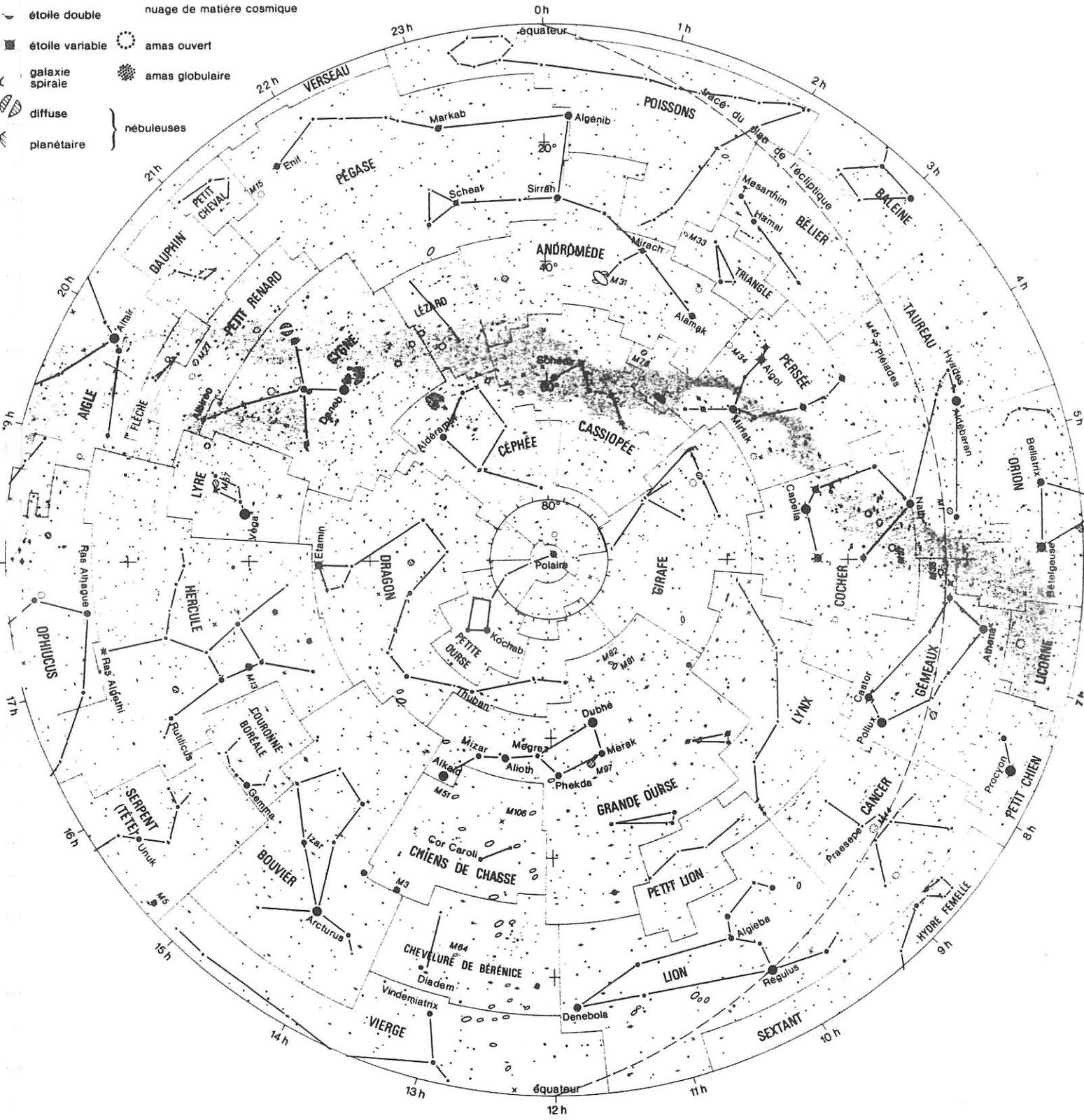
MORT DU SOLEIL



N.B. La tendance actuelle est à l'"élargissement" des temps.

# EMISPHÈRE NORD

- ☾ étoile double
  - ☼ nuage de matière cosmique
  - ◻ étoile variable
  - ⊙ amas ouvert
  - ☄ galaxie spirale
  - ⊛ amas globulaire
  - ☁ diffuse
  - ☁ planétaire
- nébuleuses



# HÉMISPÈRE SUD

les étoiles sont représentées par des points proportionnels à leur éclat (magnitudes de 6,5 à 1)

