

# La matière organique dans l'espace

François Robert\*

(directeur de recherche)

## I - LES ORIGINES DE LA DÉCOUVERTE : L'ENRICHISSEMENT EN DEUTÉRIUM DE LA TERRE

Le rapport isotopique de l'hydrogène (D/H avec D désignant le deutérium) est d'un intérêt considérable en cosmochimie et en astrophysique. Dans les théories modernes de la nucléosynthèse, les étoiles ne peuvent pas produire de deutérium ; au contraire, il est totalement converti en  $^3\text{He}$  par les premières réactions thermonucléaires au cœur des étoiles jeunes. Le soleil actuel ne contient donc aucune trace de deutérium. Le deutérium a été fabriqué dans sa quasi-totalité au cours du big-bang et son abondance permet de tester les théories de l'expansion de l'univers. La valeur du rapport D/H est donc un paramètre très contraignant dans les modèles de genèse des objets astronomiques. Par exemple, la présence du deutérium dans les planètes implique que leur hydrogène n'a jamais été recyclé dans les étoiles.

Dès 1972, Geiss et Reeves ont remarqué que les planètes géantes (Jupiter et aujourd'hui Saturne) présentaient des rapports D/H dans leur haute atmosphère (seule région accessible aux mesures spectroscopiques réalisées depuis la Terre) comparables aux rapports observés dans le milieu interstellaire. Les océans terrestres, principal réservoir d'hydrogène de la planète, sont, vis-à-vis des planètes géantes, enrichis en deutérium par un facteur  $\approx 6$  (D/H sur Terre  $\approx 1,5 \cdot 10^{-4}$  et D/H (protosolaire)  $\approx 3 \cdot 10^{-5}$ ; cf. fig. 1). Sachant que la composition chimique élémentaire de Jupiter est voisine de celle du Soleil, ce rapport isotopique de la planète géante doit représenter une bonne estimation de la composition isotopique de la nébuleuse protosolaire. C'est à partir de cette nébuleuse protosolaire que se seraient condensées les planètes du système solaire. Ce gaz, de composition solaire, contenait essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium qui sont les deux plus abondantes espèces chimiques de l'univers. Donnons quelques exemples : H/Si = 2,72. 10<sup>4</sup>, He/Si = 2,18. 10<sup>3</sup>, O/Si = 20,1 et C/Si = 12,1. L'enrichissement isotopique en deutérium de l'eau terrestre peut s'expliquer par un échange, à basse température, entre la vapeur d'eau et d'hydrogène dans la nébuleuse protosolaire :

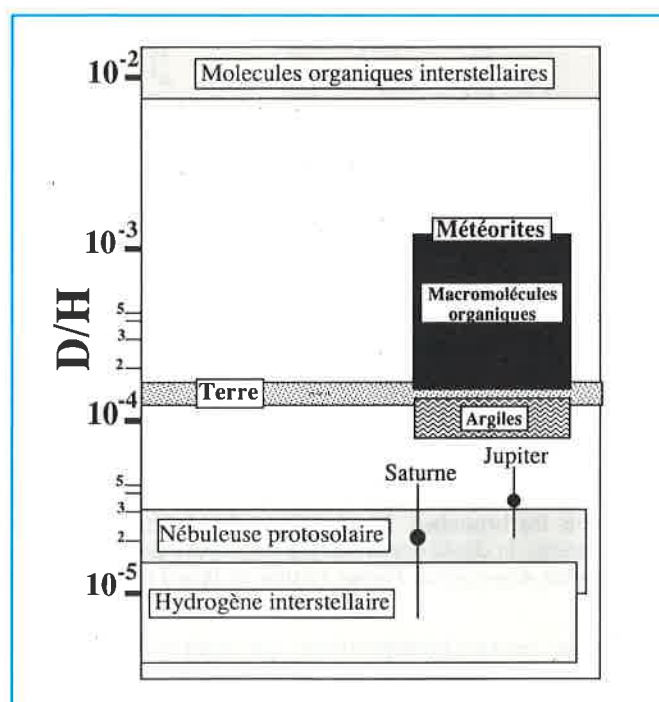
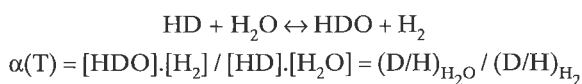


Figure 1. - Distribution du rapport isotopique de l'hydrogène (D/H) dans le système solaire. Contrairement aux planètes gazeuses, on remarque l'enrichissement en deutérium de la Terre et des constituants organiques des météorites vis-à-vis de l'hydrogène primordial (nébuleuse protosolaire).

La constante  $\alpha(T)$  - que l'on appelle souvent le "coefficient de fractionnement isotopique" - ne dépend que de la température. A 240 K, cette constante d'équilibre est voisine de 6. Avec un rapport D/H dans l'hydrogène primordial comparable à celui préservé dans l'atmosphère de Jupiter (D/H  $\approx 3 \cdot 10^{-5}$ ), il faut donc que ces deux espèces aient cohabité vers 200 K dans la nébuleuse durant un temps suffisamment long pour que cet équilibre soit atteint. Toutefois cette réaction est très lente et la durée de vie de la nébuleuse ne peut excéder 10<sup>7</sup> ans. Les limites temporelles de ce modèle ont été examinées : il n'est pas aujourd'hui réaliste

\* Muséum National d'Histoire Naturelle, Laboratoire de minéralogie, URA CNRS 736, 61, rue Buffon, 75005 Paris. Tél. : (1) 40.79.35.42 (télécopie : (1) 40.79.35.24).

Cette conférence a été présentée au cours du Colloque "Chimie-Espace" organisé par la Fondation de la Maison de la Chimie à Paris.

de supposer qu'un tel enrichissement isotopique puisse dépasser de beaucoup ce facteur 6. Le modèle de Geiss et Reeves reste donc plausible, mais ce facteur 6 doit être considéré comme une limite supérieure, au-delà de laquelle l'échange isotopique ne peut plus se réaliser.

Après son équilibration avec l'hydrogène moléculaire, cette eau aurait été soustraite du gaz, via sa condensation sous forme de glace ou via sa réaction avec des minéraux anhydres. Ces minéraux constituent le réservoir potentiel des océans terrestres et sont observés couramment sous la forme d'argiles dans les météorites carbonées. Durant le dégazage de l'atmosphère terrestre et la mise en place des océans, le rapport isotopique de l'hydrogène n'a pas pu être grandement modifié ; il existe de nombreuses observations expérimentales et théoriques qui renforcent les modèles où le rapport isotopique des océans terrestres est considéré comme une bonne image de ce qu'il était il y a 4,55 milliards d'années, c'est-à-dire lors de la formation de la planète.

Afin de déterminer si la composition isotopique de la Terre devait être considérée comme une exception dans le système planétaire, l'analyse de l'eau chimiquement liée aux minéraux des météorites était un test déterminant. Ces analyses furent entreprises par les géochimistes à partir de 1975.

## II - DES MOLÉCULES ORGANIQUES INTERSTELLAIRES QUI POMPENT LE DEUTÉRIUM

Avant d'examiner les travaux concernant le système planétaire, nous résumons, dans ce chapitre, les étapes d'une découverte importante dans les nuages de gaz et de poussières de la Galaxie que l'on désigne sous le terme de nuages moléculaires denses. Le problème de la lenteur des réactions d'échanges isotopiques va trouver, à partir de 1973, un nouveau développement grâce à l'observation astrophysique de molécules organiques interstellaires. Nous entendrons, dans ce qui suit, par "molécules orga-

### Principales molécules organiques détectées dans le milieu interstellaire

Nitriles, dérivés de l'acétylène et molécules voisines :

PN	HC <sub>3</sub> N	CH <sub>3</sub> CN	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> CN
HCN	HC <sub>5</sub> N	CH <sub>3</sub> C <sub>2</sub> CN	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> CN
HNC	HC <sub>7</sub> N	CH <sub>3</sub> C <sub>4</sub> CN	HNCO
HCCH*	HC <sub>9</sub> N	CH <sub>3</sub> CCH	HNCS
CCCO	HC <sub>11</sub> N	CH <sub>3</sub> C <sub>4</sub> H	CCCS

Aldéhydes, alcools, esters et amides :

H <sub>2</sub> CO	CH <sub>3</sub> OH	HCOCH <sub>3</sub>	HCONH <sub>2</sub>
H <sub>2</sub> CS	CH <sub>3</sub> SH	HCOOH	H <sub>2</sub> CNH
H <sub>2</sub> CCO	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH	HCOOCH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> NCN
HCOCH <sub>3</sub>	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> O ?	HCO <sub>2</sub> H <sub>2</sub> ?	CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub>

Molécules cycliques :

C <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	Ions :	HN <sub>2</sub> <sup>+</sup>
SiC <sub>2</sub>	CH <sup>+</sup>	HOCO <sup>+</sup>
	H <sub>2</sub> D <sup>+</sup> ?	HCNH <sup>+</sup>
	H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> ?	HCS <sup>+</sup>
	HCO <sup>+</sup>	SO <sup>+</sup>
	HOC <sup>+</sup> ?	

Radicaux :

CH	C <sub>3</sub> H	CN	CCS
OH	C <sub>4</sub> H	C <sub>3</sub> N	SO
HCO	C <sub>5</sub> H	NO	
CCH	C <sub>6</sub> H	NS	

niques" toutes les molécules qui procèdent de la chimie du carbone. Jefferts *et al.* constatèrent des enrichissements en deutérium énormes dans la molécule organique HCN qui avait été décelée quelques années auparavant dans le nuage moléculaire dense d'Orion. Cet enrichissement est de l'ordre de 1 000 par rapport à l'hydrogène du milieu interstellaire moyen :

$$\alpha = (D/H)_{\text{HCN}} / (D/H)_{\text{Interstellaire}} = 1\ 000$$

Rapidement d'autres molécules organiques ont été repérées et toutes présentent des enrichissements isotopiques,  $\alpha$  variant d'un facteur 10<sup>2</sup> à 10<sup>4</sup>. Aujourd'hui, plus de cinquante de ces molécules organiques sont recensées dans plusieurs nuages moléculaires de la Galaxie (*cf. encadré*). Ces milieux sont le siège d'une chimie très inhabituelle sur la Terre et, de ce fait, certaines de ces molécules n'ont jamais pu être synthétisées en laboratoire. Leur spectre n'est donc pas mesuré en laboratoire. Il a fallu développer des modèles théoriques afin d'attribuer à des molécules organiques précises, les raies spectroscopiques observées dans le milieu interstellaire.

Les remarques que nous avons faites dans la présente introduction sur la nucléosynthèse du deutérium sont essentielles pour comprendre les enrichissements considérables en deutérium que l'on observe dans ces nuages moléculaires denses. En effet, une origine stellaire étant exclue pour le deutérium, la concentration de cet élément dans les molécules organiques se réalise impérativement via des réactions chimiques de transfert isotopique. Dès 1973, Watson décrit le mécanisme qui concentre ce deutérium dans les molécules organiques : ce sont les réactions ion-molécule à basse température. Contrairement aux réactions mettant en jeu des espèces neutres, ces réactions n'ont pas de barrière de potentiel. Elles sont rapides, même aux basses températures régnant dans ces nuages (-200 °C). Voici l'exemple le plus classique de ces réactions d'échange du deutérium :



Avec  $\Delta E/k \approx 450$  K, on juge facilement de l'ampleur du fractionnement isotopique que l'on peut atteindre au-dessous de 100 K. Plusieurs auteurs ont réalisé des calculs très détaillés, mettant en jeu plus d'un milliard de ces réactions, et ont conclu qu'il fallait environ 10<sup>5</sup> à 10<sup>6</sup> ans pour parvenir aux enrichissements observés dans les nuages interstellaires. C'est une durée tout à fait compatible avec les temps de vie moyens estimés pour ces nuages. Ce modèle est donc parfaitement satisfaisant et fait l'objet aujourd'hui d'un consensus scientifique.

## III - LES PREMIÈRES ANALYSES DES MÉTÉORITES. L'ANALOGIE AVEC LES MOLÉCULES INTERSTELLAIRES

Les météorites de pierre se divisent en plusieurs groupes dont les chondrites ordinaires et les carbonées. Parmi ces deux classes, il existe des représentants très primitifs de ces objets, c'est-à-dire des roches n'ayant subi (presque) aucune différenciation chimique depuis leur formation : elles n'ont jamais été fondues depuis l'accrétion planétaire. Les exemples les plus classiques de ces "fossiles" sont

- 1) les chondrites ordinaires de type LL 3 (LL désigne un type d'association minéralogique qui se caractérise par son état d'oxydo-réduction et 3 est le degré de l'intensité d'un réchauffement secondaire),
- 2) les chondrites carbonées de type CI, riches en argiles, en carbone et en gaz rares, qui, contrairement aux LL3, n'ont jamais subi le moindre métamorphisme secondaire.

Les compositions chimiques des météorites carbonées représentent un échantillonnage des abondances chimiques élémentaires dans la nébuleuse primitive. Ces abondances météoritiques sont parfaitement analogues aux abondances mesurées dans le Soleil. Les réactions chimiques ne modifiant que très peu les abondances isotopiques, ces météorites primitives ont nécessairement les compositions isotopiques de la nébuleuse.

De telles compositions chimiques sont tout à fait exceptionnelles pour un échantillon naturel. Il n'existe sur Terre aucune roche qui renferme des compositions élémentaires voisines de celles du Soleil. En effet, depuis la formation de la Terre, les mécanismes majeurs de la différenciation planétaire ont irréversiblement redistribué les éléments chimiques. Par exemple, au cours de la formation du noyau de la Terre, les éléments sidérophiles - ceux qui ont une forte affinité pour le bain-métallique - ont été en partie extraits du manteau silicaté de la Terre et concentrés dans le noyau de fer-nickel. À l'inverse, depuis leur formation, les météorites dites "chondritiques" présentent un parfait état de conservation de leurs phases minérales comme de leurs compositions chimiques. Dans le cas des chondrites carbonées - qui sont une catégorie à part des chondrites ordinaires -, leur ressemblance chimique avec le Soleil indique que la nébuleuse gazeuse s'est totalement condensée sous la forme de ces roches. On peut donc supposer que les grains solides qui pouvaient exister dans le gaz protosolaire ont, eux aussi, été enfermés dans les chondrites carbonées en formation. Cette hypothèse a été largement confirmée depuis une dizaine d'années par des études de compositions isotopiques des grains réfractaires qui sont tous interprétés comme des constituants présolaires. Les premières déterminations des rapports D/H ont donc été réalisées sur ces chondrites carbonées et LL3.

En 1979, un enrichissement isotopique considérable ( $D/H \approx 8.10^4$ ) en deutérium est détecté dans la météorite Chainpur (de type LL3). À cette époque, les très faibles concentrations en composés organiques mesurées dans cette roche ne permettent pas d'établir une relation entre les valeurs élevées du rapport D/H et la présence éventuelle de molécules interstellaires. Un an plus tard, le groupe anglais de Pillinger confirme et étend cette observation en analysant d'autres météorites appartenant à cette même classe, mais sans qu'il soit réellement possible de déterminer l'origine de l'effet. Le groupe de UCLA remarque qu'un traitement à l'ozone des météorites carbonées provoque une diminution du rapport D/H des échantillons : il conclut que c'est l'oxydation de la matière organique (sous forme de  $CO_2$  et  $H_2O$ ) qui entraîne le départ du deutérium en laissant intact l'hydrogène des argiles (sous forme de groupes hydroxyles). Ces mesures ne sont pas convaincantes car, au cours de l'oxydation avec l'ozone, la température de surface de l'échantillon s'élève énormément et les argiles sont dégazées.

La même année (en 1980), deux observations vont s'avérer cruciales :

a) Après une attaque HF-HCl de ces météorites carbonées, un résidu riche en carbone, insoluble, est très enrichi en deutérium ( $D/H \approx 3.10^4$  à  $5.10^4$ )

b) Conjointement, le profil d'extraction de l'hydrogène de ce résidu est bimodal en fonction de la température, ce qui caractérise l'hydrogène d'origine organique. L'hydrogène organique est donc enrichi en deutérium. Cette dernière observation qui établit clairement la liaison entre l'organosynthèse interstellaire et les molécules organiques dans les météorites, va être largement confirmée par plusieurs équipes.

La structure de cette matière organique riche en deutérium a été peu étudiée dans la littérature : c'est un assemblage de macromolécules aromatiques ( $C/H \approx 1,5$ ), insolubles dans les acides et les solvants organiques habituels, et qui ne représentent aucune séquence répétitive. Ces macromolécules sont extraites des roches par une dissolution HF-HCl des silicates. Elles se concen-

trement avec les oxydes et les sulfures, dans les résidus de l'attaque acide, et représentent 85-90 % du carbone organique total des météorites carbonées qui contiennent aussi d'autres composés organiques solubles : les acides aminés, les acides gras et les hydrocarbures. Ces derniers sont souvent considérés comme des produits secondaires résultant d'un hydrothermalisme de basse température ( $25^\circ C$ ) à la surface du corps parent des météorites carbonées ; cet hydrothermalisme serait à l'origine des argiles qui renferment 90 % de l'hydrogène total (sous forme -OH) d'une météorite carbonée. Plusieurs auteurs ont imaginé que ces molécules organiques simples étaient les produits de l'hydrolyse des macromolécules. Néanmoins ce modèle n'est toujours pas étayé par des observations expérimentales claires et l'hydrolyse de ces macromolécules n'a pas été étudiée en laboratoire.

Les études se sont ensuite recentrées sur les météorites de types LL3 afin d'interpréter leurs enrichissements isotopiques qui sont encore plus considérables que ceux mesurés dans les macromolécules insolubles, extraites des météorites carbonées.

#### IV. L'UBIQUITÉ DES MOLÉCULES RICHES EN DEUTÉRIUM

Deux problèmes se sont rapidement posés :

1) Le rapport isotopique des macromolécules est plus petit que celui des molécules organiques interstellaires ( $D/H \approx 8.10^4$  et  $2.10^2$ , respectivement). Doit-on en conclure qu'il existe dans les météorites, des composés beaucoup plus riches en deutérium que nous ne le mesurons ? Leur hydrogène aurait été dilué par de l'hydrogène isotopiquement "normal", soit via la contamination des résidus durant les traitements chimiques, soit via sa faible concentration dans une matière organique isotopiquement solaire. Dans ces deux cas, le mélange d'un constituant isotopiquement terrestre, pauvre en deutérium, avec un constituant interstellaire, très enrichi en deutérium, produirait les compositions isotopiques intermédiaires mesurées dans les résidus d'attaque acide (voir *fig. 1*). Mais, en d'autres termes, le rapport isotopique mesuré dans les météorites est-il fiable ?

2) Même en admettant que les rapports isotopiques mesurés représentent une bonne estimation de la composition initiale des macromolécules, il est difficile d'envisager qu'un tel enrichissement isotopique ait pu se dérouler dans la nébuleuse protosolaire. En effet, la nébuleuse est un gaz dense, opaque aux UV, beaucoup plus dense que les nuages moléculaires. Ces UV sont à l'origine de la production des ions dans les réactions ion-molécule et, en leur absence, les fractionnements isotopiques sont inhibés. Au contraire, il faut admettre que la nébuleuse solaire a hérité de molécules synthétisées avant la formation du système planétaire, dans des conditions comparables à celles observées dans les nuages moléculaires denses.

La recherche des réponses à ces deux questions a constitué l'activité centrale de notre groupe. Ces deux questions ont été résolues par l'étude de systèmes chimiques différents mais toujours en utilisant la propriétés et la répartition dans le système solaire des réservoirs isotopiques. Nous détaillons ci-dessous ces réponses.

##### Question 1

Une étude très fine du profil de dégazage de l'hydrogène des météorites LL3 a démontré qu'il n'existe pas de molécules organiques ultrariches en deutérium, mélangées à de l'hydrogène isotopiquement normal (*fig. 2*). Ces analyses sont réalisées à partir d'échantillons non traités par les acides, afin d'éliminer toute contamination de l'hydrogène au cours des traitements chimiques. Ce problème de la contamination chimique est examiné plus loin. Ces profils (*fig. 2*) sont établis à partir d'une série discontinue de mesures : toutes les 30 secondes, la concentration et

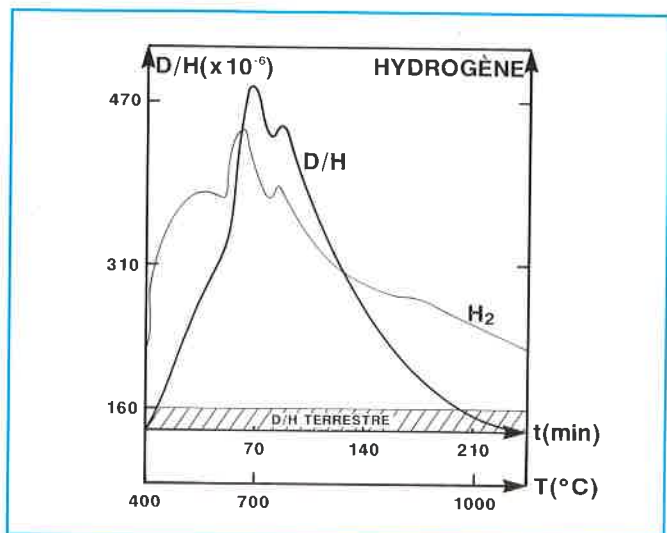


Figure 2. - Profil de pyrolyse, en concentration et en rapport isotopique, des composants hydrogénés extraits d'une météorite riche en deutérium (LL3, cf. § IV). On remarque le dégazage bimodal du constituant riche en deutérium, dégazage qui se superpose au composant dont la composition isotopique est "normale" (c'est-à-dire semblable aux constituants terrestres).

la composition isotopique de l'hydrogène qui est extrait de la roche, sont mesurées. L'augmentation de la température de l'échantillon est une fonction du temps et nous avons donc rapporté, sur le même axe, la durée de l'expérience et la température de la roche.

Ce profil de concentration, bimodal en fonction de la température et/ou du temps, est identique au profil mesuré sur les résidus d'attaque acide des météorites carbonées. Sur la fig. 2, la composition isotopique de l'hydrogène (courbe notée D/H sur la figure, exprimée en valeurs du rapport D/H) et sa concentration (courbe notée H<sub>2</sub>, exprimée en unités arbitraires) sont rapportées en fonction :

- i) de la température de pyrolyse (exprimée en degrés C) de la météorite,
- ii) de la durée de l'expérience (exprimée en minutes).

La zone hachurée (voir fig. 2) représente le domaine de variations des compositions isotopiques dans les roches terrestres les plus communes. L'évolution de la composition isotopique en fonction du temps est toujours semblable pour toutes les météorites étudiées : de l'hydrogène de type terrestre est recueilli au début et à la fin de la pyrolyse et un second composant hydrogène, enrichi en deutérium, vient se superposer à l'extraction du composant "normal". On distingue bien le profil bimodal (en concentration et en rapport isotopique) qui caractérise les macromolécules organiques. Ce profil permet de préciser la concentration et le rapport isotopique de l'hydrogène riche en deutérium qui se mélange avec un constituant isotopiquement terrestre. Il est possible en effet de soustraire point par point la contribution de l'hydrogène "normal" dont la fonction de dégazage est calculée à partir des régions où le D/H reste ou retourne dans le domaine terrestre. L'hôte du deutérium dans les carbonées, les macromolécules insolubles, est donc très semblable à celui piégé dans les météorites de type LL3. Par cette méthode de soustraction, son rapport D/H dans les LL3 a été évalué avec précision :  $1,2 \cdot 10^{-3}$ .

La source de l'hydrogène, dont le rapport isotopique rappelle les compositions observées sur Terre (fig. 1), est vraisemblablement l'argile. Les macromolécules sont intimement mélangées à ces argiles mais leurs relations exactes n'ont pas été étudiées par les

techniques classiques de micro-analyse car le carbone organique est toujours difficilement dosable conjointement aux éléments chimiques majeurs organisés en minéraux. En particulier, plusieurs auteurs voudraient voir dans ces argiles des catalyseurs possibles des réactions de polymérisation. Cette idée reste en suspens...

Les expériences de pyrolyse, illustrées par la fig. 2, ont été renouvelées sur des échantillons de météorites LL3 qui renferment toujours les plus grands enrichissements en deutérium. Jamais ces météorites n'ont révélé la présence d'un constituant dont le rapport isotopique excède  $1,2 \cdot 10^3$ . Par conséquent, il n'y a aucune trace de rapports isotopiques typiquement interstellaires dans les météorites.

L'évaluation de la contamination des acides sur la composition isotopique des macromolécules a été réalisée très précisément en renouvelant la préparation des résidus avec plusieurs acides marqués industriellement en deutérium. Le comportement théorique de ces expériences est connu depuis longtemps et a permis de conclure que 1) la contamination est négligeable ( $\leq 7\%$ ) et 2) il n'y a aucune indication d'un composé ultrariche en deutérium - de type interstellaire - présent à l'état de trace.

La différence d'un ordre de grandeur entre la composition isotopique des molécules organiques interstellaires ( $D/H \geq 2 \cdot 10^{-2}$ ) et des macromolécules organiques météoritiques ( $D/H \leq 1,2 \cdot 10^{-3}$ ) est donc bien réelle. La conclusion s'impose : si ces molécules interstellaires ont existé au début de la formation du système solaire, elles n'ont pas subsisté à la formation planétaire. Par contre, la synthèse des macromolécules organiques ne résulte pas de la polymérisation de ces molécules simples de type interstellaire. En effet, les fractionnements isotopiques qui accompagnent la polymérisation sont bien connus et les compositions isotopiques des précurseurs interstellaires auraient été préservées. Il doit donc exister des voies de synthèse qui conduisent directement à cette polymérisation mais à partir de précurseurs beaucoup moins enrichis en deutérium que ceux observés dans les nuages moléculaires denses. Ces réactions spécifiques ne sont, pour l'instant, pas connues.

Tous ces travaux sur le rapport isotopique de l'hydrogène ont donc permis de répondre à la première question.

## Question 2

La question de l'origine solaire ou non-solaire de ces macromolécules a été réglée par l'étude des trois isotopes de l'oxygène organique. Cette détermination est particulièrement décisive : tous les corps du système solaire, issus de la même région de la nébuleuse primitive, se placent sur les droites de pente 1/2 dans un diagramme des variations des compositions isotopiques des trois isotopes de l'oxygène, variations exprimées en valeurs relatives. Sur la figure 3, les variations des rapports isotopiques de l'oxygène ( $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$  et  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) sont rapportées en valeurs relatives (unités  $\delta$  sur la figure), exprimées en pour mille, par rapport aux compositions isotopiques des océans terrestres prises arbitrairement comme références (elles sont à l'origine des axes). Chacune de ces droites de pente 1/2 représente le lieu géométrique d'une abondance constante en oxygène 16. Hormis la nucléosynthèse stellaire, il est admis qu'aucun mécanisme physico-chimique ne peut faire varier cette abondance dans différents composés issus d'un réservoir isotopiquement homogène. Par exemple sur Terre, les océans, l'atmosphère, les roches et les plantes se placent tous sur une corrélation unique de pente 1/2. C'est la loi du fractionnement de masse. Les météorites, suivant leur classe, définissent plusieurs corrélations (cf. Orgueil et les météorites carbonées) reflétant ainsi l'inhomogénéité en oxygène 16 de la nébuleuse primitive. Certains minéraux de la météorite d'Allende définissent une corrélation de pente 1 qui serait due à l'injection dans la nébuleuse, peu de temps avant la forma-

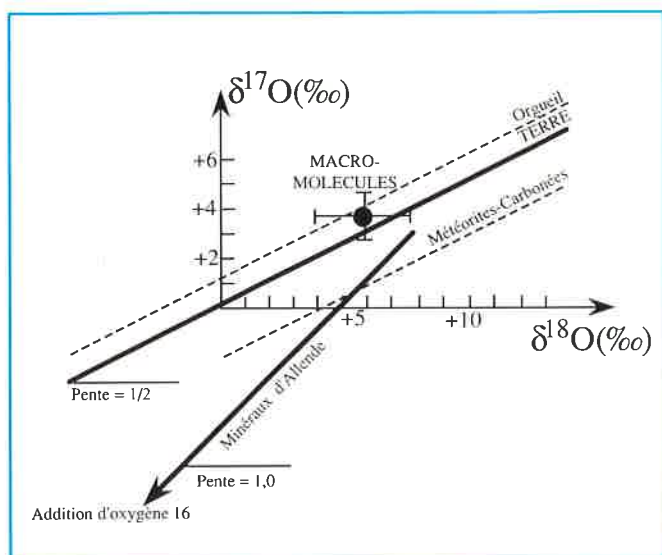


Figure 3. - Rapport isotopique  $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$  en fonction de  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  (exprimés en variations relatives : unités  $\delta$ ). Contrairement aux grandes variations observées dans la Galaxie, la composition des macromolécules extraites des météorites est indistinguable de celle de la majorité des objets du système solaire. Ces constituants organiques ont donc été synthétisés dans le gaz solaire qui est à l'origine du système planétaire (cf. § IV).

tion des planètes, d'oxygène très enrichi en isotope 16, synthétisé lors de l'explosion d'une supernovae. Le milieu interstellaire étant très inhomogène chimiquement, ces inhomogénéités se sont donc préservées dans la nébuleuse protosolaire.

L'oxygène organique a donc été extrait de la météorite d'Orgueil (une chondrite carbonée) et ses deux compositions isotopiques en oxygène ont été déterminées. De plus, les pollutions possibles par les acides ont été estimées par les mêmes techniques utilisées pour l'hydrogène. Le résultat global de ces déterminations est rapporté sur la figure 3 : l'oxygène organique a une composition isotopique identique à la majorité des objets mesurés jusqu'à présent dans le système solaire. Ce test est sans ambiguïté : les macromolécules, riches en deutérium, ont été synthétisées dans la nébuleuse solaire à partir du même gaz où l'ont été les planètes. Il nous faut donc admettre que le système solaire, à sa formation, est passé par un stade semblable à ce qui est observé dans les nuages moléculaires denses. Des macromolécules y ont été synthétisées et sont encore préservées dans les météorites les plus primitives. Nous avons donc répondu à la seconde question.

L'ensemble des données sur le rapport isotopique D/H dans le système solaire est résumé dans la figure 1. Sur cette figure on distingue deux grandes régions : la région qui correspond à des rapports isotopiques supérieurs à  $3 \cdot 10^{-2}$  et inférieurs à  $3 \cdot 10^{-5}$ . Il s'agit, respectivement, des régions qui caractérisent les compositions isotopiques des molécules organiques interstellaires et celle de la nébuleuse protosolaire. Notons que la composition isotopique de l'hydrogène interstellaire est aujourd'hui sensiblement plus faible que  $3 \cdot 10^{-5}$ . Ce petit écart est attribué à la consommation du deutérium par les étoiles qui n'a cessé depuis 4,55 milliards d'années, date de la formation du système solaire. Remarquons aussi que les planètes géantes (Jupiter et Saturne), qui n'ont pas perdu leur atmosphère primitive, conservent un rapport isotopique semblable à celui du milieu interstellaire moyen. Dans le grand rectangle, nous avons rapporté l'ensemble des variations isotopiques mesurées dans les argiles et dans les macromolécules des météorites. Les molécules interstellaires fragiles, très enrichies en deutérium, ne sont pas présentes dans

les météorites. Apparemment elles n'ont pas survécu à la formation planétaire. Elles ne sont pas non plus à l'origine des macromolécules car sinon, à cette échelle, les macromolécules devraient présenter des compositions indistinguables des molécules organiques interstellaires. Ensuite, si l'on dresse un bilan des rapports D/H dans le système solaire, on observe la position intermédiaire de la Terre : elle est systématiquement plus riche en deutérium que les argiles des météorites et systématiquement plus pauvre que les macromolécules. Une nouvelle conclusion semble s'imposer : la Terre primitive a hérité de ces molécules organiques qui ont enrichi l'exosphère de la Terre en deutérium.

## V. LES MACROMOLÉCULES DES MÉTÉORITES DANS LE MILIEU INTERSTELLAIRE ?

Tout ce travail pose le problème de la présence de telles macromolécules dans le milieu interstellaire. En fait, plusieurs auteurs ont détecté, dès le début des années 80, des structures organiques aromatiques dans le milieu interstellaire. Mais ces molécules n'ont pas été repérées dans les météorites. En 1986, un groupe d'astrophysiciens a obtenu un spectre dans le domaine de l'infrarouge, révélant la présence de molécules aliphatiques simples dans le milieu interstellaire. Plus précisément, il s'agit du milieu interstellaire diffus qui s'observe dans la direction du centre de la Galaxie (vers une source nommée IRS7). Toutefois, plusieurs tentatives pour reproduire ce spec-

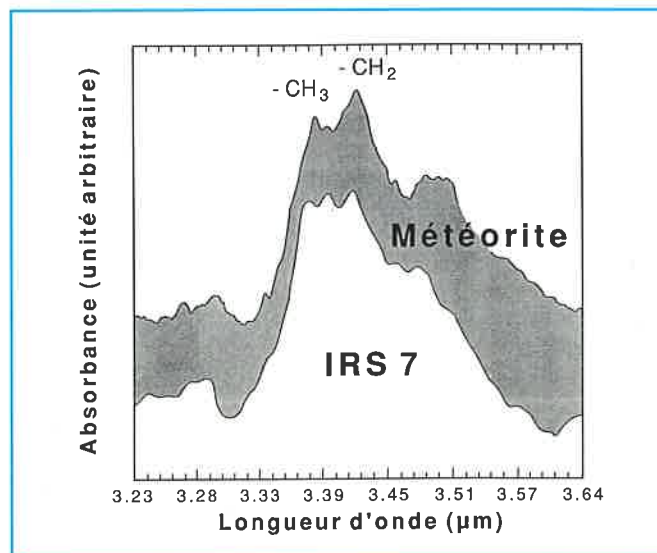


Figure 4. - Le spectre infrarouge des macromolécules organiques extraites des météorites reproduit presque parfaitement l'observation réalisée dans la direction du centre de la Galaxie (noté IRS 7). Ces spectres caractérisent les radicaux  $-\text{CH}_2$  et  $-\text{CH}_3$  des chaînes carbonées aliphatiques. Des molécules organiques interstellaires auraient donc été préservées intactes dans les météorites carbonées (cf. § V).

\* La structure précise des macromolécules météoritiques n'a, malheureusement, pas été étudiée en laboratoire et seules leurs compositions élémentaires sont connues :  $\text{C}/\text{H} = 1,8 \pm 0,3$ ,  $\text{C}/\text{N} = 12 \pm 3$  et  $\text{C}/\text{O} = 30 \pm 10$ . Les barres d'erreur sur ces valeurs - qui sont très supérieures à la précision sur les mesures - représentent leur domaine de variation. Ces variations attestent de la grande hétérogénéité du matériel organique dans les diverses classes de météorites.

tre en laboratoire, à partir de molécules industrielles ou naturelles, se sont révélées infructueuses.

Nous avons comparé ce spectre interstellaire avec un spectre obtenu en laboratoire à partir de deux séries de macromolécules extraites de deux météorites carbonées différentes (fig. 4). Ces matières organiques météoritiques\* reproduisent presque parfaitement l'observation réalisée dans le milieu interstellaire. Ce spectre caractérise les radicaux  $-CH_2$  et  $-CH_3$  de ponts aliphatiques qui existent entre les cycles. En fait, les macromolécules sont très condensées, et une analyse chimique globale montre qu'il y a, en moyenne, 8 cycles saturés pour 2 chaînes aliphatiques contenant environ 3  $-CH_2$ . Ces cycles aromatiques ne produisent aucune signature spectrale car les raies correspondantes aux aliphatiques sont beaucoup plus intenses.

Une comparaison détaillée avec les spectres fournis par des macromolécules d'origine biologique (terrestre) montre clairement le caractère unique de la matière organique du milieu interstellaire. La matière organique d'origine biologique se dégrade sur le sol ou le fond des océans mais une petite partie est enfouie sous la forme de kérogènes. Ces kérogènes vont évoluer en fonction du degré d'enfouissement de la roche mère et vont donc subir une évolution thermique qui dégrade leurs structures et modifie leurs compositions chimiques. Les spectres infrarouges de ces kérogènes ont été analysés autour de  $3,3 \mu m$  afin de mieux juger des différences entre les signatures spectrales de ces macromolécules terrestres et celles du milieu interstellaire. Il est particulièrement frappant de constater que les spectres météoritiques et interstellaires sont uniques avec des rapports d'intensité des radicaux  $CH_2$  et  $-CH_3$  d'environ 1, ce qui corres-

pond à un rapport  $-CH_2/-CH_3 \sim 0,66$  (fig. 4). Des expériences de pyrolyse ont montré que ce rapport est très sensible à la température : chauffées à  $200^\circ C$ , les macromolécules perdent une grande quantité d'hydrogène et la quasi-totalité de leur azote. Passé  $200^\circ C$ , leur spectre ne présente plus une ressemblance aussi marquée avec le spectre interstellaire. La fragilité thermique des chaînes aliphatiques est probablement à relier avec la présence d'une liaison azote entre le carbone de la chaîne et celui du cycle. L'azote, très abondant dans ces macromolécules météoritiques, serait donc à l'origine de la ressemblance avec la matière interstellaire.

A partir des spectres de laboratoire, nous avons estimé que 50 % du carbone total du milieu interstellaire est sous la forme de ces macromolécules. Il n'y a donc rien d'étonnant à retrouver ces structures organiques dans le nuage qui a donné naissance au système solaire. Il est plus étonnant de les retrouver intactes dans les météorites.

L'analogie entre les spectres météoritiques et interstellaires n'a pu être réalisée qu'autour de  $3,5 \mu m$ . Au-delà de  $6 \mu m$ , d'autres groupements organiques apparaissent dans le spectre météoritique établi au laboratoire. Malheureusement, il n'est pas possible d'examiner, à partir des mesures réalisées depuis la Terre, ces régions du spectre interstellaire. Les autres groupements organiques, qui apparaissent au-delà de  $6 \mu m$  dans le spectre météoritique, n'ont donc pas pu être comparés avec ceux des molécules interstellaires. Ce sera chose faite en 1993 avec le satellite ISO qui établira, dans la direction d'IRS7, un spectre infrarouge complet entre 1 et  $15 \mu m$ . Nous en aurons alors le cœur net. ■

## STRASBOURG, CAPITALE EUROPÉENNE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Les 22-23 avril 1993, Strasbourg accueille la 2e session plénière du Comité national de la recherche scientifique sur le thème "Perspectives européennes de la recherche scientifique". Près d'un millier de scientifiques européens sont attendus dans la capitale de la communauté. Les débats seront animés par 63 scientifiques internationaux représentant 10 pays européens.

La recherche scientifique est un atout pour l'Europe et, l'Europe, un atout pour la recherche. Encore faut-il que cette Europe soit mise en place en tenant compte des avis et propositions des scientifiques qui en sont les acteurs et qu'elle réponde aux grands problèmes de société qui se posent aujourd'hui.

La conjoncture actuelle, liée à l'adoption du traité de Maastricht et à la préparation du 4e programme cadre, a amené le CNRS, premier organisme de recherche fondamentale en Europe, à organiser cette session avec un double objectif :

- mener une réflexion rigoureuse et de qualité sur les grands sujets d'actualité,
- aboutir à des propositions concrètes et dynamisantes pour une Europe scientifique toujours plus efficace.

Six tables rondes sont au programme :

- 1 - Modes de concertation et d'intégration de la recherche en Europe (préciser ce qui peut singulariser une recherche européenne, proposer des procédures de concertation et d'intégration, évaluer l'importance du contexte et le poids des spécificités françaises).
- 2 - Laboratoires et réseaux en Europe (composante européenne dans un organisme de recherche national, les relations avec le monde industriel, problèmes humains et juridiques, un cas vécu de création d'un laboratoire européen associé).
- 3 - Communication, vie associative, publications, langues (envisagées sous l'angle espace européen, le cas des sociétés savantes, la circulation de l'information).
- 4 - Évaluation de la recherche en Europe (évaluation des coopérations et de la recherche).
- 5 - L'Europe des hommes : carrière et mobilité (statut du jeune chercheur, statut et carrière des chercheurs, lieux d'échange).
- 6 - Les relations internationales de l'Europe avec le monde (définir les propriétés thématiques, évolution des relations,

impact économique, moyens à mettre en œuvre).

Ces six tables rondes sont organisées sur deux demi-journées et seront suivies par des propositions concrètes présentées par Alain Costes, directeur du Laboratoire d'automatique et d'analyse des systèmes (CNRS-Toulouse), rapporteur général de la session.

Rappelons que la 1re session plénière "Carrefour des sciences" s'est tenue les 12 et 13 février 1990 à l'Unesco, à Paris, et était consacrée à l'interdisciplinarité.

Le Comité national de la recherche scientifique du CNRS se compose de 40 sections de 21 membres renouvelés tous les 4 ans dont le rôle principal est d'évaluer les programmes de recherche, de faire des propositions sur la création, la suppression et le renouvellement des laboratoires ainsi que sur la promotion des chercheurs ; à cette tâche d'évaluation s'ajoute une mission de réflexion et de prospective.

Le CNRS participe à la vie scientifique internationale :

- par le biais des grands équipements européens (CERN, ESO, ESA),