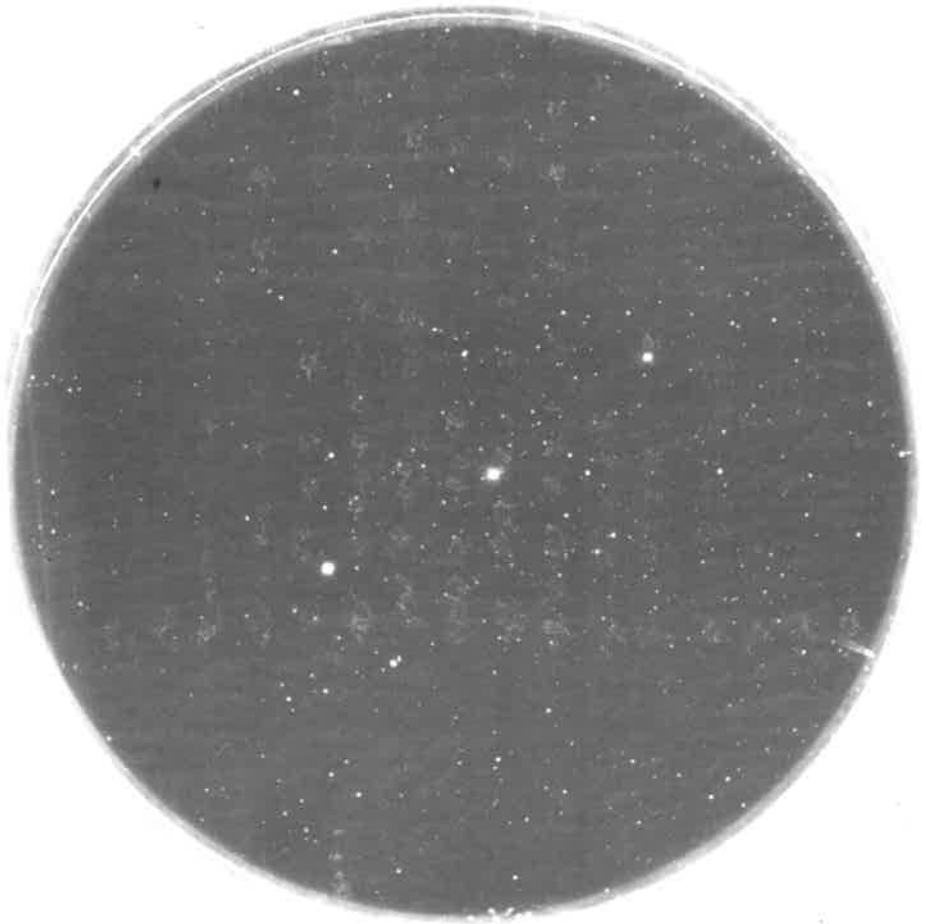


**SOCIÉTÉ
ASTRONOMIQUE
DE LYON**



Notre couverture :

Les trois étoiles du baudrier d'Orion : δ , ϵ , ζ Orionis. Ce sont trois étoiles chaudes, d'une couleur blanc bleuté (types spectraux O9 à B0).

Cette photographie a été prise par Monsieur Bourret, le 1er novembre 1970 à Saint Genis Laval de 0 h 24 TU à 0 h 54 TU.

Suite de l'Article dont le début a paru dans notre précédent numéro :
 «Phénomènes astronomiques et variations climatiques»
 de Monsieur J.P. Parisot, astronome à l'Observatoire de Besançon
 (Conférence du 14 mars 1981)

BILANS ENERGETIQUES

Insolation I

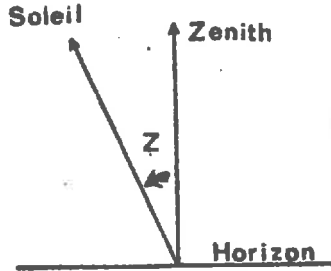
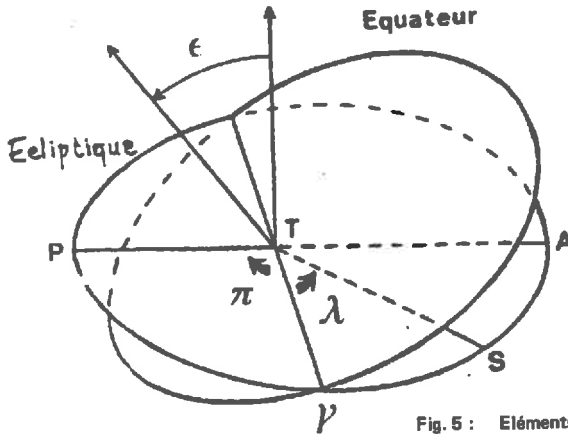


Fig. 4



- TS = p
- P = Périhélie
- A = Aphélie
- e = excentricité
- π = Longitude du périhélie
- λ = Longitude du Soleil
- ϵ = Inclinaison de l'éliptique sur l'Equateur

Fig. 5 : Eléments elliptiques

La quantité fondamentale qui intervient dans le processus de chauffage de la Terre par le Soleil est la constante solaire I_0 . Actuellement :

$$I_0 \sim 1,90 \text{ cal/mn/cm}^2$$

Elle mesure l'énergie arrivant au-dessus de l'atmosphère.

On définit en chaque point du globe une quantité I, appelée insolation : elle dépend des coordonnées du lieu et de la position du Soleil. Pour chaque semestre de l'année, on calcule l'insolation d'été (I_e) et l'insolation d'hiver (I_h) :

$$(1) \quad I_e + I_h = \frac{2I_0}{\pi} \left[\left(1 - \frac{\sin^2 \epsilon}{4}\right) \cos^2 \varnothing + \sin^2 \varnothing \sin^2 \epsilon \right]$$

$$(2) \quad I_e - I_h = \frac{2I_0}{\pi} \left[\sin \epsilon \sin \varnothing - \frac{4}{\pi} e \sin \pi \cos \varnothing \right]$$

(L'équateur calorifique est défini par $I_o = I_h$. Il est actuellement 3° au-dessus de l'équateur géographique).

La quantité intéressante n'est pas l'insolation totale mais le contraste d'insolation $I_o - I_h$. En effet, pour qu'une calotte glaciaire puisse progresser, il est nécessaire que le contraste soit minimum sinon l'été trop chaud provoque la fonte de la glace amassée durant l'hiver rigoureux.

A travers les formules 1 et 2 apparaissent très simplement les phénomènes astronomiques capables de modifier les climats : ils doivent induire des variations des quantités.

I_o

- variation de la luminosité solaire
- passage de nuages absorbants entre la Terre et le Soleil
- modifications de l'atmosphère terrestre.

e, π, ϵ

- modifications de l'orbite terrestre sous l'effet de perturbations lunaires ou planétaires.
- mouvements internes modifiant l'orientation de l'axe de la Terre.

Avant d'examiner les principales causes de variation de I_o, π, e et ϵ , il est bon de rappeler les propriétés essentielles de l'atmosphère de la Terre utiles pour comprendre la genèse d'une calotte polaire.

ROLE DE L'ATMOSPHERE

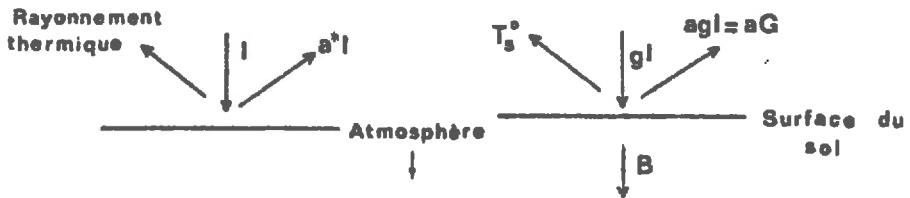


Fig. 6 : Effet de l'atmosphère sur le rayonnement solaire.

De l'énergie I qui arrive en haut de l'atmosphère, seule une fraction g parvient au niveau du sol. Le sol en réfléchit une fraction a (albedo planétaire) et le reste chauffe la surface à une température de l'ordre de 250 à 310°K . Dans cet intervalle le rayonnement se situe dans l'infrarouge (4 à $100 \mu\text{m}$) et il est en grande partie absorbé par l'eau et le gaz carbonique de l'air (le méthane a joué un rôle identique dans l'atmosphère primitive de la Terre). C'est cet «effet de serre» qui rend critique les rejets de gaz carbonique auxquels nous assistons depuis le début de l'ère industrielle.

De même qu'on a défini un albedo planétaire a , on définit l'albedo atmosphérique a^* . La réflexion est principalement due aux nuages. L'augmentation de la couverture nuageuse agit sur la température au niveau du sol par deux processus antagonistes :

- elle contribue à diminuer cette température par une réflexion plus importante du rayonnement solaire (a^* augmente) ;
- elle accentue l'effet de serre par la présence d'une quantité d'eau plus importante dans l'atmosphère.

En réalité, le deuxième processus est le plus efficace et une augmentation de la nébulosité provoque un réchauffement global malgré une valeur plus importante de l'albedo a^* .

Tableau 2 : Paramètres atmosphériques

Zone	I (cal/mn/cm ²)	g	a	a *	T _s (° C)
Polaire	0,249	0,476	0,61	0,50	- 15
40-50° lat.	0,440	0,531	0,12	0,35	8
Equatoriale	0,513	0,537	0,08	0,25	26

Du point de vue dynamique, les mouvements de l'atmosphère se traduisent par une circulation équateur-pôle due en grande partie, au gradient de température (-15 ⇒ +25° C). Les masses d'air chaud enrichies en vapeur d'eau sont transportées dans les régions de hautes latitudes où elles provoquent des chutes de neige qui viennent alimenter la calotte polaire. Ce modèle simplifié de la circulation atmosphérique nous permet de comprendre que trois conditions sont nécessaires pour l'installation d'un climat froid :

- la présence de Terre dans les régions polaires,
- une insolation tropicale excédentaire,
- une insolation polaire déficitaire.

VARIATIONS DE LA CONSTANTE SOLAIRE I₀

Le Soleil rayonne de l'énergie comme un corps noir porté à une température T = 5 770° K. La constante solaire s'écrit simplement :

$$I_0 = \sigma \frac{R^2}{a^2} T^4$$

R : rayon du Soleil
T : «Température de la surface» du Soleil
a : distance Terre-Soleil
σ : constante de Stephan

La sensibilité de la température T_s à la surface de la Terre est très forte aux variations de a, R et T car :

$$\Delta I_0 / I_0 \sim 1 \% \Rightarrow \Delta T_s \sim 1^\circ \text{ C}$$

Cette variation est obtenue par exemple par une augmentation de 15° C de la température du Soleil !

Variations de la distance Terre-Soleil.

On peut montrer que dans un système binaire (Terre-Soleil) le produit a (M_{soleil} + m_{terre}) reste constant quand les masses varient. Le Soleil perdant de la masse par l'intermédiaire du vent solaire, on doit s'attendre à une augmentation systématique de la distance moyenne Terre-Soleil. Les calculs montrent que cet effet est négligeable actuellement.

Activité solaire (variation de T).

L'activité solaire liée aux mouvements dans l'atmosphère du Soleil obéit à d'étonnantes périodicités. Elle se manifeste par la présence de taches à la surface du Soleil, par des éruptions et par des sursauts de rayonnement.

$$(\Delta T \sim 30^\circ \Rightarrow \Delta T_s \sim 2^\circ \text{C})$$

Son étude menée depuis 1749 a mis en évidence deux périodes de 11 et 200 ans (le pôle Nord et le pôle Sud du Soleil s'inversent tous les 11 ans).

Cette activité doit jouer un grand rôle dans les variations climatiques sur des échelles de temps de l'ordre de 10 ans : elle pourrait par exemple expliquer les sécheresses de 1910 à 1976 !

Evolution du Soleil.

Les modèles de structure interne du Soleil permettent de suivre assez bien l'évolution du Soleil durant 7 milliards d'années. Toutes les études montrent un accroissement de la luminosité solaire d'environ 40 % depuis sa formation. Cette faible luminosité a peut-être entraîné des températures négatives à la surface de la Terre durant l'Antécambrien. Mais par ailleurs, des évidences géologiques suggèrent l'existence de grandes étendues d'eau à des époques aussi reculées que 3,7 milliards d'années. Deux mécanismes sont susceptibles de corriger cette température trop basse :

- a) l'augmentation de l'effet de serre dû au dégazage plus important de la croûte terrestre.
- b) Vitesse de rotation de la Terre plus élevée : au moment de la formation de la Terre, le jour a pu descendre à une durée inférieure à 2 heures. Dans ce cas la portion d'atmosphère chauffée par le Soleil est plus importante et l'atmosphère se stabilise à une température plus élevée.

La pseudo-période de 250 millions d'années des âges glaciaires a poussé certains à la justifier par un cycle de variations des réactions nucléaires au sein du noyau solaire. Les modèles à mélange renaissent actuellement sous une forme nouvelle à la faveur du problème préoccupant des neutrinos solaires.

Le Soleil tire son énergie de réactions nucléaires de fusion (principe de la bombe à hydrogène) se produisant en son centre. Mais pour que cette énergie produite atteigne la surface du Soleil, il faut attendre plusieurs millions d'années : l'énergie solaire que nous recevons aujourd'hui a été « fabriquée » dans le Soleil il y a peut-être un million d'années !

La seule observation qui permette un accès direct à l'activité instantanée du Soleil est la mesure du flux des neutrinos solaires. Ces particules sont fabriquées au cours des réactions nucléaires et elles ont la propriété de sortir très vite du Soleil et elles atteignent ainsi la Terre quelques minutes après leur synthèse.

Or, actuellement toutes les tentatives de mesure du flux de neutrinos donnent des valeurs bien inférieures aux résultats théoriques (environ dix fois moins). On est contraint à envisager la possibilité d'un Soleil intermittent envoyant des bouffées d'énergie de temps à autre, créant à retardement des réchauffements et des refroidissements. La matière centrale du Soleil serait brassée par convection produisant un rythme thermique du noyau : celui-ci serait actuellement dans une phase de minimum promettant un âge glaciaire dans 1 ou 2 millions d'années.

Traversée de nuages absorbants.

Le Soleil décrit une orbite pratiquement circulaire autour du centre galactique qu'il parcourt en 250 millions d'années. A chaque passage dans les bras spiraux, le Soleil rencontre des nuages de matière interstellaire : les particules les composant tombent sur le Soleil et le réchauffent si toute leur énergie est convertie en chaleur. Avec les nuages classiques (10 atomes/cm^3), on peut s'attendre à une augmentation de I_0 de l'ordre de 1 % et à un accroissement de la température à la surface de la Terre de l'ordre de 1°C .

VARIATION DES ELEMENTS ELLIPTIQUES

Si l'on s'affranchit des variations de I_0 , le contraste d'insolation dépend des éléments elliptiques ϵ , e et π sous la forme (figure 5) :

$$\sin \epsilon \sin \varnothing - \frac{4}{\pi} e \sin \pi \cos \varnothing$$

On est amené à considérer deux états extrêmes :

1) ϵ minimum ; $\pi = 90^\circ$

(Le Soleil se trouve au périhélie durant l'hiver de l'hémisphère nord).

Le contraste d'insolation est minimisé et le déficit d'insolation d'été empêche les neiges d'hiver de fondre favorisant ainsi l'extension des calottes glaciaires.

2) ϵ maximum ; $\pi = 90^\circ$

L'excès d'insolation estivale provoque un bilan glaciaire négatif et une récession des calottes glaciaires.

Par suite de l'action des perturbations planétaires et lunaires, les caractéristiques de l'orbite elliptique de la Terre autour du Soleil subissent des variations qu'on peut résumer de la manière suivante :

1) La précession des équinoxes déplace la date de passage au périhélie avec une période voisine de 20 000 ans.

2) L'inclinaison de l'axe de la Terre oscille avec une période de 40 000 ans : il y a modification de la répartition du rayonnement entraînant un déplacement des cercles polaires et des tropiques.

3) L'excentricité e varie avec une période de l'ordre de 100 000 ans et module le cycle de la précession.

Variation de e , ϵ et π

	Valeur actuelle	Période	Amplitude
ϵ	23°	40 000	$1,5^\circ$
π	90°	21 000	360°
e	$0,017^\circ$	100 000	$0,05^\circ$

L'étude de la variation de l'insolation en fonction des modifications des éléments elliptiques est le nœud de la théorie astronomique des variations climatiques de MILANKOVITCH (1940). Ses calculs ont été repris récemment et la précision autorise à remonter le temps sur une période de 3 millions d'années.

L'évolution des températures est en bon accord qualitatif avec les variations connues : on note malgré tout un déphasage qui pourrait être dû au volant thermique que constituent les océans.

ACTION DE LA LUNE

Le bourrelet équatorial dû aux marées n'a pas son grand axe confondu avec la ligne des centres de masse car l'océan n'est pas un fluide parfait. La dissymétrie introduite provoque une

accélération fictive de la lune qui tend à s'éloigner de la Terre. Dans ce processus l'augmentation de l'énergie potentielle du système Terre-Lune est compensée par une perte d'énergie cinétique de la Terre qui ralentit son mouvement de rotation.

Ainsi les deux astres s'éloigneraient l'un de l'autre jusqu'à ce que les périodes de rotation soient les mêmes (modèle d'un haltère).

La théorie de l'évolution du système Terre-Lune a été étudiée par Darwin (fils) dès 1873. Quand on remonte le temps, les principaux résultats sont :

- diminution de la durée du jour : cette variation a été confirmée par les observations d'éclipses durant l'Antiquité et par l'étude de coraux fossiles qui développent des sillons sous l'influence des rythmes du jour, du mois lunaire et des saisons.

- diminution de la distance Terre-Lune a_L et augmentation de l'aplatissement H de la Terre (marées plus fortes).

- accélération de la précession des équinoxes P .

- amortissement des variations périodiques de e et $\sin \pi$.

- redressement de l'axe polaire : un pôle toujours froid et un fort gradient de température Equateur-Pôle favorisent l'extension de la calotte polaire donc état glaciaire ?

CONCLUSIONS ET DISCUSSION

Maintenant que la liste des différents mécanismes susceptibles de jouer un rôle dans les paléoclimats a été dressée on peut essayer d'analyser la contribution de chacun.

Précambrien et variations climatiques à longues périodes.

Durant cette période les indices utilisables sont pratiquement inexistantes car ils ont été en grande partie détruits par les bouleversements géologiques (il y a peut-être eu 5 âges glaciaires non datés). Durant cette période, il semble évident que la faible luminosité du Soleil ait joué un grand rôle. D'autre part, le redressement de l'axe polaire qui a agi en concomitance avec cet effet a dû favoriser l'extension d'un état glaciaire permanent pendant près de 3 milliards d'années. Cependant, deux effets ont pu jouer en sens contraire ; l'effet de serre peut être plus important (plus de CO_2 et du méthane) et la distance Terre-Soleil plus courte.

L'état glaciaire quasi-permanent aux premiers âges de la Terre est peut-être justifié par le lent développement de la vie à la surface de la Terre ; en effet, c'est seulement à partir du Cambrien qu'il y a vraiment eu explosion biologique alors que la vie existait depuis près de 3 milliards d'années sous forme de végétaux inférieurs. Les algues bleues sont nées à la faveur d'un petit réchauffement dans les zones équatoriales (elles ont pu survivre à un climat glacial général car elles peuvent résister à des températures de l'ordre de -269°C et sont capables d'effectuer la photosynthèse à -30°C).

Âges glaciaires.

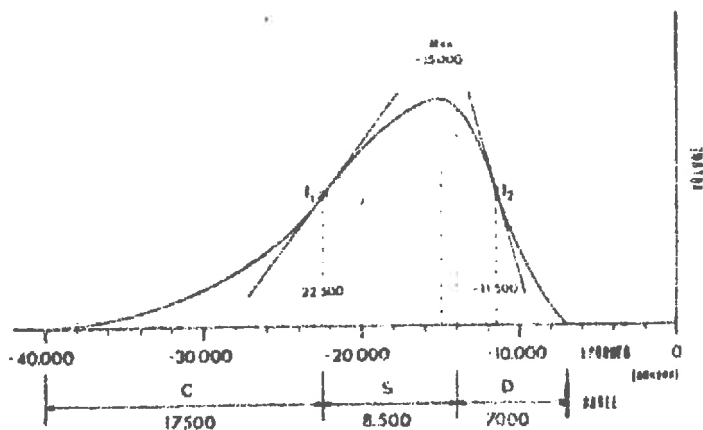
Les seuls phénomènes qui puissent varier sur une échelle de temps comparable à la «période» des âges glaciaires (environ 250 millions d'années) sont les phénomènes solaires. Ici, un modèle bien élaboré de structure interne du Soleil et quelques «bons» nuages de matière interstellaire placés çà et là dans la galaxie expliqueraient bien des choses (et de plus la période des âges glaciaires correspond à la période de rotation du Soleil autour du centre galactique). L'hypothèse des rencontres du Soleil avec des nuages de matière se perd dans l'arbitraire et serait peut-être une idée à vérifier (mais comment ?).

Pour les deux derniers âges glaciaires (permo-carbonifère et actuel), il semble que l'explication soit simple et naturelle et qu'il ne soit pas nécessaire d'en chercher des explications artificielles et complexes. En effet, depuis le Cambrien, la dérive des continents a joué un grand rôle et il ne faut pas oublier que la présence de continent à l'extrémité du Pôle est nécessaire à l'installation d'une calotte polaire conséquente (actuellement la glace de la banquise du Pôle Nord est négligeable devant celle emmagasinée dans l'Antarctique). La glaciation du permo-carbonifère a coïncidé avec l'installation au Pôle Sud du bloc continental méridional (Gondwana) et celle du quaternaire avec l'arrivée aux hautes latitudes polaires du Groënland et de l'Antarctique. L'âge glaciaire permien a disparu avec le morcellement du Gondwana qui a libéré les hautes latitudes australes. Les quelques résultats qualitatifs montrent que la dérive en latitude suffit à expliquer dans l'ensemble l'évolution paléoclimatique à l'échelle de 10 à 100 millions d'années mais ne permettent pas de conclure que d'autres phénomènes n'ont pas agi.

Glaciations et stades glaciaires.

Pour la période (- 250 000 ans — actuellement) l'accord avec les faits observés et les faits prédits par la théorie de MILANKOVITCH est remarquable. L'accord porte sur la nature, l'ampleur, la durée et l'âge des événements qui se sont succédés : naissance, développement et dislocation d'une calotte glaciaire. Le Würm III assez bien connu va être pris comme exemple.

Glaciation du Würm III.



Allure de la courbe de croissance de la glaciation Würm III : volume d'eau équivalente accumulée en glace.

Fig. 7

Vers - 33 700 (ϵ minimum, $\pi = 270^\circ$) il naît au Pôle Nord un déficit d'insolation estivale qui croît et se propage vers les latitudes moyennes tandis que l'insolation tropicale devient excédentaire. La circulation d'air saturé d'eau accélère le développement de la calotte glaciaire qui progresse pour deux raisons : l'albédo élevé de la glace $\sim 0,7$ amplifie le contraste thermique et la calotte refroidit les océans par l'intermédiaire des courants marins.

Vers - 22 500 (ϵ minimum, $\pi = 90^\circ$) le déficit a atteint son maximum et remonte désormais vers les hautes latitudes : il y a retrait de la calotte qui s'amorce avec un retard dû à l'inertie des océans.

Vers - 11 500 (ϵ maximum, $\pi = 270^\circ$) l'insolation estivale est maximale. La désagrégation s'achève vers - 7 000 époque de la disparition du glacier scandinave.

De nombreux faits militent en faveur de cette théorie : régression et transgression maritimes, cycle de 20 000 ans dans les varves glaciaires, rythmes de 4 000 ans dans les couches de houille...

Climat actuel.

Depuis environ 2 000 ans, on a mis en évidence d'incontestables alternances d'épisodes chauds et froids avec des pseudo-périodes liées à celles du cycle solaire (études de varves glaciaires, de bois fossiles, de carottes de glace). D'après les extrapolations faites, on se dirige vers une période où le climat sera un peu plus rigoureux, comme cela s'est produit vers l'an 1000 et l'an 1850. Au point de vue astronomique l'obliquité décroît pour passer vers un minimum ($22^\circ 62'$) dans 10 000 ans ; à cette époque π vaudra 270° et les conditions propices seront créées pour développer une nouvelle calotte glaciaire qui atteindra son maximum vers + 20 000. D'autre part, la Terre est entrée dans un âge glaciaire au début du quaternaire et va sûrement y rester encore pour quelques millions d'années.

LES ÉTOILES CARBONÉES

Conférence faite par J. Bergeat,
Observatoire de Lyon, le 6 février 1982

1 - INTRODUCTION

C'est entre 1863 et 1868 que l'astronome italien SECCHI observa pour la première fois un spectre d'étoile carbonée. Ces spectres initialement limités au domaine visible, sont dominés par de nombreuses bandes moléculaires (électroniques, vibration-rotation, ...) formées de milliers de raies très serrées, d'intensités très diverses (diaposites). Les nombreuses molécules identifiées sont essentiellement des composés du carbone : C_2 , CN, C_3 , Ch ... et plus récemment CO, C_2H_2 , HCN, CH_3 ... L'absence de composés oxygénés abondants en dehors de CO est la preuve que dans les atmosphères de ces étoiles le rapport des abondances atomiques carbone sur oxygène est supérieur à 1 (on note $C/O > 1$). En effet, aux températures inférieures à $5\,000^\circ\text{K}$, la molécule CO qui est très stable se forme préférentiellement, épuisant pratiquement l'atome le moins abondant (fig. 1) :

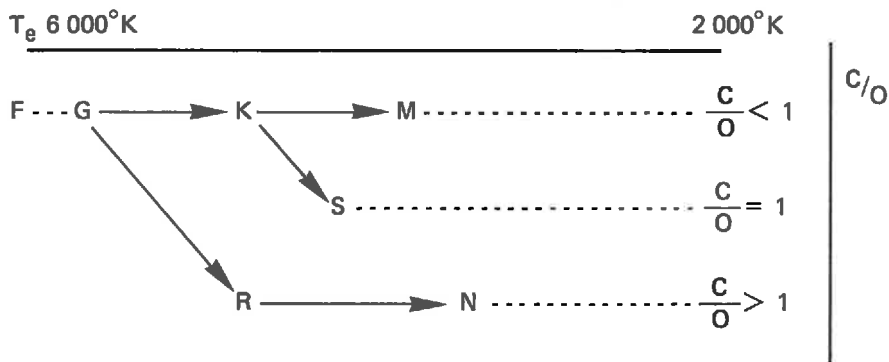


FIGURE 1

- Étoiles froides oxygénées de la classification de Harvard : types spectraux G, K, M ;
 $C/O < 1$: oxydes présents (TiO par exemple) dans les plus froides.

- Étoiles froides carbonées : R et N dans la classification de Harvard, $C_{i,j}$ dans la classification de Keenan et Morgan (1941) où les indices i et j étaient destinés (1) à repérer respectivement la température moyenne de l'atmosphère (décroissante de $i=0$ à 9) et l'abondance en carbone (croissante de $j=0$ à 7) : $C/O > 1$.

- Étoiles de type S, SC ou CS situées dans le domaine frontière avec $C/O \approx 1$.

Contrairement aux étoiles K et M parmi lesquelles on trouve à la fois des naines (classe V), des géantes (classes III, II) et même des supergéantes (classe I), il s'est très vite avéré que les étoiles carbonées étaient toutes des géantes plus ou moins brillantes (classes II, III). Elles peuplent une portion supérieure droite du diagramme de Hertzsprung-Russell (HR) loin de la séquence principale des étoiles naines, qui, à l'instar de notre soleil, transforment leur hydrogène central en hélium ($H \rightarrow He$).

(1) Nous avons maintenant la preuve que c'est au moins un échec partiel.

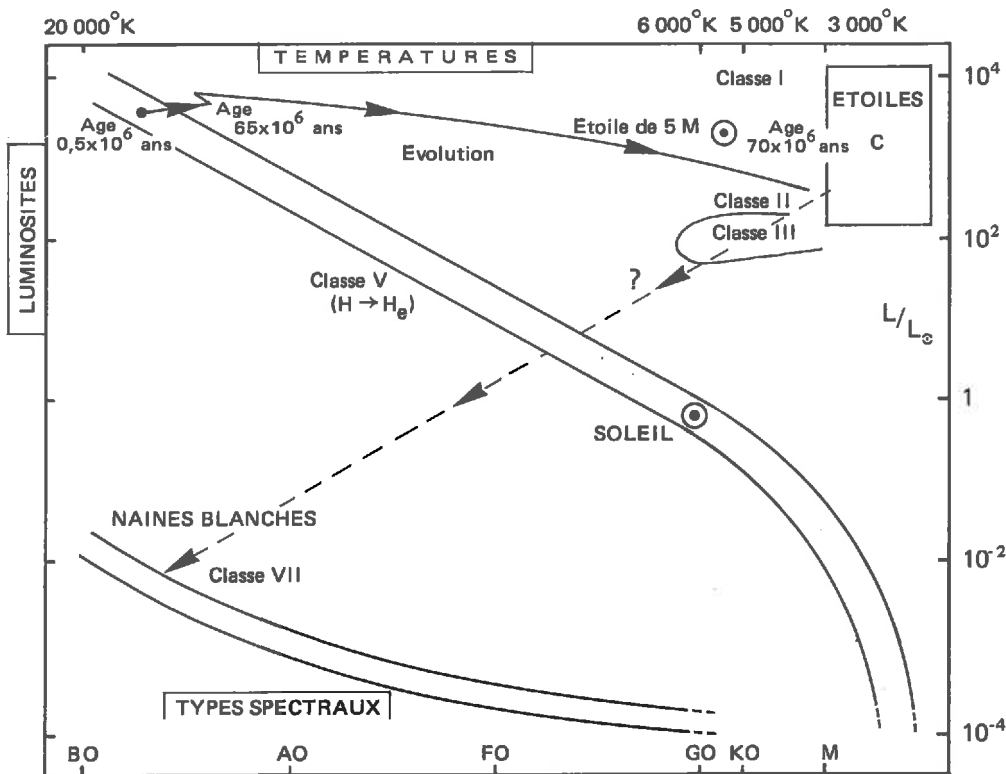


FIGURE 2

Nous nous limiterons ici aux carbonées froides ($T_e < 3\,000^\circ\text{K}$). Il devenait clair que leur rapport C/O anormalement élevé n'était pas le fruit d'anomalies locales de composition chimique de leur milieu interstellaire d'origine (MIO). Il était plutôt le résultat de deux phénomènes conjugués : voir figure 3 page suivante.

- la nucléosynthèse dans les couches profondes de l'étoile : des réactions thermonucléaires modifient les abondances originelles.

- la convection : lorsqu'une étoile quitte la séquence principale en direction de la zone des géantes froides, une zone de brassage par convection s'étend jusqu'aux couches profondes de l'étoile. La convection amènerait donc jusqu'à la surface de grandes quantités de «matériau» stellaire dont la composition chimique a été altérée par la nucléosynthèse.

2- NUCLÉOSYNTHESE : THÉORIE ET OBSERVATIONS

Cette hypothèse séduisante se heurte à de considérables difficultés lorsqu'on cherche, dans le détail, à confronter modèles et observations : la théorie de la convection est mal maîtrisée (choix d'un critère d'efficacité) ; l'évolution détaillée de ces modèles d'étoiles extrêmes est difficile à suivre même sur les gros ordinateurs modernes, parce que très rapide. D'autre part, la détermination des rapports d'abondance par les rapports d'intensités de raies est très difficile car la méthode habituelle des courbes de croissance ne peut être aisément

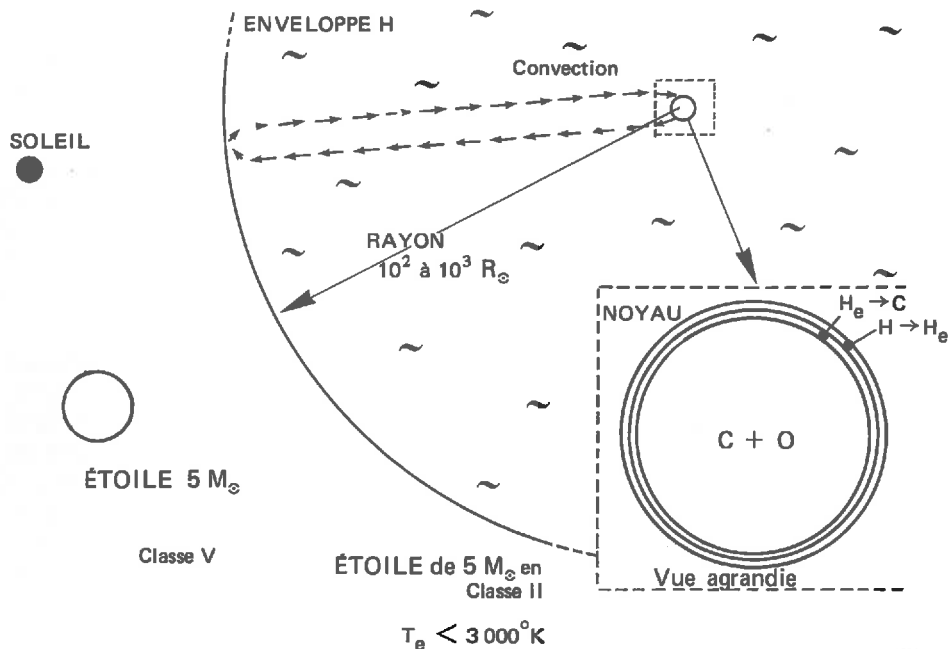
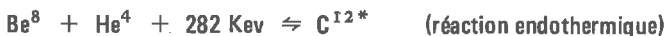


FIGURE 3

appliquée à ces atmosphères très froides. Certains chercheurs ont émis l'idée que le rapport $\text{C/O} > 1$ des étoiles carbonées pouvait être dû à l'influence du cycle double CNO (ensemble de réactions dont le bilan énergétique est essentiellement $4\text{H} \rightarrow \text{He}$; les éléments CNO Carbone, Azote, Oxygène intervenant dans les réactions peuvent montrer des abondances relatives assez diverses). Au terme d'une boucle logique vicieuse, des spectroscopistes montrèrent (il y a une dizaine d'années) que le rapport N/O des carbonées était très supérieur à 1 (jusqu'à 40 : résultat éminemment caractéristique du cycle double CNO), alors qu'ils avaient implicitement admis ce résultat lors de l'étude des équilibres de dissociations moléculaires. Une nouvelle étude soignée et plus récente (1975) a montré que :

$$0,1 < \text{N/O} < 0,3 \quad (\text{soleil} : 0,15)$$

avec O/H probablement (mais c'est moins sûr) de l'ordre de la valeur solaire (10^{-3} ou légèrement moins). Finalement, dans la majorité des étoiles carbonées froides, il semble que des trois éléments C, N et O, seul le carbone ait une abondance accrue (2). L'explication en terme de nucléosynthèse semble donc être le cycle 3α (particule $\alpha \equiv$ noyau He)



(2) Il faut bien noter que par rapport aux abondances solaires, la plupart des étoiles de population I présentent des différences (éventuellement jusqu'à un facteur deux en plus ou moins pour certains éléments : par exemple, le rapport Fer/Hydrogène - Fe/H) qui sont sans doute dues à des inhomogénéités d'enrichissement du MIO.

transformant l'hélium en carbone par l'intermédiaire du béryllium. D'autres éléments chimiques plus lourds (Zr, Ba, La, ..., soit Zirconium, Baryum, Lanthane, ...) participant d'une chaîne de réactions dite lente apparaissent également surabondants. L'hypothèse nucléosynthétique est donc confirmée mais il semble que le cycle double CNO n'ait pas dans la plupart des cas, le temps d'affecter substantiellement les abondances observées.

Toutefois la détermination plus précise du stade d'évolution des carbonées froides passe nécessairement par une détermination plus fine de leurs températures effectives et de leurs luminosités.

3 – LES ÉTOILES CARBONÉES VARIABLES PULSANTES

Contrairement aux étoiles carbonées chaudes (C_{0J} à C_{3J} : $T_e \geq 3\,000^\circ\text{K}$), les carbonées froides ($T_e \leq 3\,000^\circ\text{K}$) que nous étudions ici sont variables des types Irrégulier (I), Semi-Régulier (SR) et Mira (M). L'amplitude de variation des magnitudes visuelles croît depuis zéro vers $2\,900^\circ\text{K}$ à 5 ou 6 magnitudes dès $2\,000^\circ\text{K}$ tandis que la période P des variables SR et M passe de 150 à 250 jours à $2\,800^\circ\text{K}$ jusqu'à 450-600 jours à $2\,000^\circ\text{K}$ et en-dessous. Ces circonstances sont un obstacle à la détermination précise des températures et luminosités. Toutefois, ces étoiles rayonnent une grande partie de leur puissance dans le domaine infrarouge où leurs amplitudes, qui n'excèdent jamais 2 magnitudes, sont souvent négligeables. Une seconde difficulté réside dans les insuffisances des modèles d'atmosphère qui devraient permettre de passer de la distribution spectrale d'énergie observée, à la température effective (T_e), à la gravité (g) et à une estimation de la composition chimique (CC). Il a donc fallu au moins provisoirement introduire des modèles approximatifs. Une troisième difficulté tient au fait qu'aucune carbonée froide ne possède de parallaxe (donc de distance) bien déterminée par la méthode trigonométrique. Les seules méthodes indirectes applicables (appartenance à un système double, à un amas ...) n'ont donné que des résultats trop partiels et incertains. Par une étude photométrique et cinématique, l'auteur a pu déterminer les distances approximatives au soleil d'une quarantaine de carbonées froides (1978).

Tout récemment, de nombreuses observations (spectroscopie infrarouge par transformée de Fourier) ont montré que les variables M et SR, oxygénées ou carbonées, sont des étoiles pulsantes, un peu à la manière des Céphéides. Au moyen de la distance qu'il avait déterminée pour la mira carbonée U Cyg, l'auteur a pu transformer la courbe observée pour les variations de son rayon angulaire (photométrie) en courbe des variations du rayon. Cette courbe coïncide très bien avec celle obtenue en intégrant les variations de vitesses radiales ($\int_{t_0}^t v_r dt$; données spectroscopiques où la distance n'intervient pas) confirmant à la fois le modèle pulsant (oscillations de relaxation stationnaires) et la distance adoptée.

Finalement, l'auteur a pu montrer que, alors que toutes les variables carbonées miras et certaines SR pulsent sur le mode fondamental ($P > 250$ jours), certaines variables SR pulsent sur leur premier harmonique ($P < 250$ jours). Par comparaison avec des modèles hydrodynamiques, il a pu évaluer les masses d'un certain nombre de carbonées (1,5 à $6 m_\odot$ pour les variables SR contre 0,6 à $1 m_\odot$ pour les variables M).

4 – LE STADE D'ÉVOLUTION DES CARBONÉES FROIDES

Muni de ces renseignements, il est possible de discuter plus avant le stade d'évolution de ces étoiles. Les luminosités élevées et les modèles d'étoiles pulsantes adoptés conduisent à

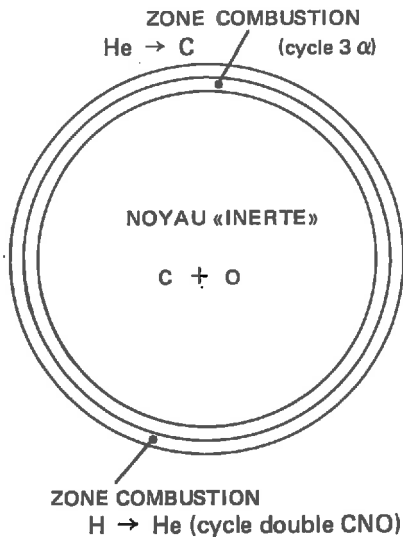


FIGURE 4

1,5 m_{\odot} et au-delà. A ce stade, les calculs montrent qu'un phénomène explosif (détonation du carbone) du type supernova se produit. Or, compte tenu de la rareté du phénomène supernova, il est impossible que ce soit là le destin de la majorité des étoiles carbonées. D'après leurs luminosités, les carbonées observées auraient des masses de noyau (0,5 à 0,8 m_{\odot}) très inférieures à la masse limite critique de 1,5 m_{\odot} .

Leur position dans le diagramme HR suggère que le mélange par convection qui amène vers les couches supérieures des éléments lourds (C, O ? ...) pourraient inversement apporter du combustible «frais» (H et He) dans les fines enveloppes où se tient la combustion. Le processus d'expansion du noyau inerte serait donc freiné.

5 - LA PERTE DE MASSE DES CARBONÉES ET LEUR DESTIN

Cette dernière vue est largement spéculative. Toutefois, elle reçoit une confirmation indirecte par la mise en évidence de la perte de masse de ces étoiles. Une perte de masse substantielle (par éjection) pourrait permettre, durant la phase ralentie précédemment mentionnée, à l'étoile carbonée de passer en-dessous du seuil critique de 1,5 m_{\odot} . L'auteur a pu montrer que la distribution spatiale et les propriétés cinématiques sont assez voisines pour les deux échantillons : faibles masses ($< 1,5 m_{\odot}$) et fortes masses ($> 1,5 m_{\odot}$). Ce sont des objets des bras spiraux concentrés au voisinage du plan galactique. En particulier les miras carbonées de masses 0,6 à 0,8 m_{\odot} ne sont pas des objets de population II. Signalons qu'il existe effectivement des carbonées de population II que nous ne considérons pas ici. Comme il est exclu que des étoiles de population I de masses initiales inférieures à une masse solaire aient atteint ce stade d'évolution (il leur faut 10^{10} ans au moins), il devient inévitable d'admettre que les miras carbonées de faibles masses ont évolué avec *forte perte de masse*, à partir de semi-régulières plus massives ($> 1,5 m_{\odot}$).

admettre que ces étoiles ont déjà brûlé leur hélium central (réaction 3α). Un noyau composé de carbone et d'oxygène progresse vers l'extérieur, entouré de deux fines enveloppes serrées où brûlent respectivement l'hélium et l'hydrogène. L'immense enveloppe extérieure ténue, riche en hydrogène, pulse et rebondit au-dessus du noyau compact. Dans le cas des variables M, l'amplitude du phénomène est telle que, au moment de la compression maximale, une onde de choc se produit dans l'enveloppe géante (phase 0,9 environ) qui se propage ensuite vers l'extérieur, ionisant l'hydrogène sur son passage. C'est à ce phénomène qu'est due l'apparition, un peu avant le maximum de lumière (phases 0'9 à 0,15), de raies d'émission de l'hydrogène ($H\alpha$, $H\beta$, ...).

Au fur et à mesure de la combustion et de l'épuisement de l'hydrogène et de l'hélium, une étoile carbonée de masse supérieure à 1,5 m_{\odot} devrait voir son noyau croître jusqu'à

Ce point de vue est confirmé par l'observation. Les étoiles carbonées montrent des excès de rayonnement infrarouge plus ou moins importants, attribués à l'émission thermique de grains solides (graphite, carbure de silicium SiC) qui se condensent dans l'atmosphère en expansion de ces étoiles (à une distance du centre de l'étoile typiquement de 1,5 à 2 rayons d'étoile où les conditions thermochimiques nécessaires sont atteintes). Ces grains expulsés vers l'extérieur par la pression du rayonnement pourraient d'ailleurs, par interaction avec le gaz de l'atmosphère, entretenir la perte de masse. Autour de quelques carbonées à fortes pertes de masses

(IRC + 10 216 = CW Leo ; CIT 6 = RW LMi ...)

les observations radios ont montré des nuages moléculaires en expansion jusqu'à 20-40'' du centre de ces étoiles et permis la détection de dizaines de molécules (émission thermique, raies de rotation, peut-être même des masers pour la molécule CO ...).

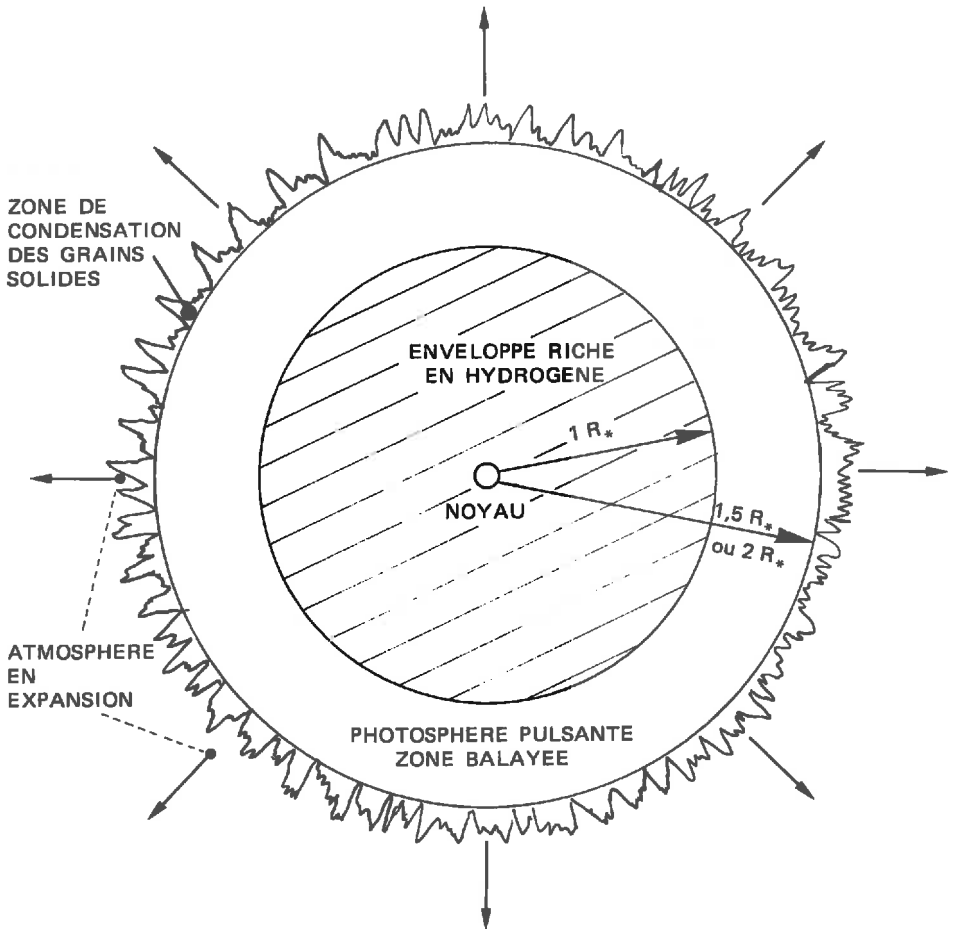


FIGURE 5

Il est probable que l'évolution des carbonées les conduit après éjection quasi totale de leur enveloppe riche en hydrogène, au stade de naine blanche. On envisage (mais sans certitude) que cette traversée du diagramme HR s'accompagne d'une passage par le stade de «nébuleuses planétaire» où l'étoile est pratiquement réduite au noyau (50 000 à 100 000° K en surface) avec une enveloppe éjectée (0,1 m_{\odot}) visible à grande distance de l'étoile. Comme certaines géantes froides oxygénées, les carbonées contribuent à l'enrichissement en éléments lourds du milieu interstellaire et fournissent une partie des molécules et des grains des grands nuages qui bordent les bras de la voie lactée.

Société Astronomique de Lyon
69230 — Saint-Genis-Laval

Sommaire

- 1 — Suite de l'article «Phénomènes astronomiques et variations climatiques», paru dans le Bulletin précédent.
- 9 — Les étoiles carbonées, conférence faite par J. Bergeat.

PRIX : 10 F