

**SOCIETE
ASTRONOMIQUE
DE LYON**



REVUE TRIMESTRIELLE

Nouvelle série — N° 20 — 1982

Notre photo de couverture :

Galaxie d'Andromède (M 31).

Pose : 25 min sur film 103 A 0, au foyer d'un télescope de 200 mm, développée dans 019 b 4 min 30 s à 20 ° C.

Photographie prise par les membres du

Club d'Astronomie Lyon Ampère

37, rue Paul Cazeneuve

69008 LYON

Ce club est ouvert aux jeunes de 10 à 20 ans.

LA FORMATION DES ÉTOILES

Conférence de Madame LUNEL, le 29 mars 1980

La Galaxie est vieille de quelques 10 milliards d'années, le Soleil de 5 milliards. Les étoiles les plus massives et les plus brillantes n'ont que quelques millions d'années. On sait par exemple qu'une étoile comme Sirius avec une masse de 3 masses solaires a une durée de vie de 100 millions d'années ; le Soleil mettra 30 fois plus de temps à poursuivre son évolution. Quant à une étoile de 50 masses solaires, elle aura, à l'échelle cosmique une durée de vie très courte. Donc nous avons la certitude d'observer des étoiles nouvellement formées et nous pouvons dire que les étoiles se forment «sous nos yeux» de façon continue. Pourtant jusqu'à ces dernières années, les observations n'ont mis en évidence que des étoiles déjà formées. Actuellement un grand nombre de faits d'observation confirment l'hypothèse (formulée par Kant dès 1755 !) que les étoiles se forment par condensation du gaz interstellaire. Une des preuves les plus nettes est le fait de l'association du gaz interstellaire et des étoiles jeunes. On ne trouve pas d'étoiles jeunes sans matière interstellaire ... on ne trouve pas d'étoiles vieilles noyées dans la matière interstellaire.

Pourquoi ce sujet présente-t-il un regain d'intérêt depuis quelques années ? Tout simplement parce que les progrès tant dans les domaines observationnels que théoriques ont permis d'accéder à des phases nouvelles de l'évolution stellaire. Il s'agit essentiellement :

1) de l'amélioration des techniques d'observation infrarouge et radio surtout en ce qui concerne l'augmentation de la sensibilité des détecteurs et l'augmentation de la résolution spatiale ;

2) du développement des ordinateurs qui a rendu possible la résolution théorique de problèmes physiques complexes. L'interprétation des observations (absorption dans le visible, émission thermique des poussières dans l'infrarouge, étude des raies moléculaires en radio) montre que les nuages interstellaires sont froids (quelques dizaines à quelques centaines de degrés Kelvin) et peu denses. A partir du moment où la condensation démarre, l'énergie gravitationnelle libérée chauffe le milieu. L'objet en formation qu'on appelle protoétoile se distingue du milieu générateur. Dans les phases initiales de leur évolution, les protoétoiles seront donc des objets relativement étendus peu denses et froids. L'observation en est difficile car l'énergie est rayonnée surtout dans l'infrarouge et les progrès observationnels sont liés aux progrès techniques d'une part ; d'autre part ces sources émettent peu ou tout au moins nous recevons peu en raison de leur éloignement. La région la plus proche de nous où semblent se former des étoiles est la nébuleuse M 42 (catalogue Messier) de la constellation d'Orion. Sa distance est de 500 parsecs c.à.d $1,5 \cdot 10^{19}$ mètres... Les détails les plus fins que l'on peut espérer y déceler sont de 2" en optique et de 0,01" en interférométrie radio. Un petit calcul montre que dans un cas ceci équivaut à 1 000 unités astronomiques et dans l'autre à 5 U.A. Quand j'aurai ajouté que toutes les autres régions supposées de formation stellaire sont au moins 3 fois plus éloignées, on comprendra l'ampleur des problèmes auxquels s'ajoutent encore les difficultés techniques liées au peu de sensibilité des détecteurs et à la sophistication des méthodes à grande résolution spatiales. On ne peut donc pas attendre des observations la mise en évidence de détails très fins de structure ou la mesure d'un grand nombre de paramètres physiques.

Je vais d'abord essayer d'expliquer comment les théoriciens «voient» la formation stellaire et ensuite je parlerai des résultats d'observation ou des tests observationnels possibles pour confirmer ou infirmer ces idées.

1ère question : Comment démarre la condensation ? C'est la première difficulté à laquelle se heurtent les théoriciens. Il faut imaginer des processus capables de provoquer des contrastes de densités. Quand une perturbation hydrodynamique se propage dans un gaz à une vitesse subsonique, le gaz a le temps de s'adapter à la perturbation, tout en restant en équilibre. Lorsque la perturbation est supersonique, tout se passe comme si les particules constituant le gaz se trouvaient projetées sur un mur rigide avec une vitesse supérieure à leur vitesse d'agitation thermique. Le régime stationnaire des collisions est détruit. C'est une zone de chocs visqueux. Un nuage de gaz parfait, sphérique, isotherme, homogène s'effondre gravitationnellement si les forces de gravitation qui tendent à lier les molécules entre elles sont supérieures aux forces d'agitation thermique qui tendent à les éloigner. Vraisemblablement, c'est sous l'effet combiné de l'instabilité thermique et de l'instabilité dite de Parker (action conjointe de la pression magnétique et de la pression de radiation des rayons cosmiques) que se produit la transition du milieu ténu au milieu dense. On écrit que l'énergie gravitationnelle est prédominante et ceci donne une masse critique (critère de Jeans) à partir de laquelle il y a effondrement du nuage interstellaire. Après sa formation le nuage interstellaire dense est comprimé jusqu'à ce que les conditions de fragmentation soient réalisées, puis fragmenté. Chacun des fragments est enfin condensé jusqu'à l'équilibre quasi-hydrostatique, condition initiale des modèles d'évolution stellaire. Les supernovae peuvent elles aussi produire des chocs dans le milieu interstellaire. La source des chocs, leur force, leur rythme de production, sont vraisemblablement bien compris. Il n'y a pas de raisons de penser que les chocs par supernovae soient moins efficaces pour la formation des étoiles que les autres mécanismes. Le calcul des implosions par chocs s'applique aux chocs par supernovae aussi bien qu'aux chocs produits par onde de densité.

Ensuite que se passe-t-il ?

Premier stade

Le nuage qui était froid et peu dense commence à se contracter. Sa densité augmente ; si le nuage est massif un «cœur» devient distinct du reste du nuage. La densité croît mais la température reste faible grâce à des phénomènes de refroidissement du milieu ; mais les collisions avec la poussière deviennent rapides. L'émission en infrarouge lointain ou en ondes submillimétriques pourrait permettre au gaz de rester froid même à des densités très élevées ce qui conduit à une autre fragmentation jusqu'à ce que des fragments de masses voisines d'étoiles individuelles deviennent distincts.

Il faut souligner que le critère de Jeans n'est qu'une condition suffisante pour que l'instabilité gravitationnelle se produise. Ainsi un nuage de 60 masses solaires à la limite de l'instabilité s'effondrera, mais l'objet résultant sera une étoile de 17 masses solaires et plus de 70 % de la masse initiale aura été rejetée par la pression de radiation.

Deuxième stade

Si une protoétoile massive se forme, sa radiation chauffera la poussière restant dans le cœur et le milieu deviendra dense et chaud. On suggère quelquefois que cette élévation de température due à la formation d'une étoile massive empêche la formation d'étoiles de faible masse en élevant la masse critique de Jeans. Dans ce cas-là, où se forment-elles ? Les nuages de faible masse sont-ils seulement capables de former des étoiles de faible masse ? Larson pense que les deux types d'objets peuvent se former dans la même région... et Sargent pense exactement le contraire !

Troisième stade

Ce troisième stade ne peut se produire que si une étoile très massive s'est formée ; autour une région de faible densité et de haute température s'est produite ; une région H.II substantielle peut par exemple se former et s'étendre ou de nouvelles étoiles peuvent accréter la plus grande partie de la matière dans le cœur tout en le conservant chaud.

Supposons l'étoile ou les étoiles formées, les théoriciens se heurtent à un obstacle sérieux : celui du moment angulaire. Si l'on suppose qu'un nuage dense standard d'une masse solaire, tournant à la vitesse de la Galaxie se condense jusqu'aux dimensions du Soleil, on obtient un astre dont la vitesse équatoriale est voisine de celle de la lumière. Jusqu'à présent aucun processus vraiment satisfaisant n'a permis de «perdre» du moment angulaire par exemple en le transférant dans les mouvements orbitaux de systèmes planétaires ou d'étoiles doubles. De même l'influence du champ magnétique est mal comprise.

Voyons maintenant ce que nous apprend l'observation. Nous constaterons que l'accord entre les résultats d'observation et les prévisions théoriques est encore médiocre. Quoi d'étonnant ? Je vous disais plus haut que les modèles ne pouvaient être construits que depuis l'apparition de calculateurs puissants, que les observations n'étaient intéressantes que dans l'infrarouge et le millimétrique... Or là aussi comme pour les protoétoiles, nous sommes dans une phase initiale !

En fait le scénario imaginé par les théoriciens est grossièrement confirmé par les observateurs mais il n'est pas encore possible d'interpréter toutes les observations à partir de la théorie. Disons tout de suite qu'il n'existe pas de critère observationnel permettant de distinguer si une étoile est rougie par une enveloppe ou par un nuage situé sur la ligne de visée et la seule donnée dynamique à laquelle on a quelque chance d'accéder est la projection de la vitesse sur la ligne de visée. Le théoricien est plus favorisé : il s'efforce de construire un modèle. Il sait à peu près d'où il part (le nuage dense) et où il doit arriver (le Soleil par exemple). Entre ces deux étapes, il n'a pratiquement pas de support observationnel. Dans son modèle il ne peut évidemment pas mettre toute la physique connue et en raison de la nature non linéaire des équations, des processus négligés au début de l'évolution peuvent devenir prépondérants par la suite.

On connaît actuellement des sources infrarouges ponctuelles qui pourraient être des étoiles en formation. Le problème d'identification n'est pas encore résolu. Il faudrait savoir distinguer une protoétoile rayonnant dans l'infrarouge parce qu'intrinsèquement froide d'une étoile à cocon, étoile déjà formée mais encore enfermée dans un nuage optiquement épais dans le visible, qui réémet dans l'infrarouge, par l'intermédiaire des grains de poussière qu'il contient les rayonnements ultraviolet et visible émis par l'étoile centrale. Une polémique existe à ce sujet depuis plusieurs années en ce qui concerne la nature de l'objet de Becklin. Certains critères ont permis l'identification d'étoiles à cocon : quand l'étoile centrale est suffisamment chaude en surface ($25\ 000^{\circ}\text{K}$) le rayonnement ionise une partie de l'enveloppe et le rayonnement émis dans le domaine radio n'est pas absorbé par le nuage de poussière. Il peut donc être observé ; c'est le cas de la source IRS 3 du complexe radio W 3. Lorsque l'étoile est moins chaude, des spectres à haute dispersion dans l'infrarouge peuvent permettre la détection de raies atomiques, signature de l'existence d'une étoile centrale.

Comment définir des critères permettant de reconnaître si un objet infrarouge est une protoétoile ? Outre le fait qu'elle rayonne dans l'infrarouge, il faudrait être capable d'interpréter sans ambiguïté les champs de vitesses observés. Dans le voisinage des sources infrarouges on détecte souvent des masers OH et H 20. Dans le cas d'Orion, des mesures

interférométriques à très longue base ont permis de leur attribuer des dimensions de de l'ordre de 10^{13} centimètres, ordre de grandeur prêté aux noyaux des protoétoiles. Est-il possible d'identifier ces masers à une protoétoile dans une phase donnée de son évolution ? Si oui, quelle est l'origine de leur variabilité ?

Pour de multiples raisons, il est invraisemblable que les nuages massifs s'effondrent uniformément. Cependant, on peut identifier une ou plusieurs régions de densité plus élevée et/ou de température plus élevée, par exemple le nuage d'Orion. Une région plus simple est associée à Sharpless 140. Ici le pic de température coïncide avec le pic de densité et contient une forte émission infrarouge. Comme c'est un modèle classique il est naturel d'identifier ces régions à des sites de formation stellaire. Ainsi nous pouvons penser que des nuages massifs forment des étoiles d'abord d'un côté, puis d'un autre. Pour un nuage plus petit, comme un globule de BOK, l'effondrement peut être plus régulier et s'appliquer à tout le nuage. Malheureusement, la petite taille de la plupart des globules comparée à la résolution des télescopes courants à ondes millimétriques rend cette hypothèse difficile à vérifier.

Je vous ai parlé tout à l'heure du stade 2 dans lequel une protoétoile est déjà formée. Des objets comme les sources IRS 3 des nuages moléculaires d'Orion 1 et 2, peuvent être identifiés comme étant à ce stade. La poussière chauffe le gaz et nous recueillons de l'infrarouge lointain. Ces sources coïncident ou sont souvent très proches d'émissions moléculaires, notamment d'émissions CO et ce sont les pics CO qui attirent l'attention des infrarougeistes.

Pour le premier stade la localisation est plus difficile car il n'y a pas d'émissions CO pour guider l'observateur. Il faudrait identifier des régions de densités comparables mais beaucoup plus froides. Le stade 3 n'est pas facile non plus à repérer, sauf dans le cas où une région H II s'est formée. Les sources peuvent encore être entourées de régions denses. Ce doit être le cas du nuage OB 3 de Céphée. La détection des protoétoiles se fait à 10 microns dans les premiers stades puis au cours de l'évolution, la luminosité diminue mais la détection peut se faire à 2μ . Malheureusement parmi les objets trouvés il est très difficile d'affirmer que ce sont des protoétoiles plutôt que des étoiles rougies de la séquence principale. Certains objets présentent la luminosité et les caractéristiques requises par la théorie.

Actuellement on peut conclure que les conditions physiques dans les nuages moléculaires ne donnent aucune preuve que les étoiles peu massives ne puissent pas se former dans les mêmes régions que les étoiles massives. Les observations disponibles conduisent aux mêmes conclusions. Même pour un nuage en train de s'effondrer le champ magnétique qui est lié au milieu extérieur peut stopper l'effondrement des couches externes formant une enveloppe étendue. Le cœur du nuage continue à se contracter et forme une étoile de faible masse.

Je vous ai parlé de la formation des étoiles dans notre Galaxie. Comment, où, pourquoi des étoiles se forment ; comment les observer ? Ces problèmes sont du ressort des expérimentateurs et des théoriciens «stellaires». Mais on s'est posé la question à une échelle plus étendue et J. Heidman, notamment, a montré l'existence de galaxies à fort excès ultraviolet ayant une morphologie qui consiste en une demi-douzaine de grumeaux de grande brillance superficielle dispersés dans une enveloppe commune. Ces galaxies ont des luminosités, des vitesses internes, des dimensions supérieures à celles des galaxies irrégulières classiques. Ces grumeaux pourraient être chacun 50 fois plus massifs que les régions H II géantes connues et être le lieu de production d'étoiles sur une échelle énorme. Ceci serait une brillante confirmation du fait que les étoiles se forment nécessairement en groupe.

OBSERVERONS-NOUS JAMAIS L'EXPLOSION PRIMORDIALE DE L'UNIVERS ?

Conférence de H. ANDRILLAT, le 16 mai 1981

On s'accorde aujourd'hui à expliquer les observations astronomiques à l'échelle cosmologique à l'aide de modèles d'univers en expansion à partir d'une explosion primordiale ou big bang.

Une conséquence de tels modèles réside en une diminution constante de la température T du rayonnement au cours du temps à mesure que s'accroît le rayon R de courbure de l'univers, selon une loi

$$RT = \text{cte}$$

Une telle loi autorise des températures aussi élevées qu'on veuille bien imaginer dans les premiers instants de l'Univers. A ces hautes températures, tous les types de particules élémentaires sont constamment créées à partir de l'énergie ambiante.

Par exemple, le proton, matériau de base de tous les atomes a une masse :

$$m_P = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g}$$

D'après la loi d'Einstein,

$$E = mc^2$$

sa « création » exige une énergie

$$E_P = m_P \times c^2 = 1,66 \cdot 10^{-24} \times 9 \cdot 10^{20} \cong 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ erg}$$

Si cette énergie doit être purement thermique, comme dans les conditions physiques de l'univers primordial, elle doit alors correspondre à une température T_P , donnée par la loi de Boltzman

$$E = kT$$

avec $k = 1,32 \cdot 10^{-16}$, on trouve T_P de l'ordre de 10^{13} degrés Kelvin.

On dit que 10^{13} K est la *température de seuil* du proton. Cela signifie qu'il faut atteindre cette température pour que le proton soit créé à partir de l'énergie et il va de soi que ce processus se poursuit pour des températures plus élevées.

En fait, une particule n'est jamais créée seule à partir de l'énergie, mais toujours accompagnée de son antiparticule, en l'occurrence ici dans l'exemple en question, l'antiproton.

Par ailleurs, particules et antiparticules s'annihilent par paires pour redonner de l'énergie. Ainsi, au-dessus de la température de seuil correspondante, particules et antiparticules sont créées pour s'annihiler aussitôt en rayonnement. Dans un tel milieu, un observateur éventuel ne pourrait pas distinguer matière et énergie. C'est l'état physique de l'univers où règne la parfaite équivalence entre la matière et l'énergie, conformément à la loi d'Einstein.

$$E = mc^2$$

Mais, quand en se refroidissant au cours du temps, l'univers s'approche de la température de seuil d'un certain type de particules, les annihilations par paires se font plus nombreuses que les créations par paires et, finalement, à la température de seuil, toutes les particules se sont annihilées avec leurs antiparticules laissant place à la seule énergie d'annihilation sous forme de rayonnement.

D'après ce scénario, l'univers, de nos jours très refroidi (c'est la fameuse découverte du rayonnement à 3 K) ne devrait plus présenter aucune trace de matière et, de fait, à l'exception des protons et du nombre correspondant d'électrons nécessaires à la formation des atomes, toutes les autres particules se sont annihilées.

L'exception du proton est d'une importance essentielle puisque, sans elle, l'univers matériel n'existerait pas ; pas plus que n'existeraient des êtres capables de s'interroger sur l'univers. L'univers serait seulement réduit à sa composante énergétique, ce froid rayonnement de 3 K emplissant uniformément l'espace.

Ce n'est que très récemment que les développements de la physique théorique ont permis d'expliquer cette exception du photon et du même coup résoudre très probablement l'intrigante question de l'antimatière dans l'univers.

Le proton ne serait pas la particule absolument stable comme on le croyait jusqu'alors. Le proton, comme l'antiproton d'ailleurs, peut se désintégrer. Mais dans les conditions physiques actuelles, sa durée de vie serait de l'ordre de 10^{31} ans. Autant parler d'une stabilité absolue ! Par contre, dans les conditions physiques de l'univers primordial, les désintégrations des protons et des antiprotons étaient règle courante, avec d'ailleurs, selon une loi observée pour la désintégration d'autres particules, un taux de désintégration des protons différent de celui des antiprotons. Que ce dernier fût plus rapide et, à la température de seuil, le nombre de protons se trouvait supérieur (Oh ! de peu : 1 pour 10^9 a-t-on calculé !) à celui des antiprotons. C'est ce léger déséquilibre qui devait laisser pour compte, après toutes les annihilations par paires, un résidu de protons, un univers matériel *sans antimatière*.

Les événements qui viennent d'être décrits occupèrent seulement les quelques premiers centièmes de seconde de l'Univers. Ultérieurement, se déroula une longue période au cours de laquelle se produisit pour les électrons (particules 2 000 fois plus légères que le proton et dont la température de seuil est donc de 5.10^9 K) les mêmes processus que pour les protons : créations par paires, puis annihilations par paires avec, en fin de compte, un résidu d'électrons dû au déséquilibre entre le taux de désintégration des protons et celui des antiprotons, et ce, en nombre rigoureusement égal au nombre de protons subsistants.

Ainsi fut formée la matière, à l'état *ionisé* d'abord à cause de la température très élevée. Dans cet état ionisé, les électrons libres se présentent comme de gigantesques cibles pour les photons du rayonnement. C'est cette interaction permanente photons-électrons, ou rayonnement-matière qui conféra, une fois pour toutes, statistiquement, le caractère *thermique* au rayonnement de l'Univers. Il faut s'imaginer l'état de ce milieu d'interaction rayonnement-matière comme celui d'une grande *opacité*, avec un libre parcours moyen des photons très court. L'Univers était alors opaque. Il est par ailleurs facile de démontrer que la loi d'expansion de l'espace conserve le caractère thermique acquis par le rayonnement dans cet Univers opaque, même si ultérieurement l'Univers devient transparent, ce qui est le cas actuellement.

Ainsi se trouve résolue l'énigme que posait l'observation du rayonnement de 3 K dont le caractère thermique a été confirmé récemment : comment expliquer le caractère thermique de ce rayonnement dans un Univers transparent où il n'a plus d'interaction avec la matière ?

Après environ un million d'années d'âge, quand l'Univers atteint la température critique de 3 000 K, la matière passa brusquement de l'état ionisé à l'état neutre. Les électrons désormais combinés aux noyaux ne firent plus barrage au passage des photons : l'Univers devint *transparent*.

Désormais, la matière s'organisera en amas de galaxies et en systèmes stellaires dans les galaxies. La visibilité des galaxies lointaines deviendra possible à cause de la transparence de l'Univers. Tel objet lointain dans l'espace est vu dans un état de passé également lointain et ces deux aspects peuvent être simultanément exprimés par le *décalage spectral* observé de l'objet.

Le passé correspond à l'âge où l'univers avait la température de 3 000 K est caractérisé par le décalage spectral $z = 1\ 000$. C'est un passé très lointain. L'Univers avait alors environ *million* d'années d'âge. Aujourd'hui, il a 20 à 30 *milliards* d'années. Les galaxies les plus lointaines observées aujourd'hui sous la forme de certains quasars ont des décalages spectraux qui n'excèdent pas quelques unités.

Cette description rapide de l'histoire générale de l'Univers, pour enthousiasmante qu'elle soit par la connaissance qu'elle nous apporte et par l'explication qu'elle fournit des principaux faits cosmologiques d'observation, n'est pas sans laisser l'amertume d'une certaine déception : l'impossibilité physique d'observer jamais optiquement les premiers instants de l'Univers. L'opacité de celui-ci au décalage spectral 1 000 est un horizon physique absolu à toute investigation optique que l'on voudrait porter au-delà.

De cet état encore très chaud de l'Univers à 3 000 K, les photons du rayonnement de 3 K nous apportent aujourd'hui, avec leur décalage spectral de 1 000, l'image très rougie et très refroidie. Ils constituent l'ultime visibilité avant l'opacité.

Les astronomes sauront-ils un jour développer une astronomie des neutrinos ou une astronomie des gravitons pour reculer les limites de l'horizon du visible en direction de l'explosion primordiale de l'Univers ? L'avenir nous le dira. Devant la moisson actuelle des résultats de la cosmologie, pourquoi ne ferait-on pas confiance à l'ingéniosité future en matière de progrès astronomiques ?

Déjà en l'état actuel de nos connaissances, c'est un fait remarquable qu'un modèle d'Univers en expansion à partir d'une explosion primordiale, basé sur la théorie de la relativité générale d'Einstein, arrive à rendre compte de tant de faits astronomiques observés : la loi de Hubble, l'absence d'antimatière, le caractère thermique du rayonnement de 3 K. Et plus près de nous, l'expérience intuitive de la nuit noire !... Olbers y avait vu un paradoxe. La nuit devrait être infiniment brillante (et le jour aussi). La nuit est noire à cause de cet écran d'opacité que l'Univers tend devant nos yeux au décalage 1 000.

Combien il est difficile parfois d'expliquer les plus simples choses !

LES TROUS NOIRS

Conférence du 24 janvier 1981

par Monsieur M.G. MONNET, Directeur de l'Observatoire de Lyon

I — Peuvent-ils exister ?

Dans le cadre de la Mécanique Newtonienne, la possibilité de Trous Noirs a été examinée par Laplace, dès 1800. A la surface d'un corps quelconque (étoile, planète, satellite), de masse M et de rayon R , on définit une vitesse critique, dite vitesse de libération :

un objet lancé avec une vitesse inférieure à V_{crit} retombe sur le corps principal : un objet lancé avec une vitesse supérieure ou égale à V_{crit} s'éloigne indéfiniment.

Elle est donnée par :

$$V_{\text{crit}}^2 = \frac{2GM}{R}$$

où G est la constante de Gravitation.

Exemple

Pour la Terre :	$R = 6\,000 \text{ km}$	$V_{\text{crit}} = 11 \text{ km/s}$
Pour le Soleil :	$R = 750\,000 \text{ km}$	$V_{\text{crit}} = 600 \text{ km/s}$

Si l'on comprimait la Terre — ou le Soleil — pour diminuer son rayon, sans changer évidemment la masse, la vitesse de libération augmenterait.

Pour $R = 5 \text{ cm}$ (Terre) et $R = 3 \text{ km}$ (Soleil), on aurait : $V_{\text{crit}} = C = 300\,000 \text{ km/s}$, c'est-à-dire la vitesse de la lumière.

On voit donc qu'un corps de masse M et de rayon R inférieur à $R_{\text{crit}} = \frac{2Gm}{C^2}$ possède un champ de gravité si fort que même la lumière ne peut s'en échapper. C'est pour cette raison qu'il est appelé Trou Noir.

Le problème a été repris au début du siècle, à partir des concepts beaucoup plus profonds de la Relativité Générale d'Einstein : la notion d'attraction gravitationnelle devient alors purement géométrique.

La matière courbe l'espace autour d'elle.

La courbure de l'espace dévie les trajectoires de la Matière.

Cette courbure augmente avec la masse et diminue avec le rayon. Pour une valeur critique $R_{\text{crit}} = \frac{2GM}{C^2}$, la courbure de l'espace devient infinie. Rien ne peut alors s'échapper de l'objet, ni lumière, ni matière qui, en Mécanique Relativiste, ne peut pas atteindre la vitesse de la lumière. On obtient donc un Trou Noir, et ce pour un rayon critique identique à celui donné par la Mécanique de Newton.

Il faut avouer que ce nouvel état de la matière est pour le moins singulier : le Trou Noir a une masse, un moment angulaire aussi s'il s'est formé à partir d'un corps en rotation. Par contre il n'a pas, à proprement parler, de dimensions : le rayon critique, ou horizon, définit la distance minimum à partir de laquelle on ne peut se rapprocher sans être irrésistiblement avalé, même si l'on voyage sur de la lumière. Mais l'objet lui-même a des dimensions nulles et une densité infinie. Ce n'est plus en fait de la matière, mais un trou dans la structure même de l'espace.

Il y a quelques années seulement, ces propriétés bizarres jetaient un doute sur l'existence même des Trous Noirs. Les recherches théoriques récentes à ce sujet semblent bien montrer qu'il n'en est rien et que tout système matériel trop concentré évolue inéluctablement vers un Trou Noir.

Encore faudrait-il pour que l'existence de ces objets ne soient pas purement théorique que ces conditions extrêmes puissent spontanément se former dans la Nature. Nous allons examiner ici deux modes de formation possibles : comme stade final de l'évolution stellaire et par coalescence d'amas stellaires.

II — Peuvent-ils se former ?

1 - Le Trou Noir comme stade final de l'évolution stellaire.

La vie d'une étoile est dominée par la lutte entre la pression de gravitation qui tend à l'écraser et la pression de radiation — issue des réactions de fusion nucléaire dans le cœur de l'étoile — qui s'y oppose. Tant que l'équilibre est maintenu, l'étoile est pour l'essentiel formée de matière « ordinaire » ; c'est-à-dire de noyaux (protons et neutrons), entourés d'un nuage d'électrons. C'est là aussi le type de matière qui nous compose et nous entoure, et il faut bien dire qu'elle est pour l'essentiel faite de vide.

L'évolution future de l'étoile dépend essentiellement de sa masse M :

Pour $M < 0.5 M_{\text{soleil}}$, l'évolution est très lente, supérieure à l'âge actuel de l'Univers (2×10^{10} ans), et aucune n'a encore atteint son stade final.

Pour $0.5 M_{\text{soleil}} < M < 1.4 M_{\text{soleil}}$, l'étoile brûle d'abord son hydrogène, comme le Soleil, pour encore cinq milliards d'années, puis son hélium en devenant une géante rouge. Son combustible nucléaire épuisé, elle s'effondre car la pression de gravitation n'est plus contenue par les réactions de fusion, et donne un objet très compact, une Naine Blanche, dont le rayon est du même ordre que celui de la Terre.

Dans une Naine Blanche, les noyaux ont perdu leur cortège d'électrons. Ils sont entassés les uns contre les autres et flottent dans une mer d'électrons. La densité atteint plusieurs tonnes par cm^3 . On connaît actuellement près d'un millier de ces objets, tous assez proches du Soleil (< quelques centaines d'années de lumière). Des milliards existent certainement dans notre seule Galaxie.

Pour $M > 1.4 M_{\text{soleil}}$, le stade Géante Rouge se termine en catastrophe : le cœur de l'étoile est si comprimé que les électrons rentrent à l'intérieur des noyaux, les transforment en neutrons. Le volume diminue alors énormément et le cœur implose. L'atmosphère de l'étoile est littéralement soufflée par le contrecoup : c'est une Supernova qui brille alors pendant un mois environ, avec la luminosité de dizaines de milliards de Soleils, avant de s'éteindre rapidement. Ce n'est pas un phénomène très rare : chaque année, quelques Supernovæ apparaissent dans des galaxies assez proches de la nôtre. Dans notre Galaxie, il y a probablement une à deux explosions par siècle, et quelques unes ont été repérées à l'œil nu, la dernière en 1604.

L'évolution de l'étoile va alors dépendre de la masse restante : si elle est $< 2.5 M_{\text{soleil}}$, on obtient une étoile à neutrons : le rayon est de l'ordre de 20 km, la densité de millions de tonnes par cm^3 , l'étoile tourne à près de 30 t/seconde sur elle-même. Cet objet, déjà passablement bizarre, est resté plus de quarante ans une pure spéculation théorique. Ils ont été finalement découverts comme source radioélectrique pulsante : sous l'influence de champs magnétiques gigantesques, des régions, à leur surface, émettent des ondes radioélectriques. Ces régions tournent avec l'étoile, donnant un signal modulé, comme un phare, qui est la signature d'une étoile à neutrons ou pulsar.

Si la masse restante est $> 2.5 M_{\text{soleil}}$, l'étoile ne peut rester au stade de l'empilement de neutrons. La pression de gravitation est trop forte pour la matière nucléaire elle-même et l'étoile s'effondre pour donner inéluctablement un Trou Noir. D'après la proportion d'étoiles massives dans notre Galaxie, ce scénario en prévoit au moins plusieurs dizaines de millions. Il serait évidemment passionnant de vérifier qu'il en est bien ainsi, mais de tels objets invisibles sont difficiles à repérer. Le seul espoir est de trouver une étoile dont la trajectoire est perturbée par un compagnon invisible. A partir des mesures de trajectoire et de vitesse, on peut alors calculer

sa masse, et si elle est supérieure à $2,5 M_{\text{Soleil}}$ il s'agira d'un Trou Noir. On imagine bien que c'est là chercher une aiguille dans une botte de foin, mais on connaît maintenant une poignée de systèmes qui paraissent convenir : le meilleur candidat, Cygnus XR 1, contient une étoile normale et un compagnon qui se manifeste non seulement par des déviations de trajectoire, mais aussi en lui arrachant de la matière qui en tombant sur le compagnon émet des rayons X. La masse du compagnon calculée est de 6 Masses solaires au moins, donc bien plus que la limite fatidique. Le Trou Noir est probablement là, mais il se cachait bien !

2 - Le Trou Noir par coalescence d'étoiles ou «A la recherche de l'Énergie perdue».

Les sondages lointains de l'Univers dans les domaines optique, radio, rayons X, rayons γ , ont montré que des sources énergétiques fantastiques étaient à l'œuvre : dans des dimensions n'excédant pas celles du Système Solaire, la production d'énergie atteint celle d'une galaxie entière, avec ses centaines de milliards d'étoiles. Beaucoup de ces émissions mystérieuses se produisent dans le centre de galaxies très actives — dites de Seyfert — Les sources les plus intenses, les quasars, sont entourées d'une luminosité faible, et l'on pense maintenant que ce sont les noyaux centraux de galaxies lointaines, en grande partie masquées par l'éclat du quasar central.

Il n'y a pas évidemment qu'une seule explication théorique de ces émissions, mais la plus invoquée — et la plus simple ! — fait appel à un Trou Noir supermassif de quelques centaines de millions de Masses solaires, qui disloquerait les étoiles normales situées autour de lui et les avalerait. Ainsi, paradoxalement, c'est des objets invisibles par définition, qui seraient à l'origine des plus puissants débits d'énergie dans l'Univers. On voit assez facilement comment ces Trous Noirs pourraient se former : la densité d'étoiles dans le centre des galaxies est très importante, un million de fois plus qu'au voisinage du Soleil, et un objet supermassif peut naître par coalescence d'étoiles. Il évoluera alors inéluctablement vers un Trou Noir géant. On voit facilement, mais il est actuellement impossible de démontrer théoriquement si cela est possible ... ou non. C'est donc l'observation seule qui peut nous dire si ces «monstres» existent ou non, et dans ce domaine la quête n'a fait que commencer.

Des essais ont été faits récemment, en particulier dans une galaxie assez proche de la nôtre et très active, M 87. La courbe de lumière montre un pic vers le centre, qui pourrait être la signature de l'aspiration des étoiles par le trou supermassif. La courbe de vitesse montre une accélération vers le centre qui peut provenir de la même cause. Mais c'est seulement par une étude très près du centre, entre $1''$ et $0,1''$ d'arc de lui, que l'on pourrait vraiment séparer l'effet d'un Trou Noir, d'un banal rassemblement d'étoiles normales. Or, les défauts de l'atmosphère terrestre empêchent d'obtenir des images très fines : un pouvoir séparateur de $1''$ d'arc est déjà très bien, $0,5''$ un exploit, et il faudra probablement attendre 1985 et le lancement du Télescope Spatial américano-européen de 2,4 m de diamètre pour une mise en évidence directe — ou une réfutation — de la présence de Trous Noirs dans le centre des galaxies actives.

III — Conclusion.

Les résultats de cette quête vers les Trous Noirs peuvent paraître bien décevants. Des dizaines de millions de Trous Noirs, de masses stellaires, existent probablement dans notre seule Galaxie, mais une recherche intensive n'en a détecté qu'une poignée, dont un à peu près sûr. Des Trous Noirs géants, par millions, sont peut-être à l'origine des émissions énergétiques titanesques dans les galaxies actives, mais la démonstration sera longue et difficile. C'est sans doute là la rançon d'un domaine de recherche à la limite de la physique moderne et de l'astrophysique.

PHENOMENES ASTRONOMIQUES ET VARIATIONS CLIMATIQUES

par Monsieur J.P. PARISOT, Astronome à l'observatoire de Besançon
Conférence du 14 mars 1981

Il y a une dizaine d'années, plusieurs rapports émanants de l'O.M.S. (Organisation Météorologique Mondiale) lançaient la première mise en garde : «Attention l'homme est en train de modifier le climat de manière irréversible». Les rapports font état de l'imminence d'une glaciation dont l'accélération serait induite par l'homme : industrialisation, urbanisme, désertification intense, rejet de polluants,... Depuis cette thèse a été largement combattue et l'O.M.M. a rappelé à plusieurs reprises qu'il fallait accepter avec beaucoup de prudence ces prévisions de catastrophes climatiques.

Premier signal d'alarme, une brume étrange qui flotte depuis une vingtaine d'années au-dessus de l'Arctique : un brouillard qui n'a rien de naturel puisqu'il est constitué de gouttelettes d'acide sulfurique dérivant lentement depuis les grands centres industriels de l'hémisphère Nord et qui viennent s'accumuler au-dessus de la banquise. Le brouillard pollué joue le rôle de la vitre d'une serre de jardinier en emprisonnant la chaleur au-dessus de la banquise. Quelques degrés supplémentaires, il n'en faudrait pas plus pour qu'en de multiples points du globe l'aventure biblique de Noé se renouvelle. Partout sur Terre, le climat fluctue non seulement d'année en année mais il change graduellement de siècle en siècle. La principale difficulté est d'appréhender objectivement ces fluctuations mais notre mémoire est fort courte et nous avons tendance à oublier les faits semblables du passé et à nous alarmer quand un hiver trop sévère ou une sécheresse prolongée s'installe.

Les fluctuations et changements à long terme sont les résultats de processus naturels qui agissent sur le système climatique très complexe : atmosphère, océan, continents, et jusqu'à présent ces processus étaient liés à des facteurs intrinsèques du système ou à des facteurs externes tels que les événements astronomiques. A l'heure actuelle, il apparaît très nettement que l'homme lui-même devient un facteur d'influence dans la balance climatologique.

Les variations de température à la surface de la Terre au cours de son histoire sont d'une grande importance pour la compréhension de l'évolution de la Terre. De nombreux faits attestent une évolution (souvent catastrophique) des climats à la surface de la Terre. Par exemple, les études géologiques et paléontologiques prouvent qu'au début du carbonifère (il y a environ 350 millions d'années) régnait sur l'Europe un climat tropical (présence d'évaporites en Belgique) qui, peu à peu, a évolué vers un climat équatorial (attesté par les grands gisements de houille de la fin du carbonifère). Depuis cette époque, le climat européen n'a cessé d'évoluer et de se dégrader pour parvenir à son stade actuel.

C'est le but de la climatologie de définir les causes principales de ces modifications et de rechercher les phénomènes susceptibles de les expliquer (l'imagination féconde des astronomes et géologues a fourni environ une soixantaine de mécanismes). Le but de cette étude est de présenter les liens (souvent qualitatifs) entre l'évolution paléoclimatique et celle des phénomènes astronomiques depuis la formation de la Terre. Chacun sera traité de manière indépendante et on essaiera d'en dégager les variations climatiques induites ainsi qu'un ordre de grandeur des échelles de temps impliquées.

FAITS ET MÉTHODES.

Déjà dans la première moitié du XXe siècle, on avait acquis la certitude de ces bouleversements climatiques et, très tôt, deux grandes écoles s'affrontent :

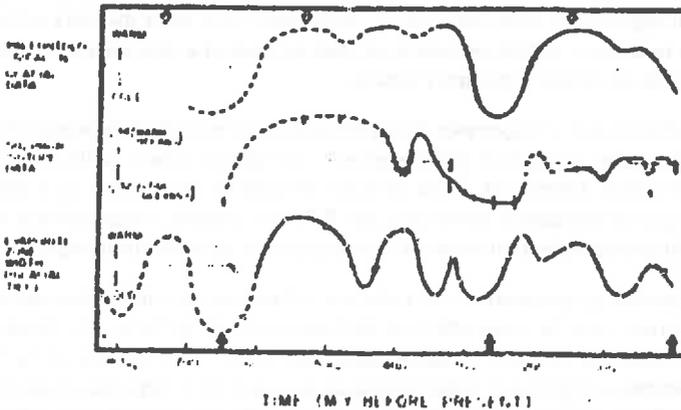
1) Les partisans de la dérive des continents pour qui l'explication est très simple : les continents sont animés de mouvements, de grande envergure en latitude et ils se trouvent alternativement dans des régions froides et dans des régions chaudes.

2) Les fixistes : les continents sont immobiles et les variations de températures observées sont simplement causées par des sursauts ou au contraire des baisses de l'activité solaire.

Avec le succès remporté par la dérive des continents dans les années 60, les partisans de cette théorie remportent la première manche. Mais, malgré tout, des études soigneuses soupçonnent les défauts de la théorie de la tectonique des plaques dans l'interprétation de certaines paléotempératures.

On peut rapporter de nombreuses anomalies comme par exemple la présence de magnolias en Alaska à une époque où elle se trouvait à une latitude de 70° N ! Ceci suggère que des facteurs autres que la dérive des continents affectent sérieusement les paramètres climatiques.

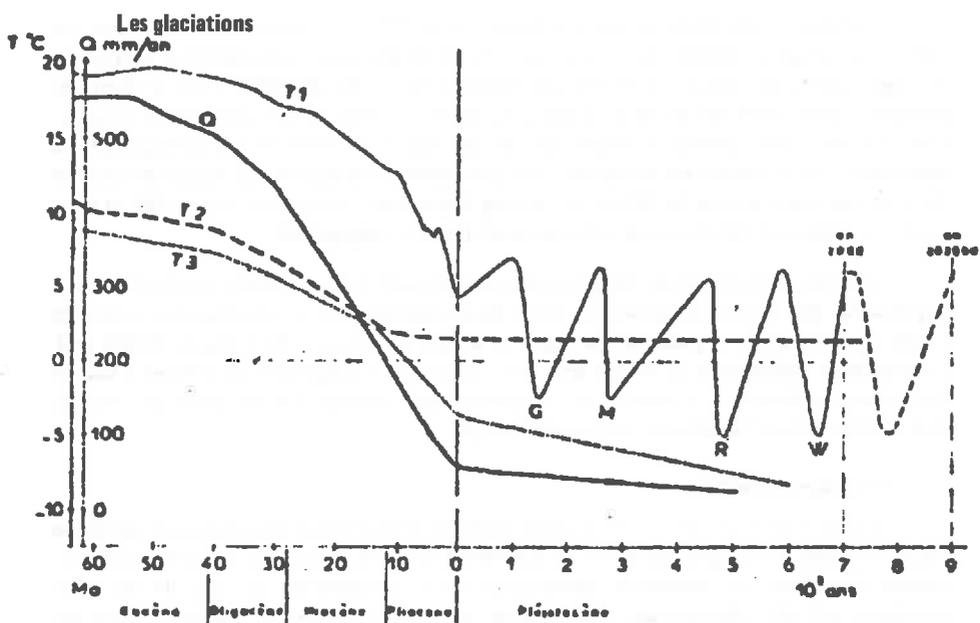
Les âges glaciaires.



La figure n° 1 donne une idée des tendances générales du climat depuis l'Antécambrien. Les trois courbes rapportent des mesures de paléotempératures basées sur des méthodes différentes et indépendantes.

De cette figure se dégage l'idée d'une alternance « presque périodique » de périodes chaudes (vers -150 et -500 millions d'années) et de périodes froides (comme celle que nous connaissons depuis le début du quaternaire).

Ces fluctuations climatiques à long terme se succèdent avec une échelle de temps de l'ordre de 100 millions d'années et s'accompagnent de variations de température de l'ordre de 20° . Ce sont les périodes froides qui ont reçu le nom d'*âge glaciaire* : on en a dénombré trois avec certitude depuis l'ère primaire et cinq non datées dans le Précambrien (durant cette période, les indices utilisables sont pratiquement inexistant).



Température et précipitation entre 60 Ma et - 7.10⁵ à l'échelle des Ma et depuis cette époque (0) à l'échelle de 10⁵ ans d'après P.M. BORISOV.

- T₁ : Température moyenne annuelle en Europe occidentale
- T₂ : Température des eaux abyssales équatoriales dans le Pacifique
- T₃ : Température du mois le plus froid dans les déserts de l'Asie Centrale
- Q : Précipitations dans le désert du Kyzylkum
- G : Gunz ; M ; Mindel ; R ; Riss ; W ; Würm.

Comme on peut le constater sur la figure n° 2, le climat européen n'a cessé de se dégrader depuis le début du Quaternaire. Cet âge glaciaire dans lequel nous vivons actuellement se présente comme une suite pseudo-périodique de phases chaudes et de phases froides. La période est d'environ 200 000 ans et les variations de température induites sont de l'ordre de 10 °.

L'alternance de périodes chaudes et froides durant le quaternaire a été mise en évidence, au début du siècle, par BRUCKNER et PENCK (1905). L'étude des moraines alpines dans les vallées des affluents du Danube leur a permis de montrer des avances et des reculs considérables du glacier alpin. Ils ont ainsi proposé le découpage du quaternaire (appelé chronologie alpine) en quatre glaciations portant le nom des affluents du Danube où ces optimums climatiques ont été soupçonnés (Gunz, Mindel, Riss et Würm).

Cette évolution « en dents de scie » des climats récents a été non seulement précisée sur le continent européen par l'utilisation de « thermomètres géologiques » nouveaux, mais elle a été mise en évidence sur d'autres continents (Amérique du Nord, Afrique).

Une analyse plus fine permet de découper chaque glaciation en stades et interstades glaciaires (durée ~ 50 000 ans). Par exemple, le mammoth a vécu en « France » durant la glaciation du Würm et sa disparition a coïncidé avec le retour d'un climat plus chaud à la fin du Würm IV (quatrième stade du Würm qui s'est terminé il y a environ 10 000 ans).

L'optimum s'est produit durant la glaciation du Riss, il y a environ 200 000 ans. Les Alpes disparaissaient complètement sous une calotte de glace qui recouvrait tout le Nord de l'Europe, calotte qui pouvait atteindre une épaisseur de l'ordre de 2 000 m. On a l'habitude d'estimer l'importance des étendues d'eau sous forme de glace par son «équivalent en eau» : c'est la hauteur dont varierait le niveau mondial des mers si on faisait fondre cette glace en la répartissant uniformément sur toutes les mers. Les estimations actuelles de la calotte rissienne donnent une valeur proche de 150 m, équivalente à la calotte polaire antarctique (100 m) et au glacier du Groenland (50 m) réunis (la banquise arctique est négligeable).

Il est bien évident que ces variations s'accompagnaient d'une profonde modification de la physionomie des continents actuels : la fonte des glaces provoque la remontée des continents allégés par cette perte de poids (la Norvège s'est élevée de presque 100 m depuis 10 000 ans). L'abaissement considérable du niveau des mers a provoqué la disparition de nombreux bras de mer comme la Manche. La création de ces ponts a rendu possible l'implantation de l'homme dans des îles comme l'Australie et la Grande-Bretagne.

Petits âges glaciaires.

Depuis environ 2 000 ans, on a mis en évidence d'incontestables alternances d'épisodes chauds et froids (*petits âges glaciaires*). Actuellement on se situe dans une phase descendante : avancée des glaces du Groenland, décroissance de la température de l'eau de mer. Des minimums ont été observés vers l'an 1000 et vers 1850. Le dernier maximum date des années 40 et depuis les températures moyennes diminuent d'environ 0,5°/an. La série d'hivers doux observés depuis 1970 en Europe constitue une anomalie locale et ne reflète pas un renversement de la tendance générale.

Dans le même ordre d'idées, les variations actuelles des glaciers alpins paraissent inexplicables : de 1880 à 1892, le glacier du Rhône fit une crue effroyable, avançant de plusieurs mètres par an. La décrue fut tout aussi rapide. On a l'impression de se trouver devant un équilibre instable qu'un rien suffit à détruire, de telle sorte qu'on ne puisse pas déduire grand chose des faits actuels, simples accidents dans l'évolution générale.

Tableau 1 : Les grandes phases climatiques

Phase climatique	Echelle de temps (ans)	Variations de températures induites (° C)
Age glaciaire	200 x 10 ²	20 °
Glaciation	200 000	10 °
Stade glaciaire	50 000	5 °
Petit âge glaciaire	100	1 °

Si la variabilité des climats est bien établie à la surface de la Terre, on a la certitude que des phénomènes analogues se sont produits sur les autres planètes. Les photographies prises par l'engin Mariner 9 de la surface de Mars ont montré l'existence de vallées fluviales asséchées.

L'eau a certainement coulé à la surface de Mars à une époque indéterminée. A l'heure actuelle on aurait de grosses difficultés à y trouver de l'eau sous forme liquide car en plein été il règne une température de l'ordre de - 20° C sous les tropiques.

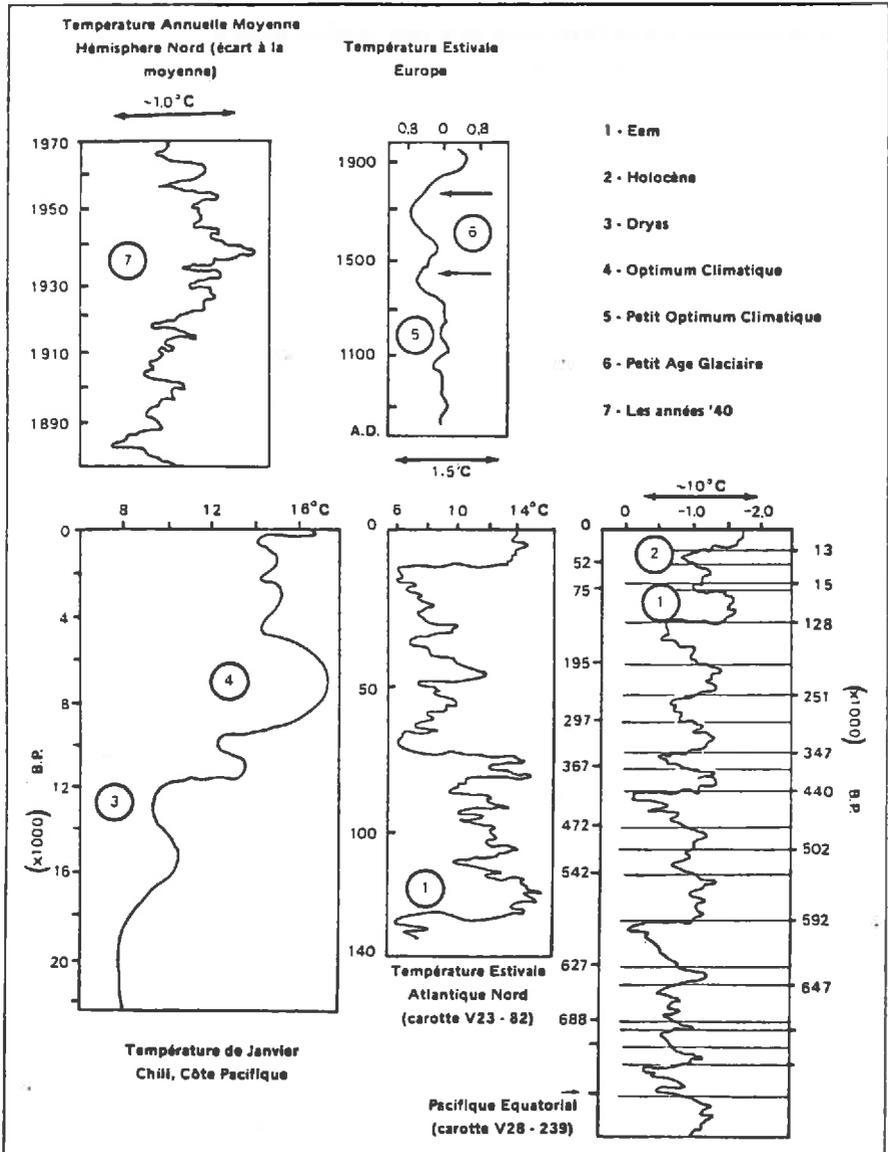


Fig. 3 : Changements climatiques au Quaternaire

Il semble donc que des phénomènes de grande envergure agissent sur les paramètres climatiques et produisent à la surface des planètes des bouleversements importants.

à suivre ...

Vous trouverez la suite de cet article dans notre prochain numéro.

Société Astronomique de Lyon
69230 — Saint-Genis-Laval

S O M M A I R E

- 1 — La formation des étoiles
par Madame Lunel, le 29 mars 1980
- 5 — Observerons-nous jamais l'explosion
primordiale de l'Univers ?
Par Monsieur Andrillat, le 16 mai 1981
- 8 — Les trous noirs
Par Monsieur Monnet, le 24 janvier 1981
- 11 — Phénomènes astronomiques et
variations climatiques
Par Monsieur Parisot, le 14 mars 1981

PRIX : 10 F