

**SOCIETE
ASTRONOMIQUE
DE LYON**



REVUE TRIMESTRIELLE

Nouvelle série — N° 23 — 1984

Photographie de couverture

Cirque Copernic

Photographie prise par Monsieur R. Prud'homme
avec un télescope de 200 mm d'ouverture ouvert à $f / 6,2$

Nous vous présentons ici la suite de l'article intitulé :

Les astronomes à la recherche des civilisations extraterrestres
(Conférence faite le 13 mars 1982 par Monsieur E. Davoust, de
l'observatoire de Besançon)

dont la première partie a été donnée dans notre précédent numéro.

NATURE DU SIGNAL

Nous percevons le monde extérieur par les signaux qu'il nous transmet par nos cinq sens. De même, nous percevons l'Univers par les rayonnements qu'il émet ou, du moins, de ceux que nous connaissons et que nous savons capter. Ce sont les ondes électro-magnétiques, les ondes de gravitation et le rayonnement cosmique de particules. L'étude de ces rayonnements est l'objet de l'astronomie. Ces trois types de rayonnements sont aussi susceptibles de résulter d'activités intelligentes mais, seules, les ondes électro-magnétiques peuvent servir à la transmission de messages. Les ondes électro-magnétiques sont émises à toutes les fréquences (γ , X, UV, IR, radio). Chaque domaine de fréquences nécessite un récepteur particulier dont certains doivent être mis à bord de ballons ou de satellites parce que l'atmosphère terrestre absorbe certains rayonnements (ultraviolets, X et γ). Toutes ces ondes voyagent à la même vitesse, celle de la lumière qui est de 300 000 km/s dans le vide. C'est la plus grande vitesse à laquelle l'information peut voyager. Toute la matière connue dans l'Univers rayonne des ondes électro-magnétiques de façon naturelle et cela dans toutes les gammes de fréquences. Il est donc légitime de s'attendre à ce qu'une civilisation extraterrestre utilise ces ondes si répandues dans l'Univers pour communiquer. Mais il est tout aussi possible qu'elle préfère utiliser un autre rayonnement que nous ne connaissons pas parce qu'il fait partie d'une «hyper-physique» que nous ignorons encore.

Dans le cas favorable où des ondes électro-magnétiques sont émises artificiellement et servent, éventuellement, à la communication interstellaire, nous devons pouvoir les distinguer de celles qui sont émises naturellement. Un signal émis sous forme d'une onde peut se découper de la façon suivante :

Signal = fréquence + modulation + code

ou encore

Signal = physique + technologie + langage.

Le signal est porté par une onde émise par un mécanisme physique à une certaine fréquence. Cette onde est modulée artificiellement par une technique quelconque et le rythme suivant lequel elle est modulée constitue le message. Si la modulation est aléatoire, il n'y a pas de code, ni de message, l'onde n'est que du «bruit» naturel.

Une autre possibilité consiste à émettre une onde à une fréquence où elle ne peut pas être émise naturellement, par exemple à une fréquence naturelle multipliée par un nombre irrationnel, un nombre comme π ou $\sqrt{2}$. En effet, aucun processus physique naturel ne peut déplacer la fréquence d'une onde de cette manière. Le signal est alors :

Signal = fréquence X nombre irrationnel.

Cette possibilité est valable pour une bouée-phare interstellaire, mais ne permet pas de communiquer. De tels signaux nous apprendront que nous ne sommes pas seuls mais rien de plus.

Nous revenons donc à la première forme proposée pour le signal : une onde émise à une certaine fréquence et le message est contenu dans le rythme suivant lequel cette onde est modulée. La réception d'un tel signal dépend de plusieurs paramètres : il faut d'abord orienter l'antenne, le télescope ou le récepteur en général, vers la source du signal. Il faut ensuite brancher ce récepteur au bon moment, le régler à la bonne fréquence et enfin l'adapter pour détecter le mode correct de modulation. Il y a un choix infini de valeurs pour les différentes variables. Nous devons optimiser ce choix pour avoir une chance de détecter un signal d'origine artificielle, ou d'être détectés, si c'est nous qui émettons.

ORIENTATION DU RECEPTEUR

Le bon sens nous suggère d'observer toutes les étoiles comme le soleil, du type G donc, dans le voisinage immédiat de notre système solaire. C'est d'ailleurs par là qu'on commencé les recherches de signaux artificiels. Cependant, si les civilisations que nous cherchons ont essaimé la Voie Lactée, on peut les trouver autour de n'importe quelle étoile. Certains astronomes préfèrent faire des observations systématiques, balayer tout le ciel avec leur récepteur.

Une autre option consiste à observer toutes les sources de rayonnement anormales répertoriées lors d'observations classiques. Certaines étoiles ont un rayonnement infrarouge excessif parce qu'elles sont entourées d'un nuage de poussières, mais ce même rayonnement pourrait être la conséquence de travaux de génie interstellaire comme les sphères de Dyson où l'étoile est entourée d'une sphère colonisée captant toute son énergie et ne rejetant que de l'infrarouge. Les cartes radio du ciel révèlent parfois des sources radio parasites : ce sont de bons candidats si elles coïncident avec des étoiles.

On peut tenter d'optimiser les chances de détection en pointant le récepteur vers un lieu d'accumulation d'étoile : le centre de la Voie Lactée (quelques milliards d'étoiles), un amas globulaire (1 million d'étoiles) ou une autre Galaxie (des centaines de milliards d'étoiles). Malheureusement, les distances à ces catégories d'objets sont astronomiques, 30 000 années lumière dans les meilleurs des cas.

Une autre possibilité est de pointer un émetteur à l'opposé d'un objet exceptionnel comme une supernova, un pulsar ou le centre de notre Voie Lactée. Si dans cette direction, il y a une civilisation, il est probable qu'elle s'intéresse à cet objet du point de vue astrophysique et qu'elle l'observe souvent et la probabilité d'être vus est accrue. Si nous émettons dans un cône de 1 degré carré autour de cette direction, la probabilité pour trouver une civilisation dans ce cône est de 1/41253 par rapport au reste du ciel. Il faut donc qu'il y ait 50 000 civilisations dans notre Voie Lactée pour qu'il y en ait au moins une dans ce cône.

La meilleure des solutions semble être mixte : conduire d'une part, une recherche systématique du ciel à sensibilité médiocre et, d'autre part, viser une liste de cibles bien choisies avec une haute sensibilité.

SYNCHRONISATION TEMPORELLE

Nous n'avons a priori aucun moyen de savoir à quel moment les émissions de signaux intelligents sont les plus probables. Dans notre expérience quotidienne, par exemple, pour les nouvelles à la radio ou le début d'une séance publique (cours, cinéma, ...) nous supposons que c'est à l'heure juste, ou à la demi sans risquer de beaucoup nous tromper. De même dans la Voie Lactée, nous disposons de quelques horloges galactiques : les novae, les étoiles variables, les étoiles binaires. Ces étoiles sont le siège d'événements naturels périodiques à des échelles variant de quelques heures à une année.

Les novæ sont des étoiles qui ont de brusques flambées d'activité qui les rendent beaucoup plus brillantes. Dans notre voisinage, il y en a une tous les dix ans en moyenne. La nova du Cygne (29 août 1975) est la dernière en date. Le tableau 8 donne les dates auxquelles nous sommes susceptibles de recevoir un message de quelques civilisations qui émettent au moment où elles voient la nova en activité. Dans ces calculs, il faut tenir compte de ce que la lumière voyage avec une vitesse limitée : le même évènement est perçu par différents observateurs à des dates qui dépendent de leur éloignement du lieu de l'évènement. Plus la civilisation émettrice sera proche de la ligne nova - Terre, plus l'éruption de la nova et la réception du signal artificiel seront rapprochés pour nous.

Les étoiles variables ont une luminosité qui varie suivant un cycle qui peut durer quelques heures à quelques années suivant l'étoile. La détection de signaux artificiels en provenance de cette étoile sera plus probable au moment où elle brille le moins.

Les étoiles binaires tournent l'une autour de l'autre, avec des périodes qui varient aussi de quelques jours à quelques années suivant leur éloignement moyen. Les moments où elles sont le plus rapprochées, ou le plus éloignées, sont distinctifs de leur histoire et pourraient servir pour synchroniser émission et réception de signaux.

L'idée de synchronisation temporelle par nova est assez universelle pour avoir suggéré indépendamment par deux astronomes, l'un américain, l'autre soviétique. Par contre, les étoiles binaires ou variables ne permettent de synchroniser un contact qu'avec elles-mêmes.

FRÉQUENCES DU SIGNAL

Il y a une infinité de fréquences possibles pour émettre un signal. Pour s'en rendre compte, il suffit de tourner le bouton des fréquences d'un poste de radio ordinaire. L'atmosphère terrestre n'est transparente qu'à deux gammes de fréquences : optique et radio. C'est donc sur ces deux domaines que se porte notre choix dans un premier temps, par opportunisme. Le bruit de fond de la Voie Lactée est minimum dans le domaine radio. C'est un avantage important pour pouvoir détecter un signal d'autant plus faible qu'il viendra de loin. Il y a dans le domaine radio une série de fréquences « clé » auxquelles les radioastronomes observent souvent à des fins astrophysiques. Le point d'eau est le surnom qu'ils ont donné à une bande de fréquences entre 1400 et 1800 MHz (soit 18 à 21 cm de longueur d'onde) d'émissions naturelles des composés de l'eau : hydrogène et radical hydroxyle (OH). Le maximum du rayonnement cosmologique résiduel du big bang se trouve aussi dans ce domaine. Les récepteurs ont, par ailleurs, de nets avantages sur les télescopes optiques : la surface collectrice est plus grande, meilleur marché, plus durable, les effets Doppler sont moins importants et plus facilement compensés, enfin on peut observer même quand il fait mauvais. Le domaine radio est donc du point de vue terrestre le meilleur choix pour une bande de fréquences.

Le rayonnement naturel de la Voie Lactée se fait sur des bandes passantes très larges, s'étalant parfois sur tous les domaines de fréquences : le pulsar du Crabe est un exemple. Par opposition, pour ressortir clairement du fond continu, un signal artificiel devra être fortement monochromatique. A puissance émettrice égale un signal à bande passante étroite a en plus l'avantage d'une portée plus grande qu'un signal étalé. Par contre, il sera difficilement détectable si nous ne connaissons pas d'avance la fréquence. La détection accidentelle d'un signal artificiel est de plus peu probable : les astronomes ont l'habitude de rejeter tous les bruits parasites qui gênent leurs observations astrophysiques, sans chercher à les identifier. Enfin, plus la fréquence d'émission est étroite, plus la modulation (donc le message) est limitée.

Une stratégie d'écoute/émission consiste à opter pour une des fréquence «clé» ci-dessus, ou son voisinage immédiat. Cependant, il nous faut connaître exactement notre vitesse relative par rapport à la source ou la cible du signal et corriger la fréquence de l'effet Doppler. Si nous choisissons de mesurer les fréquences dans un système de coordonnées qui tourne avec la Galaxie, l'erreur probable sur ces fréquences corrigées est de 10 %. Cette incertitude est importante dans l'hypothèse où le signal est une fréquence multipliée par un nombre irrationnel.

Une stratégie possible d'émission est la suivante : émettre des signaux à plusieurs fréquences sur une large bande passante avec une symétrie qui indique le centre du système des fréquences aux auditeurs éventuels, par exemple en intensifiant les signaux ou en rapprochant les fréquences d'émission vers le centre. Le message lui-même serait émis à la fréquence centrale sur une bande étroite.

Des motivations techniques peuvent aussi guider le choix des fréquences : le milieu interstellaire élargit la bande passante des signaux qui le traversent à basse fréquence. Par contre, la portée d'un signal est inversement proportionnelle à sa fréquence.

Pour ce qui est de nos possibilités d'émission, les meilleurs émetteurs sur Terre ont une portée d'environ 300 années lumière et il y a quelques cent mille étoiles comme le Soleil dans une sphère de 300 années lumière de rayon.

MODULATION DU SIGNAL : LE MESSAGE

Le message est transmis par modulation de l'onde. Il existe quatre façons de moduler une onde électro-magnétique : en phase, en polarisation, en amplitude et en fréquence. Les deux dernières méthodes sont utilisées couramment pour nos émissions radio et télévision. La polarisation circulaire élimine les interférences d'origine terrestre. Le choix évident est de moduler le signal en fréquence puisque le récepteur sera conçu pour scruter finement toutes les fréquences d'une gamme donnée. Cela élimine une variable parmi tous les paramètres de la détection.

Un message émis dans le but d'établir le contact avec d'autres civilisations doit suivre le principe d'anticyptographie, avoir un code simple et un contenu facilement déchiffrable. La communication interstellaire est possible si les mathématiques et la physique sont des sciences assez universelles pour être acquises par toute civilisation intelligente. Cette hypothèse est au moins vérifiée pour les différentes civilisations humaines.

Un exemple de message est celui qui a été envoyé le 16 novembre 1974 par le radiotélescope d'Arecibo, à Puerto-Rico, en direction de l'amas globulaire M 13 à 13 cm de longueur d'onde. Il contient 1 679 caractères dans le système binaire et donne successivement les chiffres de 1 à 10, le poids atomique de quelques atomes fondamentaux, il décrit ensuite douze molécules simples, l'ADN, l'homme avec le nombre d'êtres humains (4 milliards) et leur taille (14 unités de 13 cm), le système solaire avec la Terre et, enfin, le radiotélescope et ses dimensions. Le message aurait pu inclure la distance qui nous sépare de M 13.

LA RECHERCHE EFFECTIVE DE SIGNAUX ARTIFICIELS

Nous avons examiné en détail les différents paramètres de l'émission/détection de signaux artificiels et nous avons cerné les caractéristiques les plus probables d'un tel signal : il est émis aux fréquences radio entre 18 et 21 cm de longueur d'onde, sur une bande passante très étroite. Nous n'avons de précision sur la date probable de réception que pour quelques sources particulières distribuées près d'un axe nova - Cygni 1975 - Terre. Nous nous

inquiéterons de la technique de modulation et du décodage plus tard, lorsque nous aurons effectivement détecté de tels signaux.

Les observations astronomiques réalisées ou en cours pour détecter des signaux artificiels sont décrites dans le tableau 9. La plupart ont été faites dans le domaine radio, mais avec des récepteurs conventionnels qui permettent rarement un balayage fin en fréquences. Parfois ces observations sont «passives», c'est-à-dire qu'elles sont un sous-produit d'observations conventionnelles à but astrophysique ou astronautique. Par exemple, les observations de Cohen et al. en direction de 25 amas globulaires avaient pour but principal de détecter des composés oxygénés dans ces amas. La raison pour laquelle ces observations ne sont pas toujours optimisées pour la recherche de signaux artificiels est simple : ce ne sont pas des observations «sérieuses» aux yeux des organismes de tutelle qui, par conséquent, ne veulent pas financer de tels projets. L'absence des Français et, surtout, des Anglais dans le tableau 9 est remarquable : ce sont pourtant les uns et les autres de bons radioastronomes. Il n'y a qu'aux USA et en URSS que la recherche de civilisations extraterrestres est encouragée par les autorités scientifiques.

Il y a pourtant un argument qui joue en faveur de telles observations : celui des retombées astrophysiques d'un programme de ce genre. La recherche de signaux radio monochromatiques nécessite le développement d'une technique des récepteurs ultra-sensibles multicanaux (ou à balayage en fréquence) et du traitement en temps réel (et non différé) des signaux captés. Ces techniques nouvelles pourront être utilisées dans des domaines de l'astrophysique classique comme la spectroscopie radio, l'étude fine des pulsars, la mesure des vitesses internes dans les galaxies, les restes de supernova, ... Elles pourront aussi s'appliquer à l'astronautique : à la communication avec les sondes que nous ne manquerons pas d'envoyer à des distances de plus en plus grandes de la Terre.

IMPACT DE CETTE RECHERCHE SUR L'HUMANITE

L'homme s'est de tout temps préoccupé de savoir s'il était seul dans l'Univers. Cela fait partie des questions fondamentales sur la vie, la mort et l'au-delà. Ces questions traduisent chez l'homme le besoin de mettre de l'ordre dans le monde où il vit, et chaque culture tente de fournir une vue unifiée et cohérente du monde et des forces qui le régissent. Ainsi la réponse à cette question des extraterrestres orientera profondément notre vision du monde.

Un résultat positif de détection aura pour conséquence immédiate de nous donner une leçon de modestie. Non seulement la Terre n'est pas au centre de l'Univers, mais en plus la civilisation qui l'habite n'a rien d'exceptionnel. A plus longue échéance, nous aurons une perspective nouvelle sur notre forme de vie, ses origines et son futur. Nous apprendrons quelles sont les formes sociales et les structures les plus aptes à la survie, nous découvrirons de nouvelles formes et réalisations esthétiques qui nous enrichiront, enfin, d'une façon plus générale, nous deviendrons membre à part entière du club galactique et nous partagerons l'héritage culturel, historique et scientifique accumulé par les civilisations depuis des milliards d'années. Cette attente messianique d'un contact qui nous sauvera de nous-mêmes est considéré, à juste titre, par certains chercheurs, comme une attitude peu scientifique.

Des conséquences plus pessimistes d'un contact peuvent être l'invasion et/ou l'exploitation de la Terre. Heureusement l'énormité des distances interstellaires nous met certainement à l'abri d'une telle catastrophe. La subversion est une menace plus subtile : ils pourraient, sous le couvert d'enseignement ou d'assistance technico-scientifique, nous faire construire des dispositifs qui leur permettraient de prendre le contrôle de la Terre. La seule

défense, dans ce cas, est une bonne dose de scepticisme, ce dont les scientifiques ne manquent pas. Enfin, il y a la possibilité que le simple contact avec une civilisation très supérieure à nous ait l'effet d'un « choc culturel ». Il est probable qu'un contact radio ne soit pas assez efficace pour avoir de tels effets. Sans vouloir minimiser les risques d'un contact, nous pensons qu'ils n'interviennent pas à la détection mais à partir du moment où nous répondons.

Un résultat négatif sera tout aussi enrichissant dans la mesure où nous saurons l'exploiter. Une fois passé le vertige qui nous aura saisi devant ce vide infini qui nous entoure, nous aurons à méditer sur le sens de notre présence unique, sur notre rôle de témoins solitaires d'un univers silencieux. C'est le point de départ d'une réflexion que je vous invite à suivre.

TABEAU 1

Proportion d'étoiles des différentes classes dans la Voie Lactée.

Le Soleil est une étoile G. Les étoiles à gauche du Soleil ont une durée de vie très courte, les autres étoiles sont très froides.

CLASSE	O	B	A	F	G	K	M
POURCENTAGE	1	10	22	19	14	31	3

TABEAU 2

Proportion d'étoiles multiples dans la Voie Lactée.

Les planètes qui orbitent autour de ces étoiles subissent de grandes variations saisonnières de températures.

SYSTEME	POURCENTAGE (systèmes)	POURCENTAGE (étoiles)
Simple	30	14
Double	47	46
Multiple	23	40

TABEAU 3

Distance moyenne entre étoiles doubles en unités astronomiques (U.A.).

Pour mémoire la distance du Soleil à la Terre est 1, celle du Soleil à Pluton 40.

SÉPARATIONS (U.A.)	POURCENTAGE
0 - 6.	29
6. - 60.	21
60. - 600	30
+ de 600	20

TABLEAU 4

Distance moyenne (en années lumière) entre civilisations
en fonction de leur nombre dans la Voie Lactée.

La dernière colonne indique le nombre probable d'étoiles qu'il faut observer avant de tomber sur une étoile ayant une civilisation intelligente.

NOMBRE DE CIVILISATIONS	DISTANCE ENTRE CIVILISATIONS	NOMBRE PROBABLE D'ÉTOILES A OBSERVER
10	20 400	2 000 000 000
100	9 460	200 000 000
1 000	4 400	20 000 000
10 000	2 040	2 000 000
100 000	946	200 000
1 000 000	440	20 000
10 000 000	204	2 000
100 000 000	95	200
1 000 000 000	44	20
20 000 000 000	7.5	1

TABLEAU 5

Fréquence probable de collisions entre la Terre et un météorite,
en fonction de la taille du météorite,
et zone dévastée sur Terre.

Diamètre bolide (en Km)	2.1	4.2	8.5	17	34
Temps entre deux collisions (millions d'années)	13	62	260	1 100	4 500
Zone dévastée (en Km)	320	840	2 200	5 000	11 000

TABLEAU 6

Distance maximale de colonisation (en années lumière) pour maintenir l'espace vital constant,
en fonction du taux de croissance.

Pour mémoire, le diamètre de notre Voie Lactée est 100 000 années lumière.

DISTANCES MAXIMALES (en années-lumière)	TAUX DE CROISSANCE (en pourcentage)
490	2
978	1
1 956	0.5
4 890	0.2
9 780	0.1

TABLEAU 7

Répartition des éléments dans notre système solaire et leur utilité pour des civilisations interstellaires.

POIDS ATOMIQUE	EXEMPLES	USAGE	CYCLES	PERTES	BESOIN	ABONDANCE	RÉPARTITION
Léger	Hydrogène Hélium Lithium Berillium	carburant	1 cycle	consumé	important	95 %	Planètes extérieures - croûte terrestre - glaces des lunes extérieures.
Moyen	Oxygène Carbone Azote	vie	recyclé	évacuation (1) pertes dynamiques	moyen	1 %	Planètes extérieures - chondrites carbonés - astéroïdes - Terre - Vénus
Lourd	Fer Nickel Cuivre	structure	statique	évacuation érosion usure	léger réparation croissante	traces	Noyaux des planètes - astéroïdes planètes telluriques

(1) Evacuation des produits radioactifs.

TABLEAU 8

Synchronisation des émissions et de la réception des signaux entre civilisations par la Novæ Cygni 1975.

La terre est le récepteur et la civilisation émettrice est identifiée par l'étoile au voisinage de laquelle elle vit, il y a une incertitude sur la date exacte de réception parce que les distances des étoiles sont plus ou moins bien connues.

ÉTOILE	DISTANCE ÉTOILE-TERRE (années-lumière)	ANGLE ÉTOILE NOVA-TERRE (degrés)	DATE DE RÉCEPTION	INCERTITUDE (jours)
η Cass	17.9	33	15.07.1978	\pm 23
Étoile de Barnard	5.98	60	2.09.1978	5
Altaïr	16.5	41	25.08.1979	30
α Cen	4.39	134	25.12.1982	25
UV Cet	8.88	89	20.04.1984	60
70 Oph	18.7	61	20.03.1985	80
τ Cet	11.8	88	15.06.1987	70
ϵ Eri	10.8	100	15.06.1988	45
Procyon	11.33	122	25.02.1993	90

TABLEAU 9

Recherches réalisées ou en cours pour détecter des signaux artificiels d'origine extraterrestre.

DATE	CHERCHEURS	SITE	FREQUENCES	CIBLE	DUREE (heures)
1960	Drake	U.S.A.	radio 21 cm	2 étoiles	400
1966	Kellerman	Australie	radio	1 galaxie	7
1968 - 69	Troitskij et al.	U.R.S.S.	radio	12 étoiles	11
1970 -	Troitskij et al.	U.R.S.S.	radio	tout le ciel - signaux pulsés	700....
1970 - 71	Verschuur	U.S.A.	radio 21 cm	9 étoiles	13
1972 - 76	Palmer et al.	U.S.A.	radio 21 cm	674 étoiles	500
1972 -	Kardashev et al.	U.R.S.S.	radio	tout le ciel - signaux pulsés	...
1973	Dixon et al.	U.S.A.	radio 21 cm	tout le ciel	...
1974 -	Bridle et al.	Canada	radio 1,6 cm	500 étoiles	140
1974	Wisniewski	(satellite)	ultraviolet	3 étoiles	7
1975 - 76	Drake et al.	U.S.A.	radio	4 galaxies	100
1975 - 77	Israël et al.	Pays-Bas	radio 21 cm	(1)	400
1976 -	Clark et al.	U.S.A.	radio	4 étoiles	7
1976	(Université de Californie)	U.S.A.	radio 21 cm	tout le ciel	...
1977	Bleck et al.	U.S.A.	radio 18 cm	200 étoiles	100
1977	Drake et al.	U.S.A.	radio 18 cm	6 étoiles	10
1977	Wisniewski et al.	R.F.A.	radio 21 cm	3 étoiles	2
1978	Horewitz	U.S.A.	radio 21 cm	185 étoiles	80
1978	Cohen et al.	U.S.A. - Australie	radio	25 amas globulaires	80
1978	Knowles	U.S.A.	radio	2 étoiles	5
1979	Cole et al.	Australie	radio	étoiles F, G, K	50
1979	Freitas et al.	U.S.A.	optique	(2)	30
1979 -	(J.P.L. Université de Californie)	U.S.A.	radio	(3)	400
1979 -	Tarter et al.	U.S.A.	radio	200 étoiles	35

(1) Analyse de carte radio de 250 champs stellaires pour trouver des coïncidences entre émissions radio résiduelles et étoiles brillantes.

(2) Recherche sur 90 plaques photos d'objets pouvant ressembler à des sondes aux points de libration équatoriaux du système Terre-Lune.

(3) Analyse de signaux radio résiduels captés lors du survol des satellites de la NASA.

ÉQUATION DE DRAKE

$$N = R F_* N_p F_h F_v F_c L$$

où :

- N = nombre de civilisations intelligentes dans la Voie Lactée.
- R = taux moyen de formation d'étoiles dans la Voie Lactée.
- F_* = fraction d'étoiles avec écosphère habitable.
- N_p = nombre de planètes autour de ces étoiles.
- F_h = fraction de ces planètes habitables.
- F_v = fraction de ces planètes habitables ayant une forme de vie.
- F_c = fraction de ces planètes ayant une civilisation intelligente.
- L = longévité d'une civilisation.

Si :

- R = 10 - 20 étoiles par an
- F_* = 0,05 - 0,14
- N_p = 9 (le cas du système solaire)
- F_h = 0,11 (une planète sur neuf)
- F_v = 0,5 - 1
- F_c = 1
- L = 100 à 1 000 000 d'années.

cela entraîne : $N = 25$ à $2\ 600\ 000$ civilisations

LES MACHINES DE VON NEUMAN : UN MODELE DE SONDE AUTOMATIQUE POUR EXPLORER LA VOIE LACTEE

Machine de von Neumann :

Constructeur universel capable de se déplacer, de fabriquer n'importe quel dispositif et en particulier de se reproduire (le matériel et les plans lui étant fournis) et disposant de systèmes logiques du niveau de l'intelligence humaine. En bref, un robot très sophistiqué.

Stratégie d'exploration :

- Nous envoyons une machine vers une partie du système solaire riche en minerais (les astéroïdes par exemple).

- Elle y construit d'autres sondes à propulsion classique et les envoie vers des étoiles proches.

- Ces étoiles fournissent des ressources nouvelles et en particulier du combustible (hydrogène) pour construire des sondes de troisième génération. Les systèmes planétaires sont explorés et servent de tremplin pour d'autres vagues colonisatrices.

- Ces étoiles peuvent aussi être colonisées : fabrication de colonies artificielles en orbite autour de l'étoile, synthèse de cellules vivantes ou même d'êtres vivants, d'abord élevés par des robots puis émancipés.

- L'information nécessaire à toutes les prouesses techniques peut être stockée en mémoire dans la machine ou envoyée sur demande par la Terre.

Difficultés apparentes :

- La technologie des machines peut être complètement dépassée au bout de quelques voyages interstellaires. Des instructions envoyées de la Terre leur permettra de se restructurer à la prochaine escale.

- Ces machines ne sont pas infailibles et peuvent échapper à notre contrôle. Il suffit d'implanter une sécurité qui les empêche de fonctionner sans contrôle, ou de passer le contrôle aux colonies créées par les machines. Enfin, l'émancipation d'un robot n'est peut-être pas nécessairement une catastrophe.

UN EXEMPLE D'APPRÉHENSION GLOBALE DU PROBLEME DE LA COMMUNICATION AVEC DES CIVILISATIONS EXTRATERRESTRES : LE PROGRAMME SOVIÉTIQUE

Recherches fondamentales sur le concept de civilisation extraterrestre

- Astronomie : cosmogonie, observations systématiques ou sélectives, composés organiques dans l'espace.
- Vie : définition, origine, exobiologie.
- Intelligence : le concept, modèles, systèmes symboliques.
- Humanité : lois du développement des civilisations, maîtrise de l'environnement.
- Transfert d'informations : méthodes de communications.

Recherches sur le problème de la communication entre civilisations

- Théorie des civilisations cosmiques.
- Contacts entre civilisations, conséquences.
- Modes d'interactions entre civilisations.
- Fondements technico-scientifiques de la recherche et du décodage de signaux artificiels.
- Recherche d'effets de travaux de génie à très grande échelle.

Principe d'un programme de recherches appliquées.

- Programme à long terme, adaptable aux progrès technologiques.
- Études des retombées astrophysiques possibles.
- Nécessité d'adopter plusieurs stratégies.

Recherche de signaux

- Sondage radio du ciel (fréquences, instruments).
- Sélection de sources suivant la dimension.
- Étude de sources galactiques/d'étoiles du voisinage solaire.
- Étude de sources galactiques et extragalactiques choisies.
- Étude de signaux d'étoiles au voisinage solaire.
- Recherche de signaux de galaxies du groupe local.
- Recherche de signaux avec un système couvrant tout le ciel.
- Recherche de sondes.
- Recherche d'excès infra-rouge d'étoiles choisies.
- Étude de la structure d'objets suspectés d'être artificiels.

Décodage

- Organisation du langage (texte).
- Système grammatical.
- Système sémantique.
- Techniques de traduction.

LES GRAINS SOLIDES AUTOUR DES ÉTOILES

Conférence de Monsieur BERGEAT, Professeur à l'Université Lyon 1

Dans la suite, nous parlerons indifféremment de grains ou de poussière. Leur nature est celle de solides, alors que les étoiles et certaines nébuleuses sont constituées de gaz.

I. - Introduction : la poussière interstellaire dans les galaxies spirales.

Dans notre Galaxie (la Voie Lactée), on observe de vastes zones apparemment vides d'étoiles (plages lacunaires), souvent situées au milieu de régions stellaires denses. Ce sont les «nébuleuses obscures» photographiées par l'astronome américain Barnard (1857-1923). Certaines sont moins noires, c'est-à-dire plus diffuses d'aspect. Assez vite, les astronomes réalisèrent qu'il n'existe pas de tuyaux vides d'étoiles traversant notre Galaxie mais plutôt des nuages constitués de grains solides (un peu comme la suie) qui affaiblissent plus ou moins le rayonnement des étoiles situées derrière (absorption = réduction de l'intensité incidente). C'est particulièrement manifeste lorsqu'une nébuleuse gazeuse est localement absorbée et certains complexes comme celui de ζ Ori et de la tête de cheval sont particulièrement riches en détails.

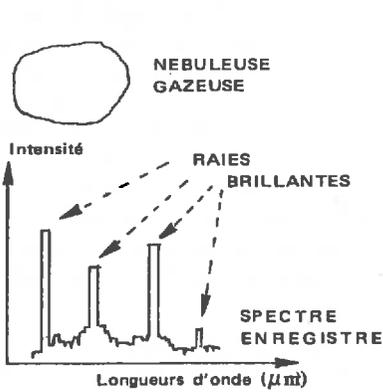


Fig. 1a

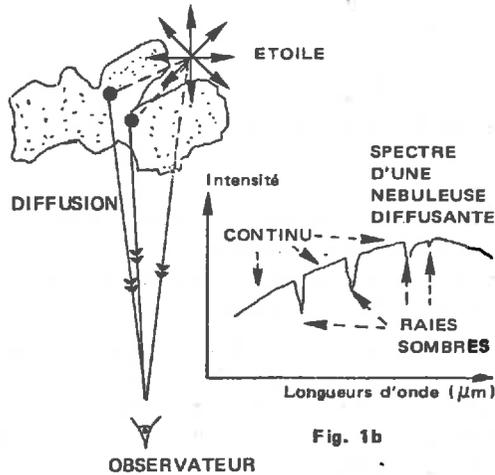


Fig. 1b

Alors que toutes les nébuleuses planétaires, les régions HII (hydrogène ionisé) et certaines nébuleuses dites gazeuses montrent des raies spectrales brillantes (fig. 1a), certaines nébuleuses brillantes présentent, au contraire, un spectre continu avec des raies sombres (fig. 1b). Dès 1912, Slipher photographie ces spectres et montre que les raies sombres sont, dans chaque cas, les mêmes que celles d'une étoile proche associée. *C'est la preuve que la lumière reçue de la nébuleuse est bien empruntée à l'étoile.* Le phénomène est la *diffusion* (la lumière change de direction sans changer de longueur d'onde). Ces nébuleuses de formes irrégulières sont dites par réflexion ou diffusantes.

Sur terre, c'est la diffusion qui est responsable de la couleur bleue du ciel (les diffuseurs sont ici les molécules de notre atmosphère : diffusion Rayleigh) ou des halos lunaires (les diffuseurs sont alors des cristaux de glace des cirrus de haute altitude). Dans ce dernier cas comme dans celui des grains, absorption et diffusion sont étudiées au moyen de la théorie de Mie (1909) qui généralise celle de Rayleigh à des grains de dimension quelconque, mais ayant la forme de sphères ou de cylindres.

Revenons à l'espace interstellaire pour indiquer que les nuages de poussière ont des dimensions allant de un centième à quelques dizaines de parsecs (1 parsec ou pc $\approx 3 \times 10^{18}$ cm). Ils bordent les bras spiraux des galaxies spirales où se forment

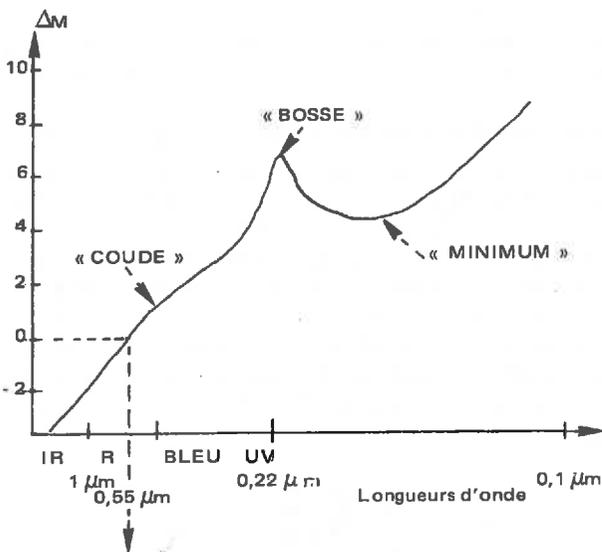


Fig. 2 - ROUGISSEMENT INTERSTELLAIRE

ΔM est la perte de magnitudes relative

(rouge, infrarouge). Ils sont encore responsables de la *polarisation interstellaire* et des mystérieuses *bandes interstellaires diffuses* (raies ou bandes d'absorption larges de quelques Å à 30 Å : 1 Å = 1 Angström, dix-millionième partie du millimètre) qui affectent le spectre d'étoiles fortement absorbées.

Il reste de nombreux sujets de controverses entre astrophysiciens quant à la composition de ces grains (silicates, graphite, en cristaux ou amorphisés, carbure de silicium, glaces, magnétite, ...), leur mode de formation (naissance ou ? à partir de germes ? croissance, destruction par collisions ?) et leur rôle en astrophysique, en particulier dans la formation des étoiles.

actuellement les étoiles comme le montrent, à l'évidence, les clichés de galaxies extérieures. Avec des dimensions allant de quelques centièmes de μm à quelques μm (1 μm = 1 micromètre ou micron, millionième partie du mètre), on estime que ces grains représentent au total environ 1% de la masse de la matière interstellaire. Ils sont à l'origine du rougissement interstellaire (fig. 2) car la perte de magnitudes qu'ils provoquent (par absorption et diffusion) est plus importante aux courtes longueurs d'onde (ultra-violet, bleu), qu'aux grandes longueurs d'onde

Les dimensions de grains déduites plus haut résultent de ce que

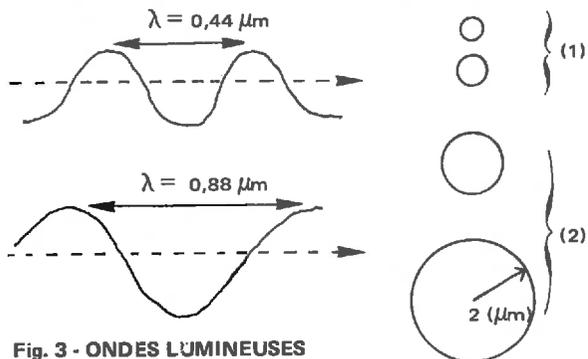


Fig. 3 - ONDES LUMINEUSES INCIDENTES SUR DES GRAINS

- (1) peu efficaces
- (2) efficaces

a) leur efficacité diminue rapidement lorsque leur rayon devient nettement plus petit que la longueur d'onde de la lumière (fig. 3),

b) les grains de plus en plus gros sont de plus en plus rares (on estime par exemple que les grains de $0,02 \mu\text{m}$ de rayon sont trois mille fois plus nombreux que ceux de rayon $0,2 \mu\text{m}$). Il n'est donc pas étonnant que le rayon des grains détectés

soit du même ordre de grandeur que la longueur d'onde du rayonnement observé et la présence de grains plus petits et surtout plus grands, n'est pas exclue.

II - Les grains dans le système solaire.

De fait, on observe, dans le système solaire, des solides de toutes les tailles (souvent des débris) allant de la micrométéorite à l'astéroïde. Ils sont responsables de plusieurs phénomènes :

1. Certaines queues de comètes.

Habituellement, les comètes les plus brillantes présentent une queue de type I (ions constituant un plasma) pratiquement à l'opposé de la direction du soleil. Le vent solaire qui souffle radialement à partir du soleil, à environ 400 km par seconde, rencontre le nuage de gaz cométaire. Les ions de la queue de la comète sont chassés par les champs magnétiques du vent à l'opposé du soleil à des vitesses excédant souvent 100 km par seconde. On peut observer le rayonnement de ces ions jusqu'à des distances de 100 000 000 km ($=10^8$ km) du noyau (fig. 4).

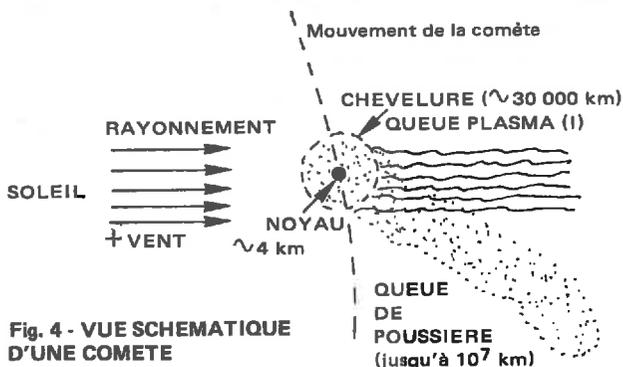


Fig. 4 - VUE SCHEMATIQUE D'UNE COMETE

Des particules solides de dimensions de l'ordre du micromètre sont arrachées du noyau par le gaz qui sublime à son contact. La pression exercée par le rayonnement solaire pousse ces grains sur des orbites hyperboliques. Comme leur vitesse radiale est habituellement bien plus faible que celle des ions de la queue, *ces grains constituent une seconde queue* (type II ou III, réfléchissant et diffusant la lumière solaire *qui est plus courbée vers l'arrière* (fig. 4).

2. La lumière zodiacale.

En l'absence de la lune et sous les tropiques, une lumière intense provient du ciel nocturne, sous l'apparence d'un cône, à l'ouest après le coucher du soleil et à l'est avant son lever. Elle est plus brillante vers le soleil et dans les constellations du zodiaque. A 30° du soleil, elle est trois fois plus brillante que les parties les plus brillantes de la Voie Lactée. Elle s'étend en fait sur tout le ciel mais elle est faible loin du soleil, sauf dans la direction antisolaire (phénomène appelé gegenschein).

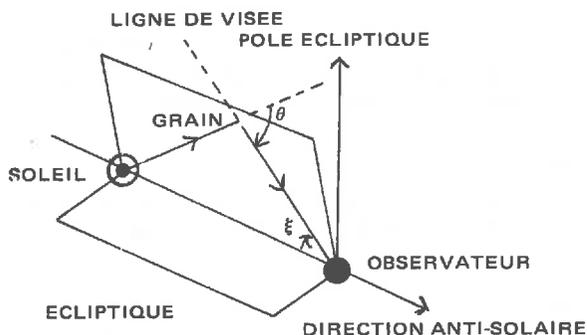


Fig. 5 - EXPLICATION DE LA LUMIERE ZODIACALE

La lumière zodiacale est due à l'absorption et à la diffusion de la lumière solaire par les grains du milieu interplanétaire (fig. 5). Les grains chauffés par le rayonnement solaire absorbé, rayonnent à leur tour dans l'infrarouge. A la lumière solaire diffusée s'ajoute donc une *lumière infrarouge émise par les grains (émission thermique)*. Le nuage zodiacal contient un mélange de débris d'astéroïdes, de poussière cométaire et probablement de grains d'origine interstellaire.

3. La couronne solaire.

La couronne solaire se divise en deux parties :

- la couronne K vue près du soleil : il s'agit de lumière diffusée (effet Thomson) par les électrons libres (c'est-à-dire arrachés des atomes).
- la couronne F (couronne de Fraunhofer ou fausse couronne) qui est due à la diffusion par les poussières interplanétaires.

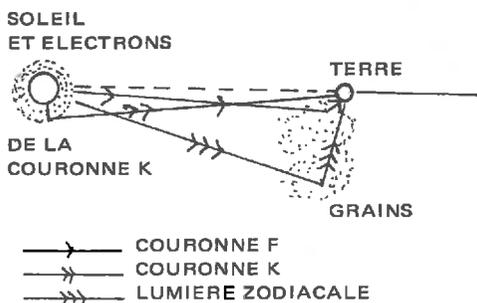


Fig. 6

De fait, la fausse couronne correspond à la diffusion sous de petits angles : la lumière est faiblement déviée (c'est la diffraction en physique). Comme le montre la figure 6, lumière zodiacale et couronne F ont la même origine : les grains interplanétaires.

Des modèles et des calculs complexes permettent en principe de déduire des renseignements sur les dimensions, les propriétés optiques et la distribution spatiale de la poussière interplanétaire. Il semble que au moins

deux types de composition existent : silicates, fer, sulfure de fer, ... avec, pour les grands grains (10 à 100 μm) des formes irrégulières.

4. Les prélèvements in situ.

On expédie maintenant des laboratoires en haute altitude et certaines missions spatiales habitées (Gemini) comportaient des expériences destinées à recueillir des poussières pour les analyser. Les origines, les dimensions et formes, les compositions de grains recueillis sont très diverses. La sonde spatiale Giotto qui sera lancée par l'Agence Spatiale européenne, en juillet 1985, devrait rencontrer la comète de Halley sur son orbite en mars 1986, avec parmi ses objectifs, l'étude des poussières.

5. Les météores ou étoiles filantes.

Nous mentionnons ici ce phénomène pour mémoire : c'est l'étincelle de lumière vue dans un ciel nocturne clair lorsqu'une petite particule de la population poussiéreuse non terrestre, située dans le milieu interplanétaire, brûle dans la haute atmosphère. Il existe des courants de tels météoroïdes qui sont les résidus de comètes faiblissantes et constituent l'apport principal au nuage général de poussière du système solaire (une comète «nouvelle» produirait jusqu'à vingt tonnes par seconde). Par collisions entre grains et fragmentation, ces courants s'affaiblissent. On observe ainsi des micrométéorites frappant les satellites artificiels, et aussi des microcratères à la surface de la lune.

6. Buts poursuivis.

En plus des buts cités plus haut, on espère encore recueillir des grains formés avant l'origine du système solaire outre ceux créés lors de la formation du soleil et des planètes à partir de quelque chose comme la «nébuleuse primitive» de Laplace (condensations de germes de compositions différentes selon la température).

La densité de grains au voisinage du soleil est faible et n'entraînerait aucune conséquence observable pour un observateur situé près d'une autre étoile. Notre soleil est représentatif d'un grand nombre d'étoiles.

III - Les enveloppes de grains solides de certaines étoiles.

Dans certaines phases de leur évolution, des étoiles peuvent se trouver environnées d'une grande quantité de grains solides : on parle alors d'enveloppes circumstellaires de grains. Alors que dans le cas d'un nuage interstellaire, la lumière diffusée est perdue pour

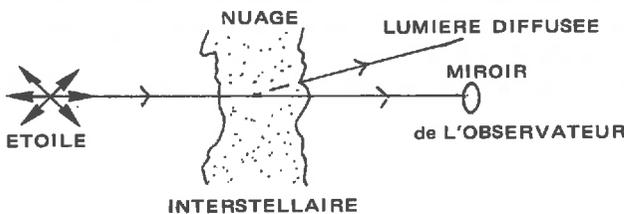


Fig. 7a - «Tout photon diffusé est perdu»

l'observateur (en fait elle contribue à la lumière galactique diffuse), une portion de la lumière diffusée est recueillie par l'observateur dans la mesure où l'enveloppe est trop petite angulairement pour être résolue avec l'appareil utilisé (fig. 7a et 7b). Cette différence fait

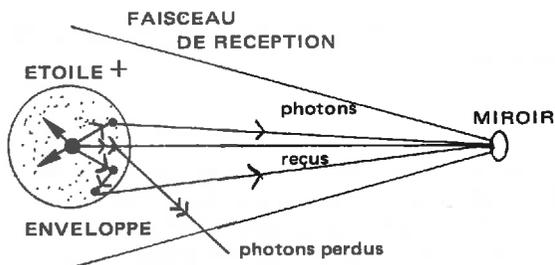


Fig. 7b - Enveloppe de grains non résolue

que la loi de rougissement interstellaire de la figure 2 ne s'applique en général pas au cas des enveloppes. De plus, comme dans le cas de la lumière zodiacale, les grains chauffés par l'étoile, à des températures comprises entre 50 et 2 000° K, émettent un rayonnement infrarouge qui culmine à des longueurs d'onde comprises

entre 1,5 et 100 μm (fig. 8). On voit que le spectre originel de l'étoile peut être complètement déformé par l'absorption et la diffusion aux courtes longueurs d'onde, compliqués dans l'infrarouge par l'émission thermique des grains.

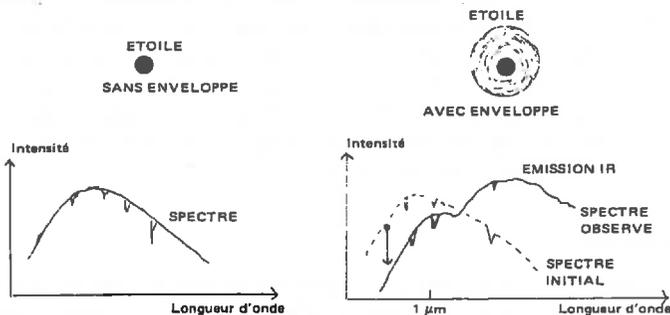


Fig. 8 - INFLUENCE D'UNE ENVELOPPE CIRCUMSTELLAIRE

↓ représente pour $\lambda(1\mu\text{m})$ l'extinction (absorption et diffusion)

1. Les étoiles froides évoluées (géantes et supergéantes rouges).

L'étude de ces enveloppes est très difficile. On pense avoir identifié certains silicates (bande à $\lambda \approx 10 \mu\text{m}$) dans les étoiles oxygénées, le graphite ou une variété amorphe de carbone dans les étoiles carbonées (1) ... Les grains semblent en moyenne plus gros que ceux du milieu interstellaire. Ici un flot continu de gaz (essentiellement moléculaire) et de grains s'échappent de ces étoiles, souvent variables pulsantes. Leur stade d'évolution est très avancé, précédant celui des naines blanches et probablement celui des nébuleuses planétaires (1).

2. Les étoiles jeunes.

Les étoiles jeunes, surtout si elles sont massives, se condensent dans ou en bordure des nuages moléculaires et des nuages de poussière géants. Pendant les premiers stades de leur évolution (moins de 100 000 ans d'âge), elles sont littéralement noyées dans un cocon de poussières qu'elles ne dissiperont que beaucoup plus tard. Ici la lumière directe de l'étoile

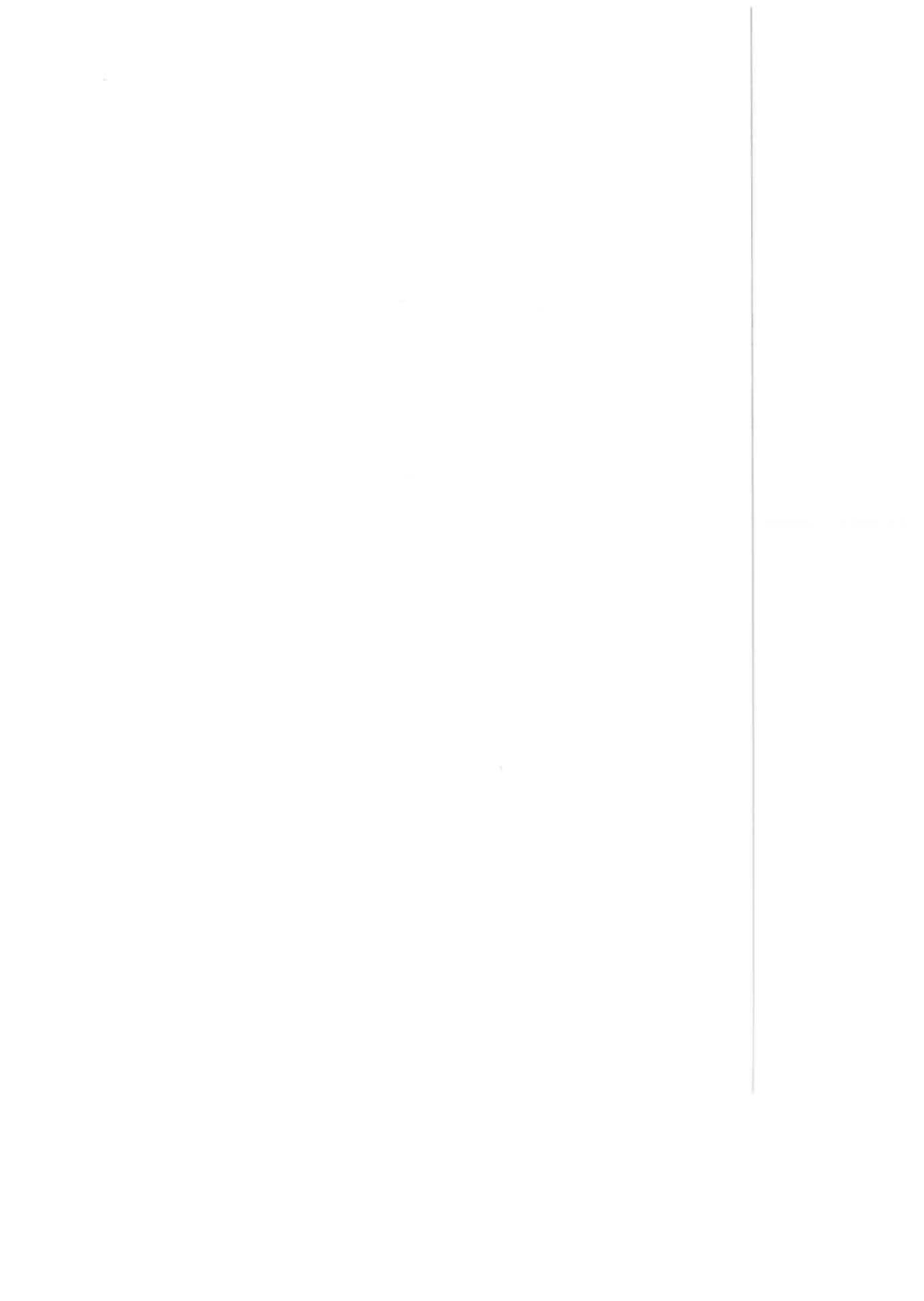
(1) Voir par exemple conférence de l'auteur, Bulletin SAL n° 21 (1982), page 9.

n'est pas détectée : on ne peut espérer observer qu'une nébulosité dans l'infrarouge entre 50 et 100 μm . Ici le rayonnement observé provient surtout des grains les plus lointains de l'étoile (donc relativement froids), chauffés par le rayonnement des grains chauds proches de l'étoile. Dans ces régions denses, la perte de magnitude à 0,55 μm (lumière visible) peut excéder 100 sur la ligne de visée vers l'étoile, ce qui explique qu'on ne puisse la voir. Sur le spectre on observe les bandes en absorption attribuées aux silicates (10 μm) et à la glace (3 μm).

IV - Conclusion d'un optimisme limité.

L'étude des grains autour des autres étoiles est en plein développement grâce aux nouvelles techniques (interférométrie par exemple) qui ajoutent leurs informations à celles obtenues par des voies plus classiques (photométrie, spectroscopie, polarimétrie). Néanmoins, les progrès resteront limités et les interprétations incertaines dans la mesure où l'on ne peut expédier des sondes spatiales sur place.

Imprimerie du Centre Régional de Documentation Pédagogique de l'Académie de LYON
47-49, rue Philippe-de-Lassalle - 69316 LYON Cédex 04
Dépôt légal : 4^e trimestre 1984 - N° de la publication : 18796/400 - Le Directeur : D. SONDAZ



Société Astronomique de Lyon

69230 — Saint-Genis-Laval

SOMMAIRE

- 1 — Les astronomes à la recherche des civilisations extraterrestres
*par Monsieur E. Davoust, le 13 mars 1982 — Observatoire de Besançon.
(fin de l'article paru dans notre précédent numéro.*

- 13 — Les grains solides autour des étoiles
par Monsieur Bergeat, professeur à l'Université Lyon 1.

PRIX : 10 F