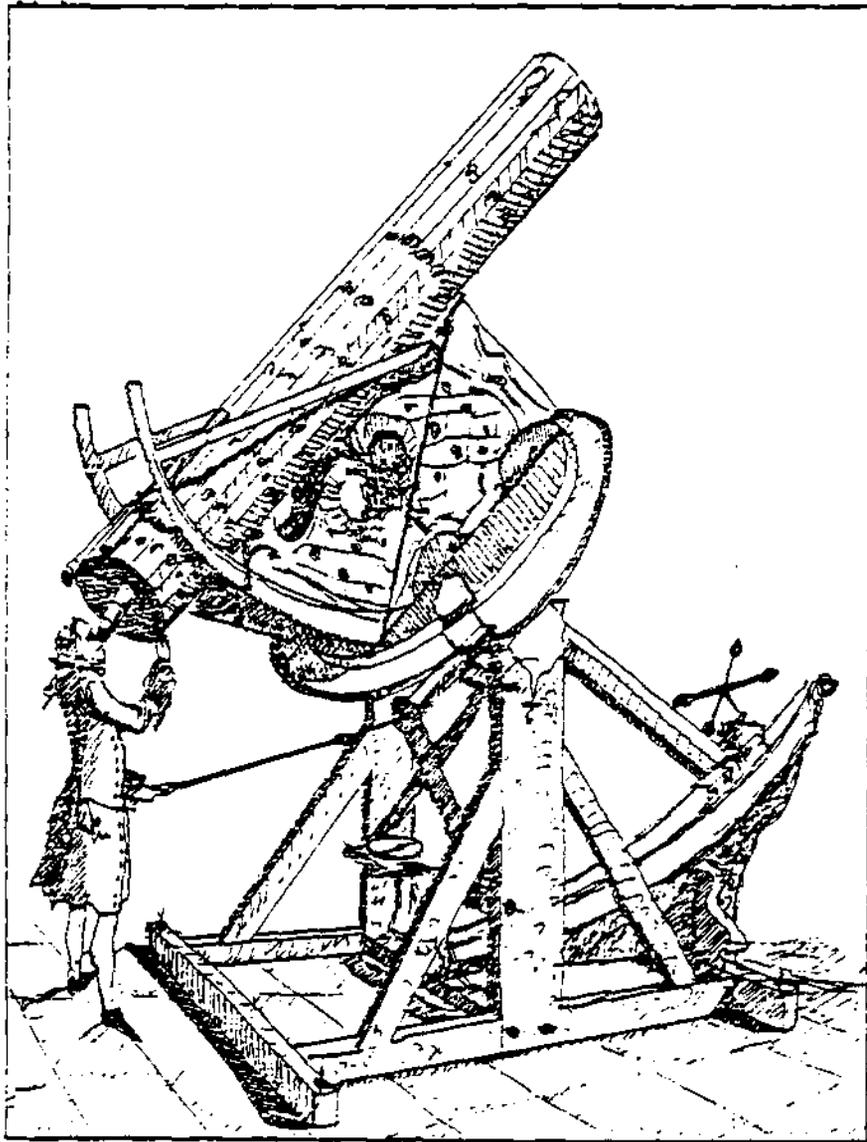


# les cahiers clairaut

bulletin du comité de liaison astronomes et enseignants



n°5 - été 1979

Sommaire

	Page
Editorial.....	2
L'orbite de Mars.....	3
Carnet rose.....	6
Quand Vénus est-elle la plus brillante ? .....	6
Sur la formation des étoiles.....	7
Bon et sage Chiron.....	15
Courrier des lecteurs.....	16
L'effet Doppler-Fizeau est-il un effet relativiste ?.....	18
Lectures pour la Marquise.....	23
L'Astronomie dans les programmes.....	26
Documents audio-visuels en Astronomie.....	27
Quand Vénus est-elle la plus brillante ? réponse.....	28

\*\*\*\*\*

EDITORIAL

Les demandes de réabonnement nous parviennent nombreuses. Comme nous l'avons expliqué dans le numéro précédent, nous n'avons pas les moyens matériels d'écrire à chacun de vous. Nous vous remercions donc à l'avance de bien vouloir nous écrire spontanément soit pour vous réabonner, soit pour préciser que vous ne souhaitez pas le faire. Dans le premier cas, nous vous rappelons qu'il est beaucoup plus commode pour nous de recevoir simultanément le bulletin de réabonnement ci-dessous et votre règlement.

Un lecteur nous a fait remarquer qu'il déplorait de devoir abîmer son exemplaire en découpant le bulletin...Il a raison, mais nos finances assez serrées (augmentation du prix du tirage et affranchissement passé de 0,35f à 0,45f) nous ont conduits cette fois encore à ne pas laisser de place blanche !

DEMANDE D'ABONNEMENT OU DE REABONNEMENT ( 4 numéros par an)

Mr, Mme, Melle : .....

Adresse personnelle: ..... Adresse de l'Etablissement : .....

.....

.....

souhaite :

- s'abonner et recevoir les Cahiers Clairaut à partir du n° :
- renouveler son abonnement aux Cahiers Clairaut
- ci-joint ma contribution financière (15 Frs pour 4 numéros; chèque à libeller à l'ordre de L.Gouguenheim, CCP 209 3680V Paris)

remplir, cocher les cases correspondantes et renvoyer cette fiche avec le règlement à Mme F. Delmas, I.A.P., 98bis Boulevard Arago, 75014 PARIS).

CORRESPONDANCE ENTRE L'ORBITE DE MARS PAR RAPPORT AU SOLEIL  
ET LA TRAJECTOIRE OBSERVEE SUR UNE CARTE CELESTE .

Les observations répétées de la position de Mars par rapport aux étoiles permettent de tracer la trajectoire apparente de Mars sur une carte de la bande zodiacale . Cette trajectoire représente le mouvement de Mars par rapport à la Terre , vu en perspective sur un fond d'étoiles fixes .

Copernic a interprété ce mouvement par rapport au Soleil . Pour comprendre la complexité de la correspondance entre ces deux aspects , supposons le problème résolu , et faisons quelques approximations .

Supposons :

- le Soleil fixe par rapport aux étoiles .
- que Mars et la Terre orbitent dans le plan de l'écliptique ( l'orbite de Mars n'étant inclinée que de  $1^{\circ} 51'$  sur l'écliptique ), suivant des trajectoires circulaires ( les ellipses sont peu aplaties ) , concentriques, centrées sur le Soleil .

- que les rayons des orbites sont tels que  $R_M = 1,5 R_T$   
( valeurs réelles :  $R_M = 230 \cdot 10^6$  km ;  $R_T = 150 \cdot 10^6$  km d'où  $\frac{R_M}{R_T} \simeq 1,5$  )

- que les périodes de révolution sidérale ( durée d'un tour de la planète autour du Soleil , par rapport aux étoiles ) sont telles que  $T_M = 2 T_T$  (valeurs réelles :  $T_M = 687$  j ;  $T_T = 365,3$  j ;  $\frac{687}{365,3} = 1,9$  )

Tracés :

- Traçons dans le plan de l'écliptique un repère orthonormé XSY , centré sur le Soleil , fixe par rapport aux étoiles ( fig 1 )
- Dans ce repère , numérotions les positions occupées simultanément par Mars et la Terre .
- Sur une feuille de papier calque traçons le repère orthonormé X'TY' . Centrons ce repère sur chacune des positions occupées par la Terre en maintenant X'TY' // XSY . La direction de ce repère reste fixe par rapport aux étoiles .

A chaque fois , notons la position du Soleil dans X'TY' et celle de Mars ( fig 2 ) .

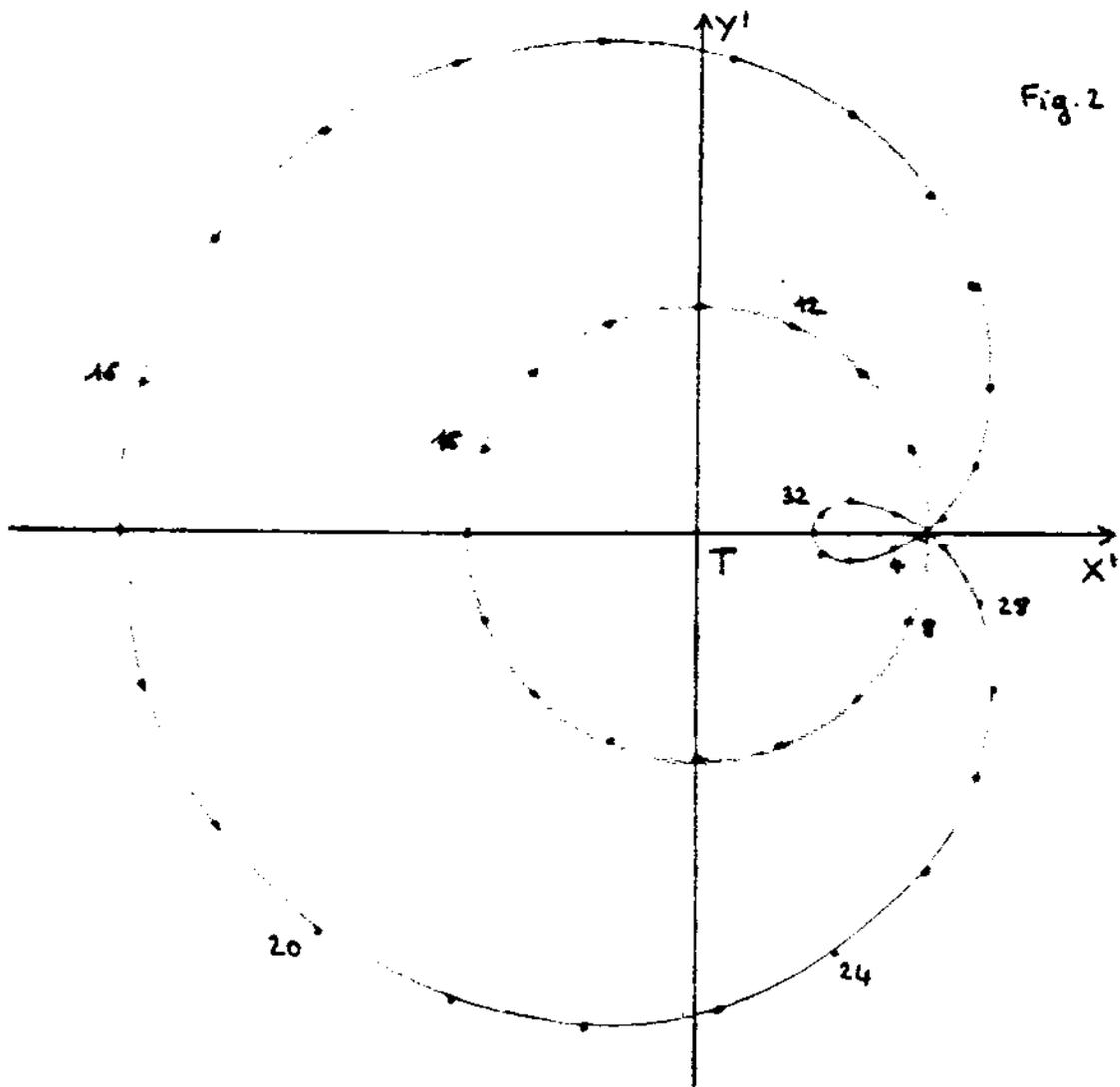
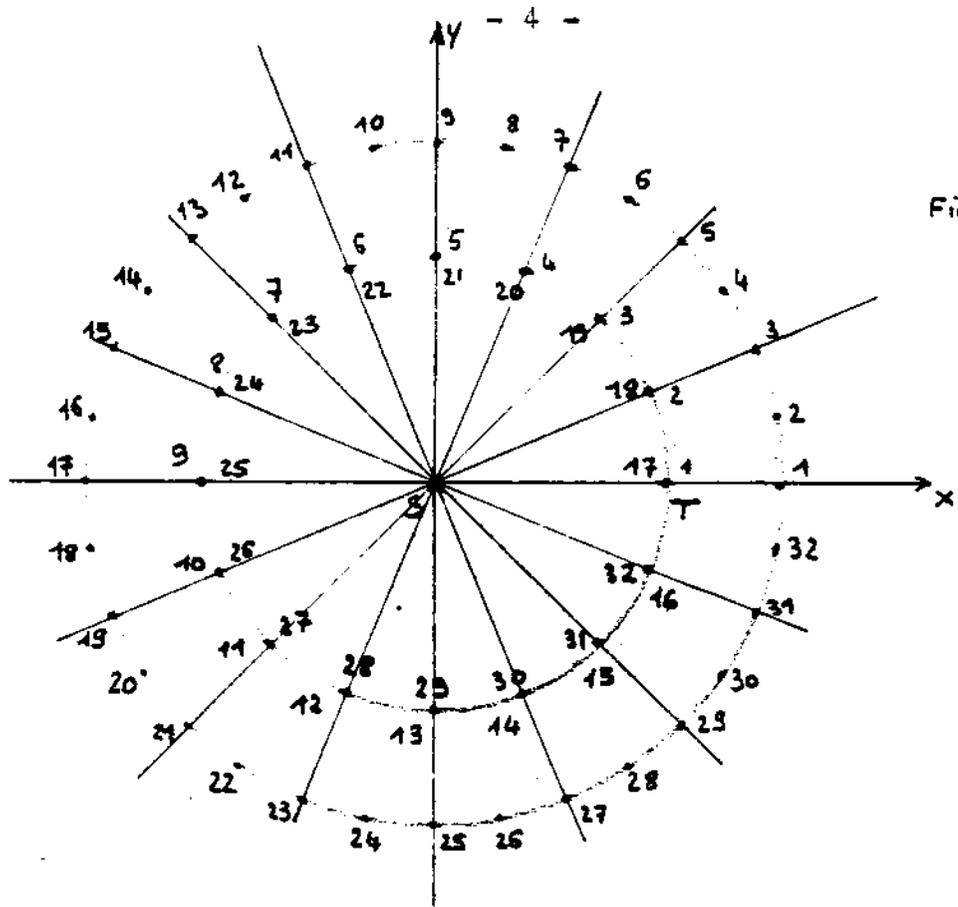
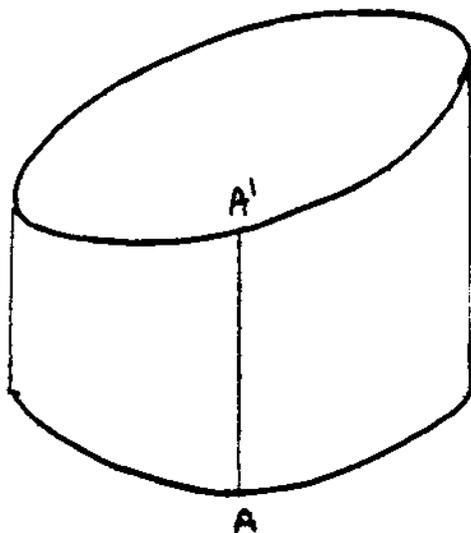
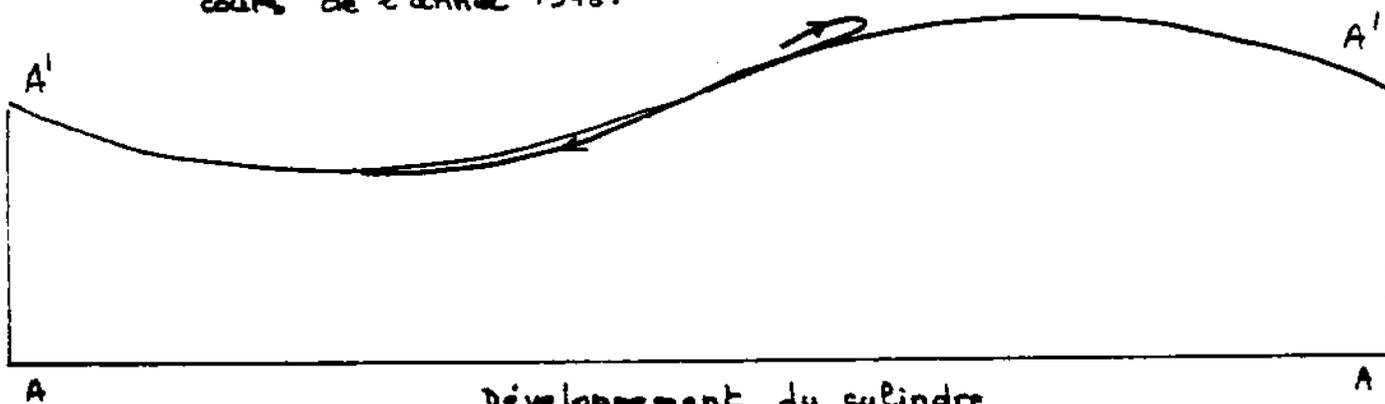


Fig. 3



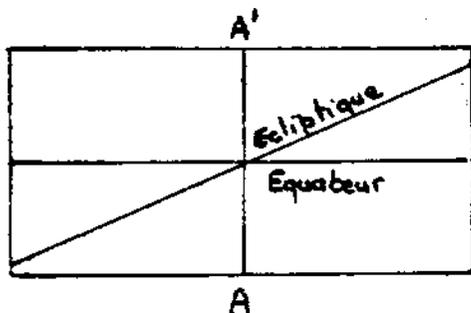
cylindre sectionné  
- perpendiculairement aux  
génératrices en A.  
- obliquement par rapport  
aux génératrices en A'.

Trajectoire de Mars sur une carte de la bande zodiacale au  
cours de l'année 1978.



Développement du cylindre

Sphère céleste



cylindre, tangent à  
l'équateur, qu'on  
développe suivant AA'



Sur la formation des étoiles

Des collègues parisiens, membres de l'Union des Physiciens ou de l'Association des Professeurs de Mathématiques, avaient convenu, durant l'école d'été de Champtercier, d'organiser une réunion commune de leurs Régionales au bénéfice de l'astronomie. La réunion s'est tenue le 21 février 1979, de 14h à 17 h 30 au lycée Louis-le-Grand, grâce à l'obligeance de M.Prouvost, Président de la Régionale UdP. M.Pierre Léna, professeur d'astrophysique à l'Université Paris VII avait accepté avec beaucoup de bonne grâce de nous faire une conférence sur un sujet d'actualité dont il s'occupe particulièrement. Nous le remercions vivement d'avoir pris sur son temps pour informer les professeurs qui ont suivi son passionnant exposé. Nous le remercions aussi d'avoir relu et corrigé le texte de cette rédaction qui lui a été soumis avant d'enrichir le sommaire de ce Cahier Clairaut.

Je me permets d'ajouter à cette présentation un souvenir personnel. Le 30 juin 1954, nous nous trouvions, tous deux Pierre Léna, sur la pelouse de Meudon pour observer une éclipse partielle de Soleil, lui avec ses camarades élèves du lycée Janson, moi avec mes élèves du club d'astronomie du lycée Voltaire. Depuis, Léna est devenu astronome "pour de vrai" et, entre autres travaux, il a observé la plus longue éclipse de Soleil de toute l'histoire... depuis un "Concorde" survolant l'Afrique...

°°°

1. Le cadre

=====  
Dans le scénario que nous nous proposons de décrire et que nous intitule "la formation des étoiles", interviendront :

- des acteurs, forces, matériaux, rayonnement ;
- un facteur essentiel, le temps ;
- des lois physiques et par conséquent un certain nombre de constantes.

1.1. La force de gravitation dont l'importance est illustrée par la photographie d'un amas globulaire, ensemble d'étoiles sans matériaux interstellaires, considérées comme des points matériels et réunies en amas par interaction gravitationnelle.

Expression de cette force pour deux masses M et m à la distance R  $F = G \frac{Mm}{R^2}$  avec  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{Nm}^2 \text{kg}^{-2}$

L'énergie potentielle associée est  $U = - G \frac{Mm}{R}$   
prise nulle lorsque les deux masses sont infiniment éloignées.

1.2. La pression gazeuse, formulée ici par la loi des gaz parfaits  $P = \frac{\rho R T}{\mu}$  où  $R = 8,3 \times 10^7$  ergs par degré et mole,  $T$  la température,  $\rho$  la densité et  $\mu$  le poids moléculaire moyen (ici 1 ou 2 puisque le gaz est de l'hydrogène atomique ou moléculaire). La densité des milieux est si faible que la loi des gaz parfaits s'applique.

1.3. La pression de radiation, donnée par les deux formules

$$P_{\text{rad}} = \frac{h\nu}{c} \cdot n = \frac{L}{c} \cdot \frac{1}{S}$$

où  $n$  est le flux de photons d'énergie  $h\nu$  à travers l'unité de surface par unité de temps,  $c$  la vitesse de la lumière,  $L$  la luminosité de l'étoile - c'est à dire la puissance totale émise -,  $S$  la surface de la sphère entourant l'étoile et sur laquelle cette pression de radiation est calculée.

La photographie de la double queue d'une comète met en évidence l'action de la pression de radiation sur les particules de poussière (partie de la queue directement opposée à la direction du Soleil) et de l'action du ventsolaire sur les atomes ou molécule de gaz (partie légèrement incurvée).

1.4. Les forces de cohésion des solides, forces de Van des Waals d'origine électro-magnétiques, sont de courte portée et n'agissent qu'au contact. Elles n'interviendront donc que lorsque les particules de matière interstellaire seront très proches les unes des autres.

1.5. Le champ magnétique est un acteur capricieux et complexe comme le montre une photographie de la couronne solaire où il intervient beaucoup. Faute de bien connaître son rôle dans le processus qui conduit à la formation d'une étoile, nous ne faisons que le mentionner.

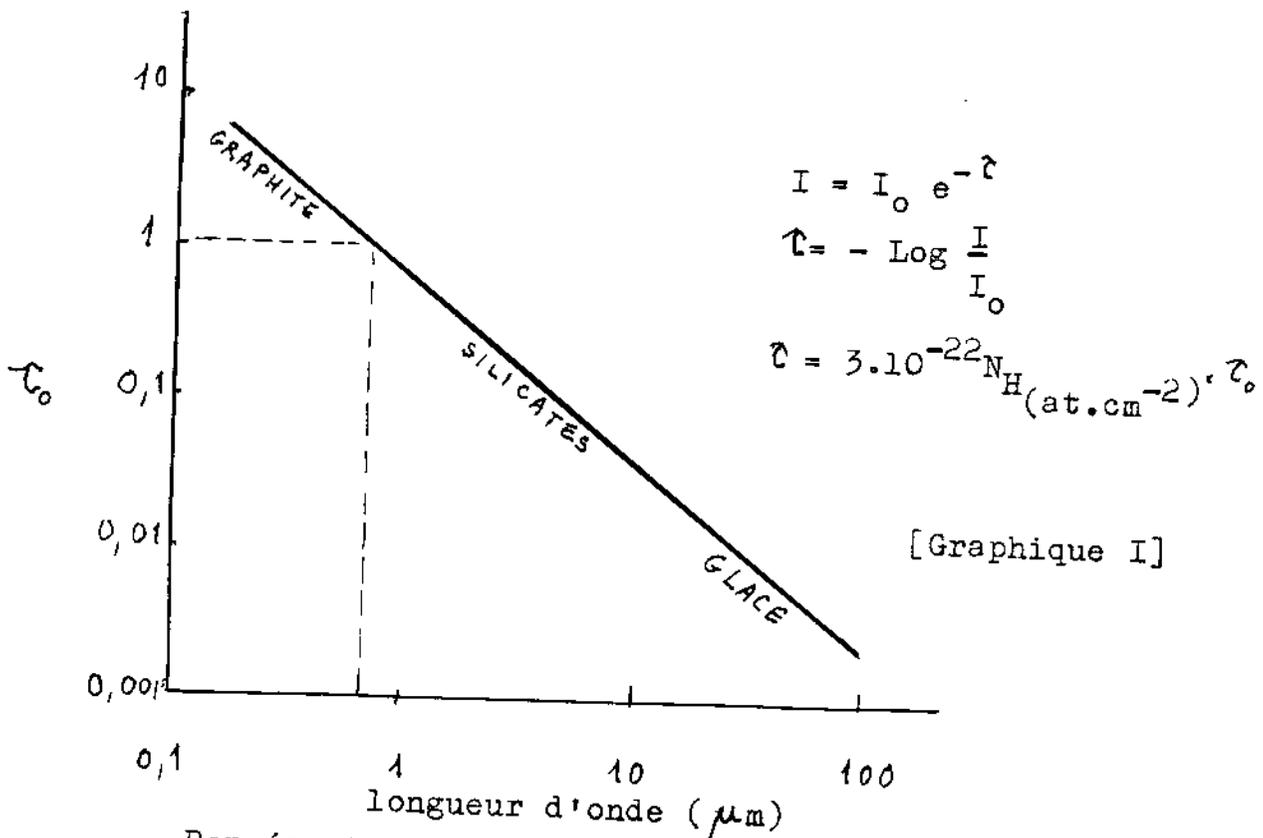
1.6. Le gaz, c'est à dire tout ce qui n'est pas étoile dans une galaxie, est constitué presque uniquement d'hydrogène sous forme atomique ou moléculaire ; mais il existe aussi des poussières associées à ce gaz : grains de très petite taille ( $\leq 0,1 \mu\text{m}$ ); il n'en jouent pas moins un rôle important, non par leur masse (au plus 1% de la masse totale du gaz) mais par leur capacité d'absorber ou de réémettre le rayonnement.

1.7. Le rayonnement comporte des photons de toutes les longueurs d'onde, dont l'énergie va de 1 Gev à  $10^{-7}$  ev soit un domaine de  $10^{16}$  ev dont nous ne percevons, par la fenêtre de transparence de l'atmosphère à la lumière visible, qu'une fraction infime (un peu comme si, dans une symphonie de Mozart, nous n'entendions qu'une ou deux notes !). La radioastronomie a étendu nos moyens d'exploration ; avec les observatoires en satellite s'ouvre vraiment l'exploration de l'Univers. (Rappel : un photon d'énergie 1 ev correspond à une longueur d'onde  $\lambda \approx 1,234 \mu\text{m}$  facile à mémoriser).

1.8. Le temps est un facteur essentiel dans notre scénario. A l'échelle galactique, les mouvements sont peu perceptibles et les phénomènes évolutifs peuvent passer inaperçus. Pourtant, comme l'image de la forêt le fait comprendre, l'évolution est observable : dans la forêt, nous voyons de jeunes arbres, des arbres qui donnent des graines, des arbres abattus qui pourrissent et retournent à l'humus. A partir de cette vision instantanée, l'existence d'une évolution peut se concevoir. De même, dans les bras d'une galaxie, nous voyons des nuages de matière dense, des protoétoiles, des étoiles géantes...Autrement dit, dans les bras d'une galaxie, nous pouvons observer différents témoins ou stades de l'évolution des étoiles et par conséquent de leur formation.

1.9. Absorption des photons par un gaz : elle dépend de "l'épaisseur optique",  $\tau$  elle-même reliée à la densité de la colonne : nombre d'atomes de gaz dans une colonne de  $1 \text{ cm}^2$  de section (sachant que pour l'hydrogène,  $3 \cdot 10^{21}$  atomes par  $\text{cm}^2 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ g.cm}^{-2}$ ). La variation de l'intensité du rayonnement  $I$  est donnée par  $I = I_0 e^{-\tau}$ , la variation de  $\tau$  en fonction de la longueur d'onde étant figurée par le graphique suivant. A température donnée, le rayonnement émis par cette même colonne de gaz est d'autant plus important que  $\tau$  augmente. Il atteint la valeur du rayonnement du corps noir, indépendante de  $\tau$  ; lorsque  $\tau \gg 1$ .

voir graphique<sup>1</sup> page suivante



Représentation approximative de la profondeur optique  $\tau_0$  due à une colonne de gaz augmentée de poussières contenant  $3 \cdot 10^{21}$  atomes d'hydrogène par  $\text{cm}^2$  de section, en fonction de la longueur d'onde. On en déduit  $\tau$  pour toute autre valeur de  $N_H$ .

1.10. Quelques constantes

Constante de Boltzmann  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Joules par Kelvin

Le Soleil : Rayon  $R_{\odot} = 7 \cdot 10^8$  m

Masse  $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30}$  kg

Luminosité  $L_{\odot} = 4 \cdot 10^{26}$  w

Masse de l'atome d'hydrogène  $m_H = 1,7 \cdot 10^{-27}$  kg

Distances : unité astronomique = 1 ua =  $1,5 \cdot 10^{11}$  m

parsec = 1 pc =  $2 \cdot 10^5$  ua =  $3 \cdot 10^{16}$  m

Durée : 1 an =  $3 \cdot 10^7$  s

2. Le nuage initial

==== Nous partons de l'observation : des nuages existent dans les bras des galaxies. Ils sont formés essentiellement d'hydrogène (H et  $H_2$ ) et de grains de poussière représentant moins de 1% de la masse totale ; ces poussières sont formées de graphite, de silicates (fer, magnésium, aluminium, ...).

2.1. Ces nuages sont stables. Newton, en 1695, pensait qu'un tel nuage devait s'écraser sur lui-même par gravitation. Ceci est vrai si la température du nuage est nulle. Si ce n'est pas le cas, l'énergie thermique peut équilibrer le potentiel de gravitation  $\frac{3}{2} kT = G \frac{Mm_H}{R}$ , mettant ainsi une valeur critique de R.

Si la température du nuage est  $T = 10$  K et la masse  $M = 1 M_{\odot}$ , on définit ainsi un "rayon de Jeans"  
 $R_J = 10^{15}$  m = 0,03 pc.

Si le rayon du nuage est supérieur à  $R_J$ , il y a une sorte "d'équilibre hydrostatique" et la contraction ne va pas se produire.

2.2. Dans le nuage en équilibre radiatif :

- tous les photons ultra-violetts dus par exemple aux étoiles voisines présentes dans l'entourage du nuage, y pénètrent et y sont absorbés ; le nuage est opaque pour le rayonnement qu'il reçoit : ceci est dû à la très grande valeur de  $\tau$  dans l'ultra-violet (voir graphique 1).
- tous les photons infra-rouges que le nuage émet en sortent ; le nuage est transparent pour son propre rayonnement : ceci est dû à la très faible valeur de  $\tau$  dans l'infra-rouge.

L'opacité du nuage est pratiquement inversement proportionnelle à la longueur d'onde. Ce sont les poussières dans le gaz qui sont responsables de l'absorption. Pour une masse de l'ordre de celle du Soleil, la luminosité est de l'ordre de celle du Soleil lorsque le rayon a la valeur  $R_J$

ci-dessus :  $L_J = 4\pi R_J^2 \sigma T^4 \tau \simeq 2L_{\odot}$

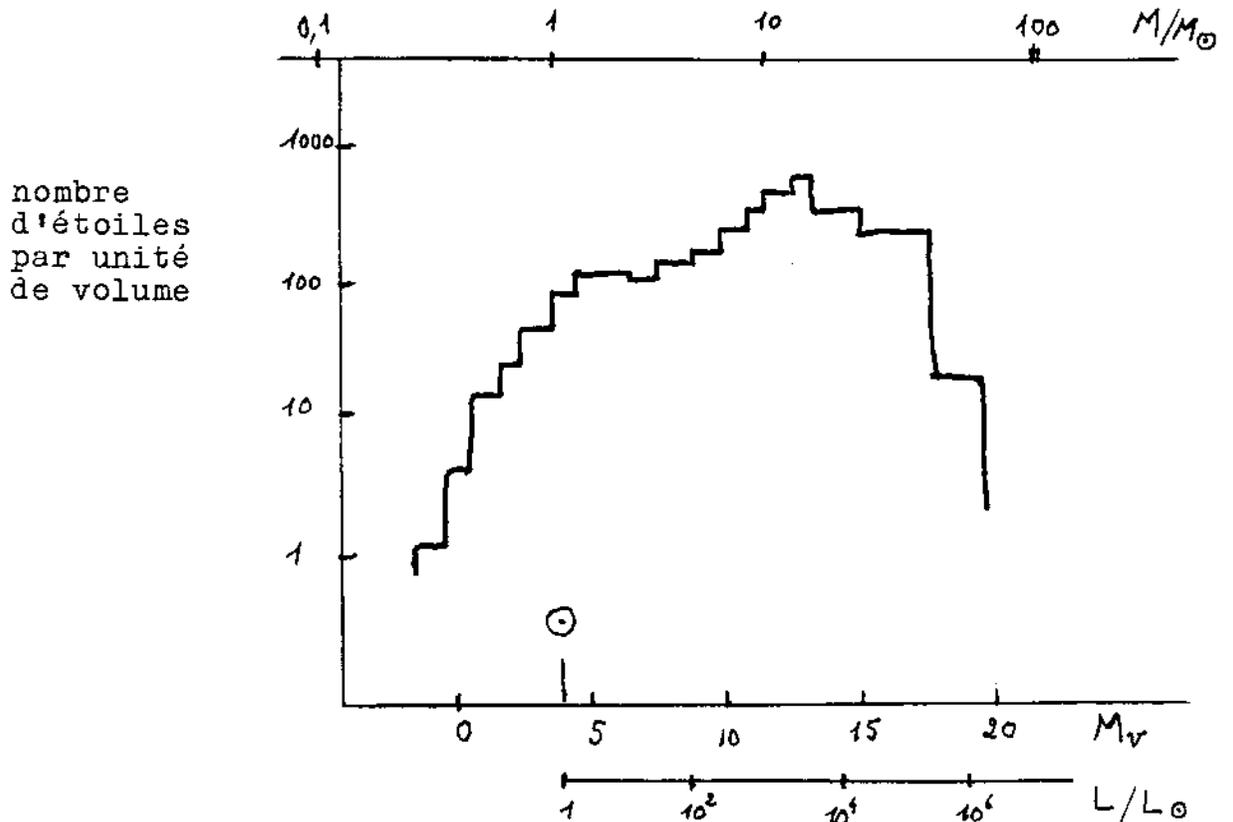
et toute l'énergie est rayonnée dans l'infra-rouge lointain ( $\tau \simeq 10^{-3} N_H$ ).

2.3. La contraction se produit : chute libre des grains de matière à la vitesse  $v$  telle que  $\frac{1}{2} m v^2 = G \frac{Mm}{r}$  ; donc  $v$  varie comme  $r^{-1/2}$ . La densité, fonction de  $r$ , est telle que  $r^2 \rho(r) v(r) = \text{Cte}$  (qui exprime la conservation du flux de matière) donc  $\rho$  varie comme  $r^{-3/2}$  : il se forme un noyau compact de densité élevée au centre du nuage. Le temps de chute libre donne une idée de la durée de cette phase  
 $T_{\text{chute}} = \int \frac{r^{1/2}}{v_i} dr = \frac{R_J}{v_i}$  de l'ordre de  $10^6$  ans.

Le nuage s'est donc fragmenté en morceaux de taille  $R_J$  probablement sous l'effet du champ magnétique ; mais on sait mal comment cela se passe exactement. On constate la fragmentation et la constitution d'étoiles dont certaines ont une masse inférieure à celle du Soleil, la plupart des masses de l'ordre de 1 à 10  $M_\odot$  et il ne paraît pas exister des étoiles de masse supérieure à 100  $M_\odot$ . En utilisant les étoiles proches du Soleil, on obtient la fonction de luminosité :

$$\frac{L}{L_\odot} = \left( \frac{M}{M_\odot} \right)^{3,3}$$

qui décrit comment évolue la luminosité d'une étoile en fonction de sa masse (cf graphique II).



[graphique II] : répartition des étoiles par luminosité (L) ou par masse (M) au voisinage du Soleil (l'échelle  $M_v$  est celle des magnitudes absolues).

### 3. La rotation

===== En se contractant, le nuage conserve son moment angulaire initial donc sa vitesse angulaire de rotation devrait beaucoup augmenter puisque la masse se rapproche de

de l'axe de rotation. Ce n'est pas ce que l'on observe ; il y a donc là une question ouverte ; est-ce un effet magnétique ?

En théorie, la sphère en rotation tend à se déformer pour donner un disque aplati ; en effet, la chute libre vers le plan équatorial se fait sans transfert de moment angulaire, donc plus facilement que la chute libre vers l'axe de rotation. On retrouve ainsi la répartition des planètes autour du Soleil dans le plan de l'écliptique.

#### 4. L'accrétion

===== Avec l'augmentation de la densité, des collisions apparaissent entre les atomes du gaz et transforment l'énergie gravitationnelle de contraction en chaleur. On définit un temps de Kelvin-Helmholtz  $t_{KH} = \frac{GM^2}{R} \times \frac{1}{L}$

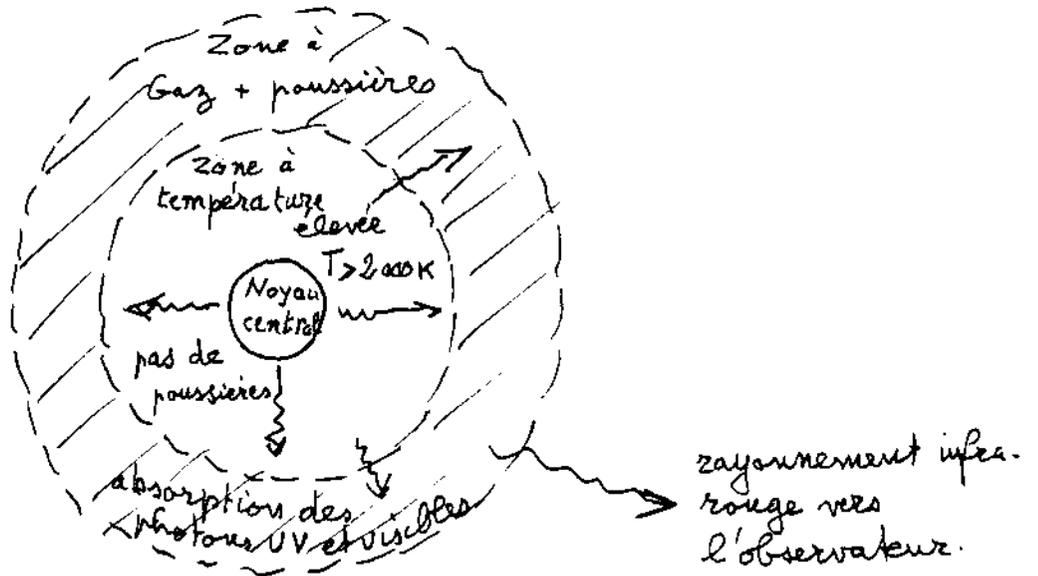
qui, avec  $R = R_J$  et  $L = L_{\odot}$  donne  $t_{KH} = 60$  ans : c'est le temps nécessaire pour rayonner avec la luminosité  $L$  l'énergie libérée d'origine gravitationnelle.

Comme cette valeur de  $t_{KH}$  est petite devant le temps de chute, l'objet en condensation rayonne continuellement son énergie gravitationnelle et ne s'échauffe pas. Ce n'est que lorsque la densité devient suffisamment élevée que les régions centrales de cette sphère en contraction deviennent opaques à leur propre rayonnement. Il n'y a plus d'échange de chaleur rapide avec l'extérieur, et, d'isotherme, la contraction devient adiabatique. Dans les parties du coeur, l'agitation thermique est suffisante pour ioniser les atomes d'hydrogène ( $T > 10^4$  K), et ultérieurement, au centre, pour "allumer" l'étoile en atteignant la température de la fusion thermonucléaire. Autour du coeur, subsiste une gangue absorbante qui rayonne dans l'infra-rouge. Une douzaine de tels objets - ou "cocons infrarouges" - sont aujourd'hui connus ou suspectés.

#### 5. Le cocon infrarouge

===== (voir graphique III)

Le noyau central, à température élevée, émet un rayonnement ultraviolet qui ne peut s'échapper. L'élévation de température correspondante entraîne la sublimation des grains de poussière dans la région centrale. En frontière



[graphique III] : un modèle schématisique du cocon dans sa phase finale.

de cette zone, la recombinaison de l'hydrogène bloque les rayonnements ultraviolets et visibles qu'absorbent également les poussières : ce cocon qui contient au centre la zone dense ne peut rayonner qu'une émission infrarouge, dont la longueur d'onde décroît au fur et à mesure que s'élève la température du cocon.

Quand la température de la zone dense atteint  $10^6 K$ , les réactions thermo-nucléaires se déclenchent, l'étoile est formée et rayonne. Un nouvel équilibre hydrostatique et radiatif s'établit et le processus d'accrétion est alors terminé. Néanmoins les photons issus de l'étoile sont encore absorbés par le cocon et rerayonnés dans l'infrarouge. Ce n'est que très lentement que ce cocon va disparaître, comme "soufflé" par l'étoile, et que celle-ci pourra émettre librement son rayonnement dans l'espace. Cette phase "cocon" est vraisemblablement observée aujourd'hui sur une douzaine d'objets proches du Soleil.

## 6. Et ensuite ?

=====  
Ce qui se passe dans le résidu gazeux autour de l'étoile est encore très mal calculé - et en tout cas

n'est pas observé. Des matériaux s'accumulent dans les zones de fragmentation opaques au rayonnement de l'étoile. Ils s'y refroidissent progressivement, et les phases les moins volatiles se condensent. Dans ce processus de fractionnement chimique, les corps solides peuvent prendre une composition analogue à celle du noyau et du manteau de la Terre. La voie est ouverte pour la formation du cortège planétaire de l'étoile.

Pierre LENA (rédaction G.W.)

Références bibliographiques :

"The origin and evolution of the solar system" par A.G.W.CAMERON, Scientific American, 233, 32.

"Nuages et cocons d'étoiles" par Pierre LENA dans La Recherche n°300, p.565 (mai 1979).

-----

Bon et sage Chiron

Le nom de Chiron a été donné à un objet découvert dans le système solaire en 1977 par Charles Kowal, astronome au Mont Palomar. Les calculs effectués peu après suggéraient que cet astéroïde avait une période d'environ 50 ans, ce qui plaçait son orbite entre celles de Saturne et de Uranus. Première étrangeté.

De nouveaux calculs montrent que cette orbite ne serait pas stable. Jupiter ou Saturne peuvent la rendre hyperbolique lorsque l'astéroïde se rapprochera trop de l'une ou l'autre de ces deux grosses planètes. Il y aurait 7 chances sur 8 pour que Jupiter soit responsable de ce changement qui entraînerait le départ définitif de Chiron. Cela peut arriver dans quelques millions d'années, mais il est bon d'en être prévenu.

On sait que Chiron était, chez les Grecs, le nom d'un des Centaures, fils de Cronos ; au contraire de ses frères, il était bon et sage : assez bon (l'astéroïde) pour visiter un moment notre système, assez sage pour le quitter...

[d'après New Scientist du 19790329, p.1032]

COURRIER DES LECTEURS

Dans cette rubrique, nous faisons écho à toute question posée par un lecteur. Ou bien nous tâchons d'y répondre nous-mêmes, ou bien nous sollicitons l'aide d'autres lecteurs. Ecrire au responsable de la rubrique, Gilbert Walusinski, 26 Bérengère, 92210 Saint-Cloud.

1. Monsieur J-M.Poncelet (67140 Barr) nous écrit : "Mme Legrand, professeur de math et moi-même avons la joie d'animer le groupe d'Astronomie de l'IREM de Strasbourg auquel participent trente stagiaires (quelques physiciens, la majorité sont des enseignants de mathématiques). Un fascicule est en préparation résumant le travail de l'année [la note que M.Poncelet joint à sa lettre en donne un bon exemple ; faute de place nous remettons au prochain cahier pour la publier]. Vous connaissez les difficultés de survie des IREM ; nous resterons animateurs en 79-80 mais notre travail sera différent : conférences débats dans divers établissements de l'académie après projections de films et de diapositives."
2. Monsieur B.Carbonneaux (voir sa lettre dans le Cahier n°4) nous écrit : "Oui, l'astronomie est l'école de la rigueur, de l'honnêteté et fournit une approche des mathématiques, mais c'est aussi une approche du beau.. Vous avez le souci, dans les Cahiers, les passages humoristiques en témoignent, de ne pas vous limiter aux aspects austères ou rigoureux de la science. Pour développer la curiosité astronomique des jeunes de 7 à 11 ans, il ne faut pas négliger l'aspect esthétique de l'observation du ciel."
3. NDLR - Nous nous contentons de reproduire des fragments de lettres sans y répondre quand, c'est le cas pour les précédentes, nous ne pouvons qu'approuver ou remercier. Ce qui est encore le cas pour la lettre suivante de Catherine Vignon qui avait participé activement à l'école de Digne ... et au brochage du volumineux compte rendu. Elle nous raconte ce qu'elle a fait dans sa Première C du Lycée Honoré de Balzac à Paris (17ème) : "A propos de l'optique, j'ai timidement introduit quelques remarques d'astronomie ; la propagation rectiligne m'a conduit à parler de la mesure du rayon de la Terre, des éclipses ; la vitesse de la lumière explique que ce qu'on reçoit de très loin soit un témoignage de phénomènes très antérieurs à la date présente ; la disper-

sion de la lumière explique l'importance des spectres dans la connaissance de la structure des **astres** ainsi que de leurs mouvements. C'est assez magique : l'auditoire devient silencieux et très attentif dès qu'on aborde ces questions; ensuite les questions pleuvent. Les élèves ont très bien admis que je ne sache pas répondre à tout tout de suite (en fait, grâce au "pavé" de l'école d'été, on parvient à trouver beaucoup de réponses)... Enfin, le 7 juin, il y avait le début de l'exposition Einstein à Beaubourg et un débat sur "Cosmologie, Relativité, Einstein". Deux élèves y sont allés, j'y suis allée moi-même ; les élèves n'ont pas été déçus, les explications étaient claires et accessibles.

Résultat : le dernier jour de classe, j'ai trouvé une belle plante en cadeau sur mon bureau. En huit années d'enseignement, c'est la première fois que ça m'arrive, ... et c'est grâce à l'astronomie."

4. De William Mountebank, prof de math à Stratford-on-Avon, cette question : "J'étais en vacances, en France, dans un charmant village au sud de Brive (la Gaillarde comme vous dites en français). Je me suis aperçu, en lisant la carte de l'IGN que j'étais exactement sur le parallèle  $45^\circ$ . Pouvais-je en déduire que j'étais juste à égale distance entre le pôle Nord terrestre et l'équateur ?"

Certes non. Comme vous le savez, Clairaut et Maupertuis, en 1737, ont montré, grâce à la mesure de la longueur d'un arc de méridien de  $1^\circ$  en Laponie que la Terre est aplatie au pôle comme votre grand Newton l'avait prévu (selon ses calculs, le renflement équatorial correspond au phénomène de la précession des équinoxes). Au sud de Brive, vous étiez donc sûrement plus près de l'équateur que du pôle. En rentrant dans votre brumeuse Angleterre (illuminée, il est vrai, par le génie de Stratford), vous avez du constater que les degrés de latitude étaient de plus en plus **loggs**. Pour un calcul plus précis, vous pouvez calculer des longueurs d'arcs sur une ellipse, l'aplatissement étant  $1/297$ .

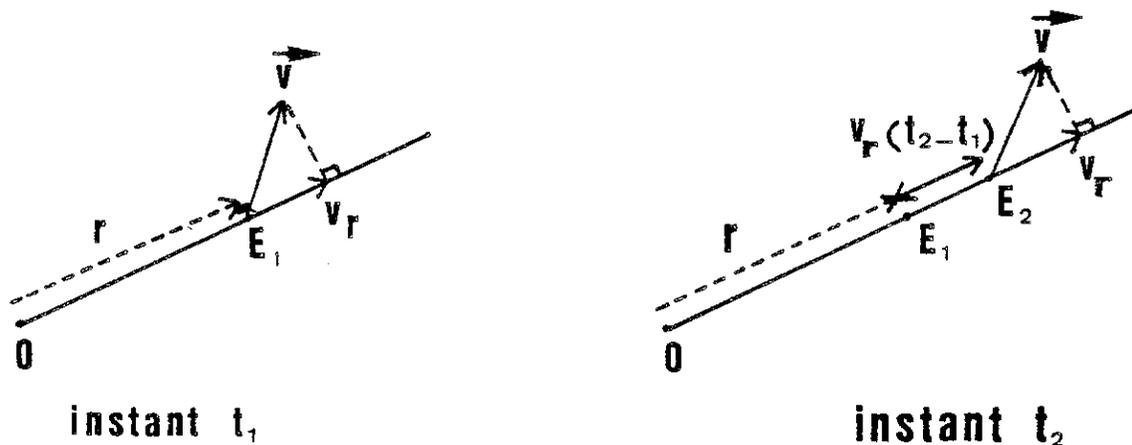
L'EFFET DOPPLER-FIZEAU EST-IL UN EFFET RELATIVISTE ?

Certains lecteurs ayant manifesté leur perplexité à propos de l'origine relativiste de l'effet Doppler-Fizeau invoquée dans un article du numéro 4 des Cahiers Clairaut sur le bleu du ciel (p.19), nous donnons ci-après la démonstration de la "formule Doppler-Fizeau". Cette démonstration montre en particulier que l'effet Doppler-Fizeau se manifeste simplement en mécanique classique.

L'effet Doppler-Fizeau affecte la durée qui sépare deux événements telle que la perçoit un observateur animé d'un mouvement relatif par rapport au système dans lequel se produisent ces événements. Il est provoqué par la valeur finie de la vitesse à laquelle se transmet à l'observateur l'information de chacun de ces deux événements. Le cas particulier le plus intéressant du point de vue pratique est le changement de fréquence subi par un processus périodique. Cet effet a été établi en 1842 par Doppler pour les ondes sonores et Fizeau proposa en 1848 d'utiliser le décalage des raies observées dans les spectres des étoiles pour en déduire les vitesses de ces étoiles relatives à l'observateur.

Expression de l'effet Doppler-Fizeau dans le cas non relativiste.

Un émetteur E, animé d'une vitesse  $\vec{V}$  dans un système lié à un observateur O, envoie des signaux se propageant à la vitesse c. Nous appellerons  $V_r$  la composante de la vitesse  $\vec{V}$  dans la direction OE. Nous considérons deux signaux particuliers émis respectivement à l'instant  $t_1$  où la distance entre l'émetteur et l'observateur est  $OE_1 = r$  et à l'instant  $t_2$  où la distance  $OE_2$  est égale à r plus la distance parcourue par E à la vitesse  $V_r$  pendant l'intervalle de temps



$$t_2 - t_1 \text{ soit: } OE_2 = r + V_r(t_2 - t_1)$$

Le premier signal parvient à l'observateur O à l'instant  $t'_1$  égal à l'instant d'émission  $t_1$  plus la durée mise par le signal pour atteindre l'observateur, c'est-à-dire pour parcourir  $OE_1 = r$ , en se propageant à la vitesse  $c$ , soit:

$$t'_1 = t_1 + r/c$$

Le second signal parvient à l'observateur O à l'instant  $t'_2$  égal à  $t_2$  plus la durée mise par le signal pour atteindre l'observateur, c'est-à-dire pour parcourir la distance  $OE_2 = r + V_r(t_2 - t_1)$  à la vitesse  $c$  (où  $V_r$  est comptée positivement dans le sens d'un éloignement)

soit:

$$t'_2 = t_2 + [r + V_r(t_2 - t_1)] / c$$

La durée  $t'_2 - t'_1$  qui sépare les instants d'arrivée des deux signaux est donc égale à:

$$t'_2 - t'_1 = t_2 - t_1 + (V_r/c)(t_2 - t_1) = (1 + V_r/c)(t_2 - t_1)$$

Dans le cas particulier où la durée  $t_2 - t_1$  est la période  $T$  d'une onde électromagnétique émise par E,  $c$  est la vitesse de propagation de cette onde, c'est-à-dire la vitesse de la lumière, et on peut en déduire que l'observateur perçoit cette onde avec une période  $T'$  différente de  $T$ :  $T' = T(1 + V_r/c)$

En termes de longueur d'onde,  $\lambda = cT$ , l'observateur perçoit un rayonnement de longueur d'onde  $\lambda' = \lambda(1 + V_r/c)$ , soit décalé de la quantité  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$  telle que

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = V_r/c$$

Si une source de lumière animée d'une vitesse  $V_r$  par rapport à l'observateur émet un rayonnement de longueur d'onde  $\lambda$ , ce rayonnement est perçu par l'observateur à la longueur d'onde  $\lambda'$  différente de  $\lambda$  telle que  $\frac{\lambda' - \lambda}{\lambda} = V_r/c$

Cet effet est lié à l'observateur, et non à la source; que la source soit au repos ou en mouvement, elle émet toujours la même longueur d'onde. Mais l'observateur perçoit une longueur d'onde différente, qui dépend du mouvement relatif.

Dans le cas où  $V_r > 0$ , c'est-à-dire où la source s'éloigne de l'observateur, le décalage  $\Delta\lambda$  est positif, c'est-à-dire que la lumière est perçue à une longueur d'onde supérieure <sup>à celle</sup> à laquelle elle est émise: pour un rayonnement de longueur d'onde visible, cela corres-

pond à un décalage vers la partie rouge du spectre. Au contraire, si la source s'approche de l'observateur  $\Delta\lambda$  est négatif, c'est-à-dire que la lumière est perçue à une longueur d'onde plus courte que celle à laquelle elle est émise: cela correspond pour un rayonnement de longueur d'onde visible à un décalage vers la partie bleue du spectre.

Par analogie avec le cas du domaine des longueurs d'onde visibles, domaine limité du côté des faibles valeurs par les longueurs d'onde bleues et du côté des grandes valeurs par les longueurs d'onde rouges, on utilise improprement dans les autres domaines de longueur d'onde le terme de "décalage vers le rouge" (ou, en anglais "redshift") pour désigner un décalage vers les grandes longueurs d'onde, c'est-à-dire un décalage spectral provoqué par un éloignement de l'émetteur par rapport à l'observateur. On utilise de même le terme de "décalage spectral vers le bleu" pour désigner un décalage spectral vers les faibles longueurs d'onde, c'est-à-dire un mouvement d'approche de l'émetteur vers l'observateur.

Par exemple, dans le domaine des ondes radioélectriques dont les longueurs d'onde vont de l'ordre de quelques mm à 30 m, il est inexact de parler de "décalage spectral vers le rouge" pour qualifier une augmentation de la longueur d'onde, puisque les longueurs d'onde correspondant à la couleur rouge sont de l'ordre de 0,7 à 0,8  $\mu\text{m}$  et donc beaucoup plus courtes que celles des ondes radio.

#### Expression de l'effet Doppler-Fizeau dans le cas relativiste.

Si la vitesse  $\vec{V}$  dont est animé l'émetteur par rapport à l'observateur n'est pas négligeable devant la vitesse  $c$  de la lumière, le raisonnement effectué dans le paragraphe précédent tombe en défaut parce que la notion de durée a besoin d'être précisée. L'arrivée de chacun des deux signaux à l'observateur constituent deux événements séparés par une durée qui peut être évaluée soit dans le système de l'émetteur soit dans le système de l'observateur. Comme ces deux événements sont coïncidents dans le système de l'observateur, la durée qui les sépare est une durée propre dans le système de l'observateur; par contre cette durée est une durée impropre dans le système de l'émetteur. Ces deux durées sont reliées l'une à l'autre par la relation fondamentale de la relativité restreinte:

$$\frac{\text{durée propre}}{\text{durée impropre}} = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

La durée  $t'_2 - t'_1 = (1 + v_r/c) (t_2 - t_1)$  que nous avons évaluée précédemment est celle qui sépare les instants d'arrivée des deux signaux dans le système de références de l'émetteur. La durée propre correspondante (ou durée mesurée dans le système de l'observateur) est donc égale à  $(1 + v_r/c) (t_2 - t_1) / \sqrt{1 - v^2/c^2}$

Il en résulte que la période  $T'$  de l'onde électromagnétique perçue par l'observateur est:

$$T' = T (1 + v_r/c) / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

et que ce rayonnement est perçue à la longueur d'onde  $\lambda'$  telle que:

$$\lambda' / \lambda = (1 + v_r/c) / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Dans le cas non relativiste où  $v \ll c$  on peut remplacer  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$  par les premiers termes de son développement en série en fonction de la variable  $v/c$  qui est petite devant l'unité:

$$\sqrt{1 - v^2/c^2} = 1 - v^2/2c^2 + \dots$$

En se limitant aux termes du premier ordre en  $v/c$  on retrouve bien l'expression:  $\lambda' / \lambda = 1 + v_r/c$ , établie précédemment.

#### Caractéristiques de l'effet Doppler-Fizeau.

Ce raisonnement nous a permis de comprendre que l'effet Doppler Fizeau se manifeste de façon appréciable même si la vitesse relative de la source par rapport à l'observateur est suffisamment faible devant celle de la lumière pour que les effets relativistes puissent être négligés. Dans le cas contraire, la formulation approchée

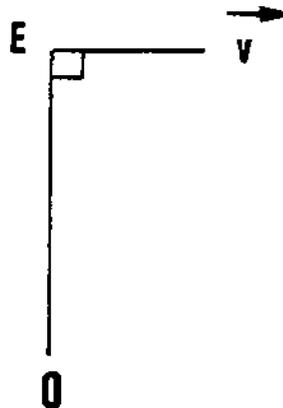
$\frac{\lambda' - \lambda}{\lambda} = v_r/c$  doit être remplacée par la formulation rigoureuse:

$$\lambda' / \lambda = (1 + v_r/c) / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Dans le cas où la composante  $v_t$  de la vitesse  $v$  perpendiculaire à la ligne de visée  $OE$  est négligeable devant la vitesse  $c$  de la lumière (alors que  $v_r$  ne l'est pas) la relation prend la forme:

$$\lambda' / \lambda \simeq (1 + v_r/c) / \sqrt{1 - v_t^2/c^2} = \sqrt{\frac{1 + v_r/c}{1 - v_t^2/c^2}}$$

Dans le cas où  $v_t$  n'est pas négligeable devant  $c$ , il existe un effet Doppler-Fizeau transverse: si une source  $E$  qui est animée par rapport à l'observateur  $O$  d'une vitesse  $\vec{v}$  non négligeable devant  $c$ , perpendiculaire à  $OE$ , émet un rayonnement de longueur d'onde  $\lambda$ , l'observateur  $O$  perçoit ce rayonnement à la longueur d'onde  $\lambda'$  telle



que  $\lambda' / \lambda = 1 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$

Cet effet n'est perceptible que dans le cas relativiste.

On peut donc souligner en particulier que :

- 1- L'effet Doppler-Fizeau qui résulte d'une vitesse radiale se manifeste en mécanique classique et n'est pas un effet de nature relativiste.
- 2- L'effet Doppler-Fizeau transverse, qui résulte d'une vitesse tangentielle est un effet de nature purement relativiste.

Applications astronomiques de l'effet Doppler-Fizeau.

Parce que les astres sont animés de vitesses les uns par rapport aux autres, l'effet Doppler-Fizeau joue un rôle considérable en astronomie. Comme la plupart des astres sont situés à des distances considérables de nous, il n'est généralement pas possible de mettre en évidence leurs déplacements apparents et de déterminer la composante tangentielle de leur vitesse: la seule composante accessible est alors la composante radiale grâce à l'effet Doppler-Fizeau qu'elle provoque dans leur spectre.

Nous reviendrons dans des numéros ultérieurs sur des exemples de mouvements mis en évidence par l'effet Doppler-Fizeau. Le lecteur pourra se reporter au chapitre sur "Les mouvements dans l'Univers" écrit par L. Bottinelli et M. Gerbaldi dans le compte-rendu de l'Ecole d'Eté de Digne.

L. Gouguenheim

Lectures pour la Marquise

Vous savez que les relations de Clairaut et de la Marquise du Châtelet furent très intimes. Clairaut put ainsi conseiller la Marquise de très près dans sa traduction des Principes mathématiques de la philosophie naturelle de Newton. Aussi avons nous eu l'idée de dédier au souvenir de la savante marquise ces éléments de bibliographie utiles (nous le souhaitons) aux enseignants et aux astronomes, c'est à dire à ceux qui aujourd'hui poursuivent à leur façon l'oeuvre de l'amie d'Alexis... ° °

Trois livres

===== sur lesquels nous reviendrons sûrement, mais il faut sans tarder les recommander à l'attention de nos lecteurs :

Guide-Explo de l'Astronomie par Philippe de La Cotardière, 190 p, cartonné ; édition Hachette. Ouvrage destiné à tous les amateurs débutants. Des conseils précis et précieux pour observer utilement. L'auteur, qui est Secrétaire Général de la Société Astronomique de France nous fait profiter de son expérience. Le livre donne la liste de tous les objets qu'il faut observer pour commencer. Mieux vaut ne pas chercher tout de suite à découvrir un nouveau quasar avec des jumelles.

Introduction à la théorie de l'observation en astrophysique par Henri Rebol, assistant à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 160 p ; éd Masson. L'ouvrage est destiné aux étudiants de faculté. Il traite de la collecte des informations, leur analyse, leur enregistrement, leur traitement. Il intéressera donc au plus haut point tous ceux qui veulent comprendre les méthodes de l'astrophysique, alors qu'il n'existe pas de livre de ce niveau en France.

Au delà de notre Voie Lactée, un étrange Univers par Jean Heidmann, astronome titulaire à l'Observatoire de Paris, 208 p, éd Hachette. On sait que l'auteur a publié en 1973 une "introduction à la cosmologie" (édition PUF, collection le physicien) destiné aux étudiants de l'enseignement supérieur. Ici, au contraire, l'auteur prend le parti d'une langue usuelle et d'images simples pour exposer les grands principes de la Relativité et les conceptions cosmologiques qui en résultent, sans calculs. De la très bonne vulgarisation.

Les documents astronomiques des BT

===== BT = bibliothèque du travail  
éditée par la Coopérative de l'Enseignement Laïque (pédagogie  
Freinet) . Toutes ces brochures ont été réalisées dans des  
classes élémentaires et sont abondamment illustrées. Citons  
en particulier : n°312 Histoire de l'astronomie ; n°667  
la Lune ; n°740 le Soleil, la structure de la matière ;  
n°757 le calendrier ; n°763 l'observatoire de Nice ; n°775  
Copernic ; n° 821 le système solaire et la vie.

Ces ouvrages sont donc particulièrement recommandés  
pour les élèves de 8 à 11 ans.

° °

Dans les revues

=====

Espace et Civilisation est une nouvelle revue mensuelle (le  
premier numéro a paru en octobre 78). Chaque numéro a plus de  
64 pages, format 21/29 cm, prix 10 F ; abonnement à 12 numéros  
100 F. La revue est dirigée par MM Ducrocq (astronautique),  
de La Cotardière (Astronomie) et Trachier (clubs). Dans chaque  
numéro des éphémérides, des témoignages d'astronomes amateurs  
et des grands articles. Par exemple : les comètes par Ch. Bertaud,  
plongée profonde dans le cosmos par J. Heidmann, des réflexions de  
J-C. Pecker, la constante de Hubble et l'expansion par Lucienne  
Gouguenheim, un dossier sur Jupiter, etc. En bref, une revue  
vivante qui s'adresse à un grand public.

Bulletin de l'Union des Physiciens. Le numéro 614 (mai 79)  
est consacré à l'astronomie. Des articles de J-P. Zahn, de  
L. Bottinelli et M. Gerbaldi repris du dossier de l'école d'été  
de Lanslebourg. Des articles nouveaux : "l'astronomie gamma"  
galactique par Jacques Paul, "les pulsars" par Lucienne  
Gouguenheim.

La Recherche, dans le n°100 (mai 79) des articles sur le bilan  
des années 70 : "le ciel sous toutes les longueurs d'onde" par  
James Lequeux, "Mars, Vénus et les autres" par Hubert Reeves ;  
"Nuages et cocons d'étoiles" par Pierre Léna (voir son article)  
"J'ai vu des Volcans sur Io" par J-L. Bertaux.

Dans le n°101 (juin 79), "les radio-sources extragalactiques"

par Malcom S.Longair.

Pour la Science. N°19 (mai 79) , "les objets Apollo" par G.Wetherill. N°20 (juin 79)"l'évolution des galaxies à disque" par S. et K.Strom. N° 21 (juillet 79)"le monoxyde de carbone dans la Voie Lactée" par M.Gordon et W.Burton

New Scientist. N° 1159 du 14 june 1979 "Galactic evolution" by Bernard Pagel.

Le Monde du 19790613 : "Même si l'astronomie n'est pas cotée en Bourse" par Evry Schatzman, président du Comité national français d'astronomie.[Protestation contre l'insuffisance des crédits qui limite le nombre des Astronomes Français au Congrès international de Montréal en août 1979, une grande partie des frais de voyage et de séjour restant à la charge des participants.]

°°°

En relisant Flammarion

=====  
"Un jour, une dame très passionnée pour le ciel était venue demander à un astronome de lui montrer quelques-unes de ces curiosités célestes ; c'était par une douce soirée de printemps, et l'astronome était rêveur. Comme il ne trouvait pas tout à coup l'étoile désirée, il s'arrêta soudain dans la manoeuvre de son télescope, et il se mit à crayonner, au clair de lune, quelques lignes sur le mur de la terrasse. Enfin il se remit au télescope et trouva l'étoile. Pendant ce temps-là, la dame curieuse avait lu, au lieu d'un calcul astronomique, le quatrain suivant :

Près de vous, Madame, oubliant les cieux,  
L'astronome étonné se trouble ;  
C'est dans l'éclat caressant de vos yeux  
Qu'il avait cru trouver l'étoile double."

Dans Les étoiles, par Camille Flammarion, p.41.

Flammarion ajoute que la scène se passait sous

Louis XV, mais nous ne sommes pas forcés de le croire.

°°°

K.Mizar

L'ASTRONOMIE DANS LES PROGRAMMES DE SCIENCES EXPERIMENTALES  
ET DE SCIENCES PHYSIQUES

Le programme de Sciences Expérimentales de la classe de 4ème entrera en vigueur en Octobre 79. Il comporte une part importante d'Astronomie dans la partie "Optique" (voir Cahiers Clairaut n°1)

La partie "mécanique" du programme de la classe de 3ème, qui entrera en vigueur en Octobre 80 fait référence à la "gravitation Universelle", ainsi qu'au "poids d'un objet sur la Terre ou sur la Lune".

Le nouveau programme de Sciences Physiques de la classe de 1ère AB, qui rentre en vigueur en Octobre 79, est à choisir parmi un certain nombre de thèmes incluant en particulier:

- n°5- Energie stellaire. Evolution d'une étoile: Origine de l'énergie d'une étoile; naissance, vie et fin d'une étoile. Energie solaire.
- n°8- Radiodiffusion, télévision, radar: (...) radars et radiotélescopes
- n°9- Spectroscopie; analyse spectrale: dispersion de la lumière, spectres; applications à l'astrophysique. Couleurs des corps.
- n°10- Des ondes hertziennes aux rayons X et  $\gamma$  : propagation des ondes électromagnétiques; fréquence, longueur d'onde. Lumière visible, infra-rouge, ultra-violet. Rayons X et leurs applications; rayons  $\gamma$  et leurs applications. Les radiosources de l'Univers.

En 1ère C,D ou E, le paragraphe concernant la dispersion de la lumière "spectres et applications" devrait conduire tout naturellement aux applications astrophysiques !

Enfin, le nouveau programme de Sciences Physiques des Terminales C et E fait référence à "l'interaction gravitationnelle".

Références.

B.O. n° spécial 4 bis du 11-1-79

B.O. n° 8 du 22-2-79

Bulletin de l'Union des Physiciens n° 613 (Avril 79)

Dossiers "Astrophysique I: la Gravitation" et "Astrophysique II: connaissance des astres par leur rayonnement" du C.N.D.P. (voir p. 27)

DOCUMENTS AUDIOVISUELS EN ASTRONOMIE

Le Centre National de Documentation Pédagogique (CNDP) édite dans la collection "Diathèque" (série Sciences Physiques) deux dossiers d'Astronomie:

- "Astrophysique 1: la Gravitation" (ref. 72404) traite de la loi de la gravitation dans l'Univers (problèmes à 2 ou n corps, effet de marée, vitesse d'évasion, techniques d'observation astronomique...)
- "Astrophysique 2: connaissance des astres par leur rayonnement" (en cours d'édition) montre comment on peut étudier les astres à partir de la lumière qu'ils émettent ou qu'ils reflètent.

Chacun de ces dossiers comporte 24 vues (reproduites à partir de documents originaux) et un livret de commentaires détaillés, incluant la description individuelle de chaque diapositive.

Le CNDP propose également dans la série "Films courts super-8mm" "Les éclipses de Soleil" (ref. 11679); la durée du film est de 5mn, il est muet, en couleurs et accompagné d'une notice détaillée.

L'ensemble des productions du CNDP est en vente dans les CRDP et les CCDP "dépôts-vente". Pour la région parisienne: librairie du CNDP (sevpen) 13 rue du Four 75006 Paris tel. 634 54 80. Les tarifs actuels applicables aux établissements et organismes publics sont: Films courts: 95f ; séries Diathèque: de 36 à 42f.

La Société Astronomique de France vient de publier 6 planches de diapositives chacune à partir de documents originaux. Les planches ont les titres suivants: "Nébuleuses et galaxies", "Planètes 1", "Planètes 2", "Lune", "Soleil 1", "Soleil 2".

Chaque planche de 6 vues coûte 15f., elle est accompagnée d'un petit livret d'explications. En vente au siège de la Société, 3 rue Beethoven 75016 Paris. Pour les commander par la poste, envoyer en plus du prix indiqué 2f. par planche pour frais d'envoi.

