

## **Les preuves que la vie sur Terre provient du Cosmos, des comètes, des astéroïdes, des étoiles et de la Voie lactée.**

- 1 - La nature et la composition des queues des comètes
- 2 - Les Molécules des Comètes
- 3 - Composition chimique de la comète Hale-Bopp
- 4 - Découverte de deux nouvelles molécules dans la Voie Lactée
- 5 - Des molécules indispensables à la vie produites par une étoile super géante
- 6 - Des acides aminés d'origine extra-terrestre découverts sur une comète
- 7 - Des acides aminés découverts dans des échantillons de comète
- 8 - Des morceaux d'ADN dans les météorites
- 9 - Du sucre détecté autour d'étoiles en formation !
- 10 - L'adénine du premier ADN : une origine extraterrestre ?
- 11 - Comètes: des corps "chevelus" de mieux en mieux compris
- 12 - Une molécule inattendue découverte dans l'espace interstellaire

## La vie provient-elle de l'espace?

La vie sur Terre semble être apparue grâce à la présence d'eau, de molécules organiques construites à partir d'atomes de carbone et d'une source d'énergie. La présence de telles molécules et d'eau sur les corps du système solaire géocroiseurs peut laisser penser que la vie pourrait être d'origine extra-terrestre. Au moment de sa formation, la Terre était bombardée par une multitude d'objets géocroiseurs, astéroïdes et comètes, qui ont participé à son augmentation de taille. Ce phénomène se déroulait il y a environ 4 milliards d'années sur une Terre trop chaude pour que la vie apparaisse. Lorsque la Terre s'est refroidie et que le bombardement a diminué, les conditions de développement de la vie sont apparues. Une hypothèse est que les premières molécules à la base de ce développement auraient pu arriver alors très rapidement sur Terre grâce à la chute d'une comète qui contenant déjà ces molécules, évitant ainsi un long processus d'apparition de ces molécules à la surface de la Terre d'une manière autonome.

## 1- Les Grandes Dates de la Science des Comètes

- **1531** P. Apian et J. Frascator observent que les queues des comètes sont opposées au Soleil.
- **1577** Tycho Brahe et d'autres observateurs mesurent la parallaxe de la comète de 1577, établissant qu'elle est plus loin que la Lune, alors que l'on croyait que les comètes étaient des phénomènes atmosphériques.
- **ca 1600** J. Kepler propose ses fameuses lois, qui permettront de comprendre les orbites cométaires.
- **1686** I. Newton calcule l'orbite de la comète de 1680 et montre qu'elle a décrit une parabole autour du Soleil.
- **1705** E. Halley réalise que les comètes de 1531, 1607 et 1682 sont un seul et même objet et prédit son retour pour 1758.
- **1812** H.W.M. Olbers, puis F.W. Bessel en 1836 proposent que les queues de comètes sont constituées de particules solides repoussées par le Soleil.
- **1819** F. Arago mesure la polarisation de la comète de 1819, établissant ainsi qu'elle réfléchissait la lumière du Soleil et n'était pas un objet lumineux par lui-même.
- **1864** Première observation spectrale d'une comète, la comète C/1864 N1 (Tempel) par G. Donati.
- **1881** Premier spectre photographique d'une comète, la Grande comète C/1881 K1 par W. Huggins.
- **1886** J.V. Schiaparelli relie l'essaim météoritique des Perséides à la comète 109P/Swift-Tuttle.
- **ca 1900** Plusieurs chercheurs, comme H. Deslandres et F. Baldet à l'Observatoire de Meudon, identifient les bandes observées dans les spectres cométaires à des radicaux et ions observés dans des spectres de laboratoire.
- **ca 1930-1940** K. Wurm puis P. Swings proposent que les radicaux observés dans les comètes proviennent de molécules mères telles que l'eau, l'ammoniac, le méthane.
- **1950** J.H. Oort, poursuivant les idées d'Öpik (1932), postule l'existence d'un réservoir de comètes vers 10000 unités astronomiques, source de *comètes dynamiquement nouvelles*.
- **ca 1950** G. Kuiper (et indépendamment K.E. Edgeworth vers 1948) postulent l'existence d'une ceinture d'objets trans-Neptuniens.
- **ca 1950** F. Whipple propose son modèle de noyau cométaire en *boule de neige sale*.
- **ca 1950** P. Swings et ses collègues calculent à Liège des spectres synthétiques de fluorescence moléculaire reproduisant fidèlement les spectres des comètes.
- **1951** L. Biermann suivi par H. Alfvén (1957) émettent l'hypothèse de l'existence d'un *vent solaire* pour expliquer les queues d'ions des comètes.
- **1973** L'apparition de la comète C/1973 E1 (Kohoutek) est l'occasion d'une campagne d'observation internationale conjuguant moyens spatiaux et instruments au sol, préfigurant les campagnes

d'observations modernes comme celle de la comète de Halley.

- **1986** Exploration spatiale de la comète de Halley, appuyée par une importante campagne d'observations au sol (*International Halley Watch*).
- **1992** J. Luu et D. Jewitt découvrent le premier objet trans-Neptunien 1992 QB<sub>1</sub>.
- **1994** La chute de la comète Shoemaker-Levy 9 sur Jupiter est observée.

**1996-1997** Les grandes comètes C/1996 B2 (Hyakutake) et C/1995 O1 (Hale-Bopp). Leurs observations ont conduit à d'importants résultats. Entre autres, la découverte d'une vingtaine de nouvelles molécules cométaires et la première détection d'une émission de rayons X par des comètes.

## 2- Les Orbites des Comètes

Ce n'est pas notre propos de détailler ici les lois qui régissent les mouvements des planètes et des comètes (voir [les pages sur la mécanique céleste](#)). Rappelons cependant que l'*excentricité* caractérise la forme d'une orbite. Une excentricité nulle correspond à une orbite circulaire, une excentricité de 1, à une parabole. Entre 0 et 1, on a une orbite elliptique. Pour une excentricité supérieure à 1, on a une hyperbole.

Alors que les planètes et (pour leur majorité) les astéroïdes ont des orbites quasi circulaires (excentricité proche de 0), les comètes sont caractérisées par des orbites de fortes excentricités : ellipses allongées, paraboles, voire hyperboles. Planètes et astéroïdes ont leurs orbites pratiquement confinées dans un même plan, le plan de l'*écliptique*. Ce n'est pas le cas des comètes dont une grande partie ont leurs orbites inclinées à peu près au hasard par rapport au plan de l'écliptique.

L'édition 1996 du *Catalogue des Orbites Cométaires* recense 883 comètes. 185 ont des orbites elliptiques dont la période orbitale (le temps qu'elles mettent pour faire un tour autour du Soleil) est inférieure à 200 ans : elles sont appelées *comètes à courte période* et pour la plupart d'entre-elles, ont été observées à

plusieurs de leurs retours. Pour les 698 autres, 347 ont des orbites paraboliques, ce qui signifie en fait qu'elles ont une orbite allongée, mais que la précision des observations n'est pas suffisante pour leur attribuer une excentricité différente de 1. 213 ont des orbites elliptiques avec des périodes orbitales supérieures à 200 ans : ce sont les *comètes à longue période*. Et 138 sont hyperboliques, ce qui veut dire qu'elles vont quitter notre Système solaire.

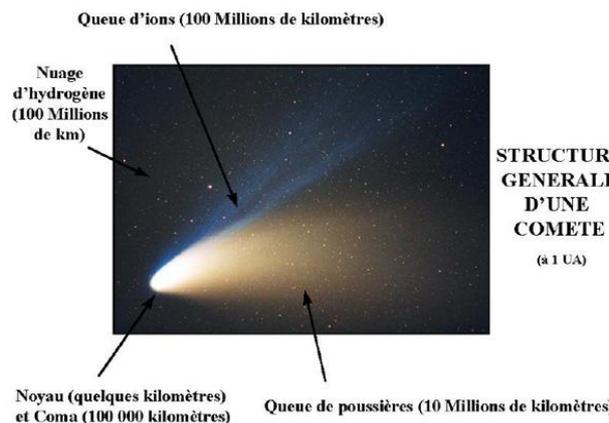
Les comètes à orbite hyperbolique ont des excentricités qui ne sont que faiblement supérieures à 1 (la comète la plus *hyperbolique* connue, la comète C/1980 E1 Bowell, avait une excentricité de 1,057). Dans tous les cas où des calculs précis ont été possibles, il s'est avéré que ces comètes étaient à l'origine des comètes elliptiques dont l'orbite a été modifiée par des perturbations. Ces perturbations peuvent être soit gravitationnelles (dus à l'influence des planètes géantes Jupiter ou Saturne), soit non-gravitationnelles (suite à l'*effet fusée* dû à l'éjection de gaz par leur noyau). Aucune de ces comètes ne semble donc avoir une origine extérieure à notre Système solaire. (Il n'est nullement exclu que de telles comètes extra-solaires puissent nous parvenir. Nous savons que notre Système solaire a éjecté un grand nombre de ses comètes. Réciproquement, nous pouvons être visités par les comètes d'autres systèmes solaires ; mais la probabilité semble faible.)

## 3- La Nature des Comètes

Depuis plus de deux siècles, nous savons que les comètes sont, comme les planètes, des objets soumis au champ de gravitation solaire. Elles se déplacent sur des orbites très excentriques, qui les emmènent, dans certains cas, à de très grandes distances héliocentriques, au-delà de l'orbite des planètes géantes les plus lointaines. Notre connaissance de la nature physique des comètes est plus récente. C'est vers 1950 que l'américain Fred Whipple a émis l'hypothèse qu'il s'agissait de petits corps d'un diamètre de l'ordre de quelques kilomètres, constitués essentiellement de glace d'eau et de roches. Les observations récentes ont confirmé cette hypothèse.

Loin du Soleil, les comètes ne sont constituées que de leur noyau, ce qui les rend encore

inaccessibles à l'observation, compte-tenu de la petite taille et du faible éclat de celui-ci. Lorsque la comète se rapproche du Soleil, la température de la surface du noyau s'élève et les glaces se subliment, entraînant l'éjection de gaz et de poussières. Ces poussières, diffusant la lumière solaire, émettent un rayonnement observable depuis la Terre. On voit apparaître une "chevelure", encore désignée par son nom latin "coma", qui s'étend au fur et à mesure que la comète se rapproche du Soleil. Si la comète est suffisamment "active" - c'est-à-dire si l'éjection de gaz et de poussières est suffisante - , on voit se dessiner deux queues, l'une large et incurvée, l'autre étroite et rectiligne. La première est due à des poussières qui diffusent la lumière solaire; la seconde est due à des gaz ionisés dont la fluorescence est excitée par le rayonnement solaire.



Crédit : H. Cottin Structure d'une comète

Tableau : Caractéristiques de quelques comètes typiques.

Comète	taille du noyau (diamètre équiv.)	production de gaz	production de poussière
	km	molécules/s	kg/s
46P/Wirtanen	1	$1. \times 10^{28}$	300
21P/Giacobini-Zinner	6	$5. \times 10^{28}$	1 500

1P/Halley	10	$1. \times 10^{30}$	30
C/1995 O1 (Hale-Bopp)	60	$1. \times 10^{31}$	300 000

Ce tableau donne les caractéristiques de deux *petites* comètes à courte période, de la comète de Halley et de la comète géante Hale-Bopp : taille du noyau, taux de production de gaz et de poussière à environ 1 unité astronomique du Soleil.

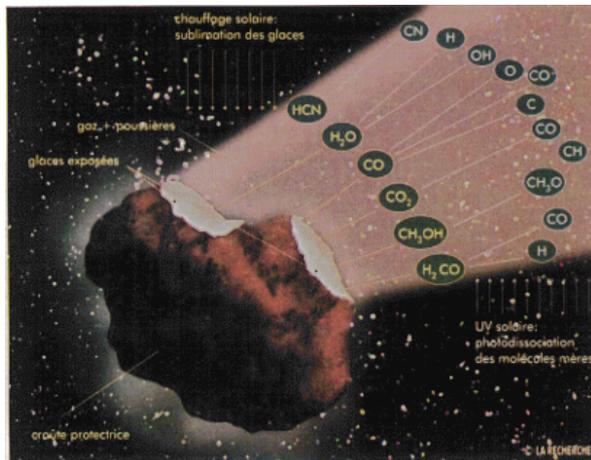
### Noyau, Coma et Queues

L'activité de la comète est liée à deux facteurs : sa composition, avec en particulier sa teneur en éléments volatils ; sa distance au Soleil, la comète étant d'autant plus active qu'elle passe près du Soleil. Les possibilités d'observation des phénomènes liés à l'activité d'une comète dépendent encore d'un troisième facteur : sa distance à la Terre au moment de l'observation.

Nous avons mentionné que l'eau est, parmi les éléments volatils, le constituant majoritaire. Connaissant l'énergie nécessaire pour provoquer la sublimation de l'eau, ainsi que le rayonnement émis par le Soleil, il est possible de calculer à quelle distance héliocentrique la sublimation de l'eau est susceptible de se produire. Les calculs montrent que le dégazage est attendu à une température d'environ 200 K (soit -73 degrés Celsius), ce qui correspond à une distance héliocentrique de 2,5 unités astronomiques. Or, de nombreuses comètes se sont montrées actives à de plus grandes distances héliocentriques. Ceci implique la présence dans le noyau d'autres composés plus volatils; c'est le cas en particulier du monoxyde de carbone (CO) et du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), dont la présence a été mise en évidence sur la comète de Halley. Bien d'autres molécules ont été identifiées depuis (voir le paragraphe 5, Les Molécules des Comètes ).

Les constituants volatils sublimés sous l'action du rayonnement solaire, entraînant avec eux la poussière du noyau, forment la coma qui entoure le noyau. Mais les "molécules-mères" ainsi formées ont elles-mêmes une durée de vie relativement courte : sous l'action du

rayonnement ultraviolet solaire, elles se dissocient en radicaux, en atomes et en ions. Les poussières vont former une traînée appelée "queue de poussières" tandis que les ions s'alignent dans la direction opposée au Soleil, le long de la "queue ionisée"; celle-ci peut s'étendre sur plusieurs millions de kilomètres.

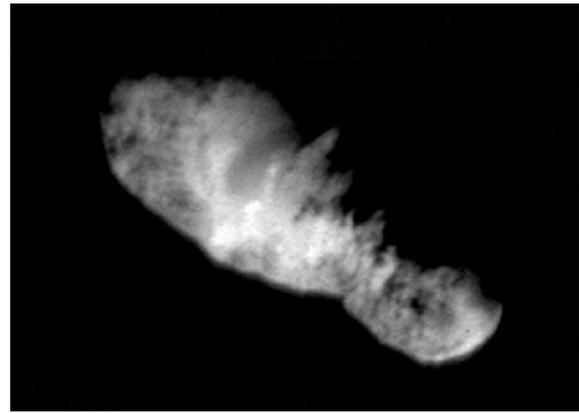


Crédit : La Recherche Processus physiques de l'activité cométaire

C'est donc la diffusion du flux solaire visible par les particules cométaires qui est essentiellement responsable de l'aspect des comètes que nous connaissons; le noyau, quant à lui, est masqué par la forte luminosité de l'enveloppe de gaz et de poussières qu'il éjecte.

#### 4- Les Noyaux des Comètes

Les noyaux cométaires sont trop petits pour pouvoir être résolus par l'observation à distance : ils apparaissent comme un point sur les images. La seule exception à ce jour est le [noyau de la comète de Halley](#) qui a pu être *imagé* par les sondes spatiales VEGA et Giotto et celui de la comète Borrelly observé par la sonde Deep Space 1 (voir ci-dessous). Lorsqu'une comète est active, le noyau est noyé dans la brillance intense du nuage de poussière qui l'entoure. Il est donc souvent nécessaire d'étudier les noyaux cométaires lorsqu'ils sont inactifs, donc très éloignés et malheureusement alors peu brillants.



Crédit: NASA Le noyau de la comète Borrelly (8km de long) vu en par la sonde Deep Space One. L'absence de jets caractéristiques violents s'explique par la grande distance du Soleil.

Les tailles des noyaux cométaires, évaluées par photométrie ou par écho radar, s'étalent de 1 km de diamètre à 40 km pour les comètes géantes comme Hale-Bopp. Dans les rares cas où elle est connue, leur forme est irrégulière, allongée (ce qui est également le cas des petits astéroïdes).

Les noyaux cométaires sont très noirs : ils ne réfléchissent que 4% de la lumière qu'ils reçoivent. Ce sont les objets les plus sombres du Système solaire. Ceci est peut-être dû à une couche de molécules organiques solides (comme du goudron) qui recouvrent les poussières cométaires.

Il est très difficile d'évaluer la masse des noyaux cométaires. Des évaluations précises seront ne possibles que lorsque des sondes spatiales auront pu être mises en orbite autour de noyaux cométaires. En attendant, des évaluations très indirectes ont été faites en se basant sur les perturbations des orbites cométaires induites par les jets de gaz issus du noyau (qui se comportent comme des fusées et exercent des *forces non-gravitationnelles*). Les densités correspondantes tombent dans une grande fourchette d'incertitude : de 0,25 à 1,2 g/cm<sup>3</sup>. Le matériel cométaire doit donc être très poreux, voire floconneux. Ce résultat trahit sans doute le mécanisme de formation des noyaux cométaires, par agglomération de petits grains.

Très peu denses, sans grande cohésion interne, les noyaux cométaires sont très fragiles. Ceci est attesté par la facilité avec laquelle ils

peuvent se fractionner ou même éclater complètement (voir le paragraphe 7, la mort des Comètes).

Les noyaux cométaires tournent sur eux-mêmes. La période de rotation a pu être mesurée dans certains cas : soit en étudiant la courbe de lumière du noyau (la brillance du noyau varie périodiquement s'il est irrégulier) ; soit en étudiant les images des jets de poussière qui s'échappent d'un noyau en rotation à la manière d'un tourniquet. Les périodes de rotation observées vont de quelques heures à quelques jours. Parfois on observe un état de rotation est complexe : une combinaison de rotation et de précession, voire un mouvement chaotique.

## 5- Les Molécules des Comètes

### La Composition des Comètes

Pour connaître la composition chimique des comètes, c'est-à-dire la nature des glaces et des roches qui composent le noyau, l'idéal serait d'envoyer une sonde automatique se poser à sa surface pour en effectuer l'analyse. C'est l'objectif de la mission spatiale ROSETTA qui doit atteindre la comète Wirtanen vers 2012. En attendant, nous sommes contraints d'observer à distance les produits relâchés par la sublimation des glaces cométaires.

Cette tâche est difficile. Les molécules volatiles directement issues du noyau (nommées *molécules mères*) sont difficilement observables, car leurs signatures spectrales (bandes de rotation et de vibration-rotation) apparaissent dans les domaines infrarouge et millimétrique, moins facilement observables que les ondes visibles. En revanche, les radicaux, atomes et ions produits par la photodissociation des molécules-mères (que l'on nomme *molécules filles*), présentent des signatures spectrales très intenses, liées à leurs transitions électroniques, dans le domaine visible; ces produits secondaires sont observés depuis les débuts de la spectroscopie il y a plus d'un siècle, et ont été identifiés depuis de nombreuses décennies (O, C, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, CH, CN, CS, CO<sup>+</sup>, CO<sub>2</sub><sup>+</sup>, H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>...).

Les produits secondaires observés sont nombreux, et les réactions de dissociation et

d'ionisation sont multiples; dans la plupart des cas, l'observation des produits secondaires ne permet pas de déterminer sans ambiguïté la composition des molécules-mères dont ils sont issus. C'est pourquoi il est préférable d'observer directement les molécules-mères, dans les domaines infrarouge et millimétrique, la méthode ultime consistant bien évidemment à effectuer une observation *in situ* depuis une sonde spatiale. Voir le paragraphe 8, l'exploration spatiale des Comètes.

### La Chasse aux Molécules Mères

Mais les techniques spectroscopiques ont récemment fait des progrès spectaculaires dans des domaines exotiques de longueurs d'onde : en ultraviolet avec le satellite IUE (International Ultraviolet Explorer) et le télescope spatial Hubble; en infrarouge, soit du sol avec des télescopes et des détecteurs performants, soit de l'espace avec l'Observatoire spatial infrarouge (ISO); en radio avec des radiotélescopes et des radio/interféromètres qui couvrent maintenant les domaines millimétriques et submillimétriques (comme ceux de l'Institut de radioastronomie millimétrique IRAM). L'application de ces techniques modernes aux comètes exceptionnellement brillantes Hyakutake et Hale-Bopp ont permis de récolter une moisson de nouvelles molécules cométaires.

Les molécules cométaires que l'on observe provenant des glaces du noyau.

**Voir le tableau des molécules en bas de l'article.**

molécule	abondance relative	technique d'observation
eau	H <sub>2</sub> O 100	IR, radio
monoxyde de carbone	CO 23	radio, IR, UV
dioxyde de carbone	CO <sub>2</sub> 6	IR
méthane	CH <sub>4</sub> 0,6	IR
acétylène	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> 0,1	IR
éthane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 0,3	IR
méthanol	CH <sub>3</sub> OH 2,4	radio, IR
formaldéhyde	H <sub>2</sub> CO 1,1	radio
éthylène glycol	HOCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH 0,25	radio
acide formique	HCOOH 0,09	radio
éthanal	CH <sub>3</sub> CHO 0,02	radio
formiate de méthyle	HCOOCH <sub>3</sub> 0,08	radio
ammoniac	NH <sub>3</sub> 0,7	radio, IR
cyanure d'hydrogène	HCN 0,25	radio, IR
isocyanure d'hydrogène	HNC 0,04	radio
cyanure de méthyle	CH <sub>3</sub> CN 0,02	radio
cianoacétylène	HC <sub>3</sub> N 0,02	radio
acide isocyanique	HNCO 0,1	radio
formamide	NH <sub>2</sub> CHO 0,015	radio
sulfure d'hydrogène	H <sub>2</sub> S 1,5	radio
monoxyde de soufre	SO 0,3	radio
dioxyde de soufre	SO <sub>2</sub> 0,2	radio
oxysulfure de carbone	OCS 0,4	radio, IR
disulfure de carbone	CS <sub>2</sub> 0,2	UV, radio
thioformaldéhyde	H <sub>2</sub> CS 0,02	radio
disoufre	S <sub>2</sub> 0,005	UV

Les "abondances relatives" sont données ici en nombre de molécules par rapport à l'eau.

Les glaces cométaires sont donc essentiellement constituées d'eau, de monoxyde et de dioxyde de carbone, d'hydrocarbures comme le méthane, de molécules à base de C, H, O comme l'alcool méthylique et le formaldéhyde. Un certain nombre de molécules azotées et soufrées sont identifiées, mais avec des abondances bien moindre. Notre inventaire des molécules cométaires est certainement encore bien loin d'être complet, mais les molécules sont de plus en plus difficiles à mettre en évidence au fur et à mesure que leur complexité augmente et que leur abondance diminue.

Il est important de noter que les molécules les plus abondantes des glaces cométaires - l'eau, le monoxyde et le dioxyde de carbone, le méthanol, le formaldéhyde, l'ammoniac, le méthane - se trouvent également dans les glaces interstellaires.

Bien sûr, la composition des comètes nous renseigne sur leur origine (voir le paragraphe 6 sur l'origine des comètes).

### **Les Poussières Cométaires**

C'est la spectroscopie infrarouge et (dans le cas de l'exploration spatiale de la comète de Halley) l'analyse directe par spectroscopie de masse qui nous ont permis de connaître la composition des grains et des poussières cométaires. Une grande fraction de ces grains sont des silicates réfractaires (comme l'olivine), semblables à ceux qui constituent en grande partie l'écorce terrestre. Certains de ces silicates sont cristallins, d'autres sont amorphes (c'est à dire sous forme vitreuse).

Des silicates semblables sont observés dans les météorites et les poussières interstellaires, dont l'origine est sûrement liée aux comètes. Mais on les retrouve également dans la poussière interstellaire et dans les disques de poussière entourant certaines étoiles.

Les sondes spatiales nous ont révélé qu'une fraction importante des grains cométaires étaient riches en atomes d'hydrogène, carbone, oxygène et azote (les grains "CHON"). Ces grains sont probablement recouverts d'un manteau de molécules organiques. Ces molécules, sans doute de masse moléculaire

élevée, s'évaporent difficilement, ou bien se décomposent en molécules plus légères qui contribuent à l'atmosphère cométaire lorsque les grains sont chauffés par le Soleil.

Des grains glacés sont également entraînés. Près du Soleil, ils s'évaporent très vite, contribuant également à la formation de l'atmosphère gazeuse.

## **6- L'Origine des Comètes**

### **L'origine du Système solaire et la formation des comètes**

Le Système solaire se serait formé à la suite de la contraction d'un nuage interstellaire qui a formé un disque. Les comètes seraient alors des *planétoïdes* résultant de l'accrétion de poussières et de la condensation de gaz dans ce disque. Si ce scénario est communément retenu, de nombreuses variantes ont été proposées et bien des détails de son déroulement sont encore très incertains.

La présence de molécules très volatiles dans les noyaux cométaires, la similarité de leur composition avec la matière interstellaire suggèrent fortement que ces corps ont retenu sous une forme quasi intacte la matière présente dans la Nébuleuse solaire primitive. D'où l'intérêt de l'étude des comètes pour comprendre l'histoire de notre Système solaire.

Cependant, les comètes ont pu retenir des compositions différentes, et subir des histoires diverses, suivant leur lieu de formation dans le Système solaire.

### **Le Nuage de Oort**

Les comètes formées à l'intérieur de l'orbite de Neptune n'avaient pas des orbites stables. Perturbées par l'attraction gravitationnelle des planètes géantes, elles ont été soit éjectées à l'extérieur du Système solaire, dans l'espace interstellaire, soit rejetées sur des orbites plus éloignées. Elles ont alors formé le *Nuage de Oort*, du nom de l'astronome néerlandais Jan Oort (1900-1992) qui a formulé cette hypothèse vers 1950.

Le nuage de Oort serait sphérique et s'étendrait jusqu'à près de 100000 unités astronomiques du Soleil. Il pourrait contenir environ mille milliards de comètes. Des perturbations occasionnelles (par des étoiles proches du Soleil) peuvent à nouveau changer les orbites de ces comètes et les réinjecter vers le Soleil. Ce sont alors des comètes *dynamiquement nouvelles*. Elles sont caractérisées par une gamme étendue de périodes orbitales, et des orbites inclinées au hasard sur l'écliptique (le plan dans lequel tournent toutes les planètes). Les comètes P/Halley et Hale-Bopp sont de telles comètes. Le Nuage de Oort est donc un réservoir de comètes.

### La Ceinture de Kuiper

Les comètes formées au delà de l'orbite de Neptune sont restées sur des orbites relativement stables. Elles ont formé la *Ceinture de Kuiper*, ou *Ceinture d'Edgeworth-Kuiper* - des noms des astronomes irlandais Kenneth Edgeworth (1880-1972) et américain Gerard Kuiper (1905-1973).

Les orbites de telles comètes peuvent cependant évoluer : elles deviennent alors des comètes à courte période, gardant leur faible inclinaison sur le plan de l'écliptique. Les comètes dites de la *famille de Jupiter*, de faible inclinaison et de période inférieure à 20 ans, auraient ainsi évolué à partir de la Ceinture de Kuiper, qui constituerait ainsi notre deuxième réservoir de comètes.

Certains astéroïdes ont été découverts entre Jupiter et Neptune, sur des orbites à forte excentricité : ce sont les *Centaures*. Ils pourraient être des objets en migration provenant de la Ceinture de Kuiper. L'un d'entre-eux, (2060) Chiron, présente même une activité cométaire (il a été renommé comme la comète 95P/Chiron).

Longtemps simple hypothèse, la Ceinture de Kuiper est devenue une réalité en 1992 avec la découverte de l'objet trans-Neptunien 1992 QB<sub>1</sub>. Depuis, plusieurs centaines d'objets trans-Neptuniens ont été découverts. La planète Pluton ne serait que le plus gros représentant de cette classe d'objets.

### Les comètes sont-elles à l'origine de l'eau terrestre ?

Tous les corps du Système Solaire sont bombardés sans cesse par des astéroïdes des comètes et autres petits corps. La présence de cratères d'impact sur la Lune et d'autres planètes ou satellites en est la preuve. On estime que ce bombardement était bien plus intense autrefois. D'où l'hypothèse que les chutes de comètes sur Terre auraient pu contribuer à la composition actuelle de son atmosphère et de ses océans. En particulier, la glace des comètes aurait pu apporter l'eau des océans.

Un test puissant permettant de comprendre l'origine de l'eau cométaire et de la comparer à l'eau terrestre est la mesure de la proportion de deutérium dans l'eau. Le deutérium (D) est un isotope de l'hydrogène : son atome contient un neutron en plus du proton unique de l'hydrogène normal. Hydrogène et deutérium ont les mêmes propriétés chimiques, mais des propriétés physiques différentes dues à leur différence de masse. Le deutérium ne représente que 1/30000 de l'hydrogène du milieu interstellaire ou de la Nébuleuse primitive pré-solaire.

Il a été possible d'observer HDO et de mesurer ainsi le rapport deutérium/hydrogène dans l'eau de quelques comètes. On trouve ainsi un enrichissement en deutérium d'un facteur 10 par rapport au milieu cosmique (où D/H = 1/30000) et à la Nébuleuse primitive qui a donné naissance au Système solaire. Cependant, la concentration en deutérium est deux fois plus élevée dans l'eau cométaire que dans l'eau terrestre. Ce qui suggère une autre origine pour l'eau terrestre. Peut-être à partir de météorites carbonées, qui auraient le *bon* rapport D/H.

Mais cette conclusion n'est peut-être pas définitive. Elle est basée sur l'étude du deutérium dans seulement trois comètes, toutes à longue période, provenant du nuage de Oort. On ignore encore tout de ce rapport pour les comètes à courte période, qui ont probablement été plus nombreuses à percuter la Terre, et qui ont suivi une histoire différente.

## Les comètes ont-elles apporté la vie sur Terre ?

Les comètes ont-elles apporté la vie sur la Terre ? Parmi les molécules cométaires identifiées se trouvent des molécules *prébiotiques* comme HCN, HC<sub>3</sub>N, H<sub>2</sub>CO ou H<sub>2</sub>S. Des molécules organiques encore plus complexes sont probablement aussi présentes. L'apport de telles molécules sur la Terre primitive, à un moment où les collisions cométaires étaient fréquentes, a pu jouer un rôle majeur dans le développement de la vie sur la Terre. Une grande partie de ces molécules est probablement détruite lors de l'impact à grande vitesse des comètes sur la Terre. On sait, cependant, que les comètes explosent dans la haute atmosphère lors de cet impact. Des petits fragments se produisent, qui peuvent être ensuite efficacement freinés et atteindre la surface terrestre en conservant une partie de leur contenu moléculaire organique.

L'apport de matière organique extraterrestre est par ailleurs attesté par l'analyse des météorites. Certaines d'entre elles, les *chondrites carbonées*, contiennent, outre un matériau organique insoluble de nature mal définie (*goudron*), certaines molécules organiques parfaitement identifiables, dont des composés complexes incluant même des acides aminés (glycine, alanine, acide glutamique...). Ces molécules complexes ne sont présentes qu'en quantités infimes, et il faut toutes les ressources sophistiquées de la microanalyse chimique moderne pour les identifier. On voit ainsi ce que l'on peut espérer des retours sur Terre d'échantillons cométaires.

Tout ceci rappelle l'ancienne hypothèse de la *panspermie* selon laquelle la vie aurait pu être transportée sur Terre par des *spores* provenant de mondes extérieurs. Mais il y a une différence fondamentale : comètes et météorites ne nous auraient apporté que les *briques* à partir desquelles la vie aura pu se construire, et non pas la vie elle-même.

### Et ensuite ?

Une fois formées, les comètes évoluent et finissent parfois par disparaître comme on va le voir dans le paragraphe suivant.

## 7- La mort des Comètes

Les comètes ne sont pas des astres immuables. Elles évoluent et peuvent disparaître de bien des manières.

### La mort par épuisement

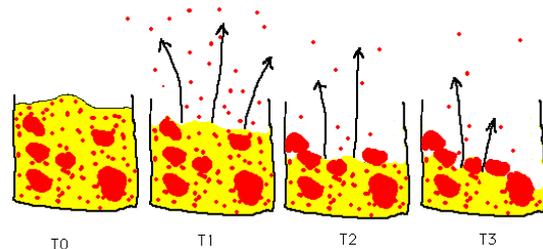
Une comète peut perdre une couche de glace de plusieurs dizaines de centimètres à chacun de ses retours près du Soleil. Après de multiples retours, elle peut avoir complètement épuisé ses éléments volatiles et cesser toute activité : la comète est épuisée. Il est probable qu'un certain nombre de petits corps classifiés comme astéroïdes soient en fait des noyaux d'anciennes comètes, maintenant épuisées.

### La mort par étouffement

Les gros grains de poussière (les *galets* sont difficiles à entraîner par le gaz qui s'échappe des noyaux cométaires. Ils peuvent s'accumuler et former une croûte. Cette croûte isole et protège la glace sous-jacente du chauffage du Soleil. Si elle recouvre toute la surface, la comète devient étouffée et devient inactive. Un chauffage plus intense (par rapprochement du Soleil ou changement d'orientation) peut cependant *souffler* et faire disparaître la croûte, et ainsi réveiller l'activité de la comète.

Une croûte peut se former ou disparaître au cours d'un seul passage près du Soleil. On a ainsi vu des objets, classifiés comme *astéroïdes*, se réveiller et révéler une activité cométaire.

Il semble que les surfaces de la plupart des noyaux cométaires sont partagés entre *zones actives* où la glace est exposée et *zones inactives* recouverts d'une croûte protectrice. Cette distinction est bien visible sur les images de la comète de Halley obtenues lors de son exploration spatiale.



Crédit : D. Jewitt Les étapes de la formation d'une croûte à la surface d'un noyau cométaire

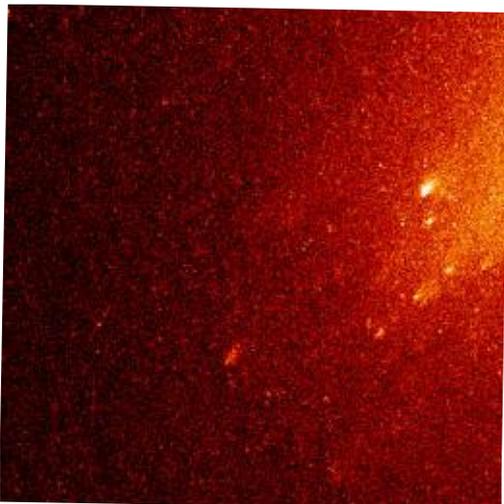
La sublimation de la glace entraîne les petits grains de poussières, mais les plus gros restent à la surface et s'accumulent pour former une croûte protectrice.

### La mort par éclatement

Les noyaux cométaires sont très fragiles et un rien semble pouvoir les briser. Ainsi, on a souvent observé l'éclatement de comètes qui passent près d'une grosse planète (comme Jupiter) ou près du Soleil (comme les *sungrazers*, ces très petites comètes qui rasant le Soleil et ne nous sont souvent révélées que par des [observations coronographiques](#) ou à l'occasion d'une éclipse de Soleil). Leur noyau est alors soumis à des tensions internes suite aux effets de marées qu'il subit. Elles peuvent aussi tomber sur le Soleil et disparaître ainsi.

D'autres comètes éclatent sans raison apparente, parfois loin du Soleil. Il semble que la production de gaz due à leur activité suffise à les fragiliser et à les briser.

Souvent, les fragments ainsi produits s'épuisent rapidement, ou se fragmentent à nouveau. La comète disparaît alors complètement.



Crédit : HST La fragmentation de la comète C/1999 S4 (LINEAR) observée par le Télescope spatial Hubble

Le noyau de la comète C/1999 S4 (LINEAR) a éclaté en de multiples fragments lors de son passage au périhélie en juillet 2000, chacun se comportant comme une mini-comète et s'entourant de sa propre queue. La comète a complètement disparu les semaines suivantes.

### La mort par collision

Les collisions entre petits corps et planètes, rarissimes à l'échelle humaine, ne le sont pas du tout à l'échelle de temps du Système solaire et jouent un rôle important dans l'évolution dans l'évolution des comètes, des astéroïdes et des planètes.

L'un de ces événements a pu être observé récemment : [la chute de la comète Shoemaker-Levy 9](#) sur Jupiter en juillet 1994. [La sonde SOHO](#) a aussi observé des chutes sur le Soleil.

### Disparition par éjection du Système Solaire

Les comètes qui passent au voisinage d'une grosse planète (particulièrement de Jupiter) voient leur orbite perturbée par l'influence gravitationnelle de cette planète. D'elliptique, l'orbite peut devenir hyperbolique. La comète quitte alors le Système solaire.

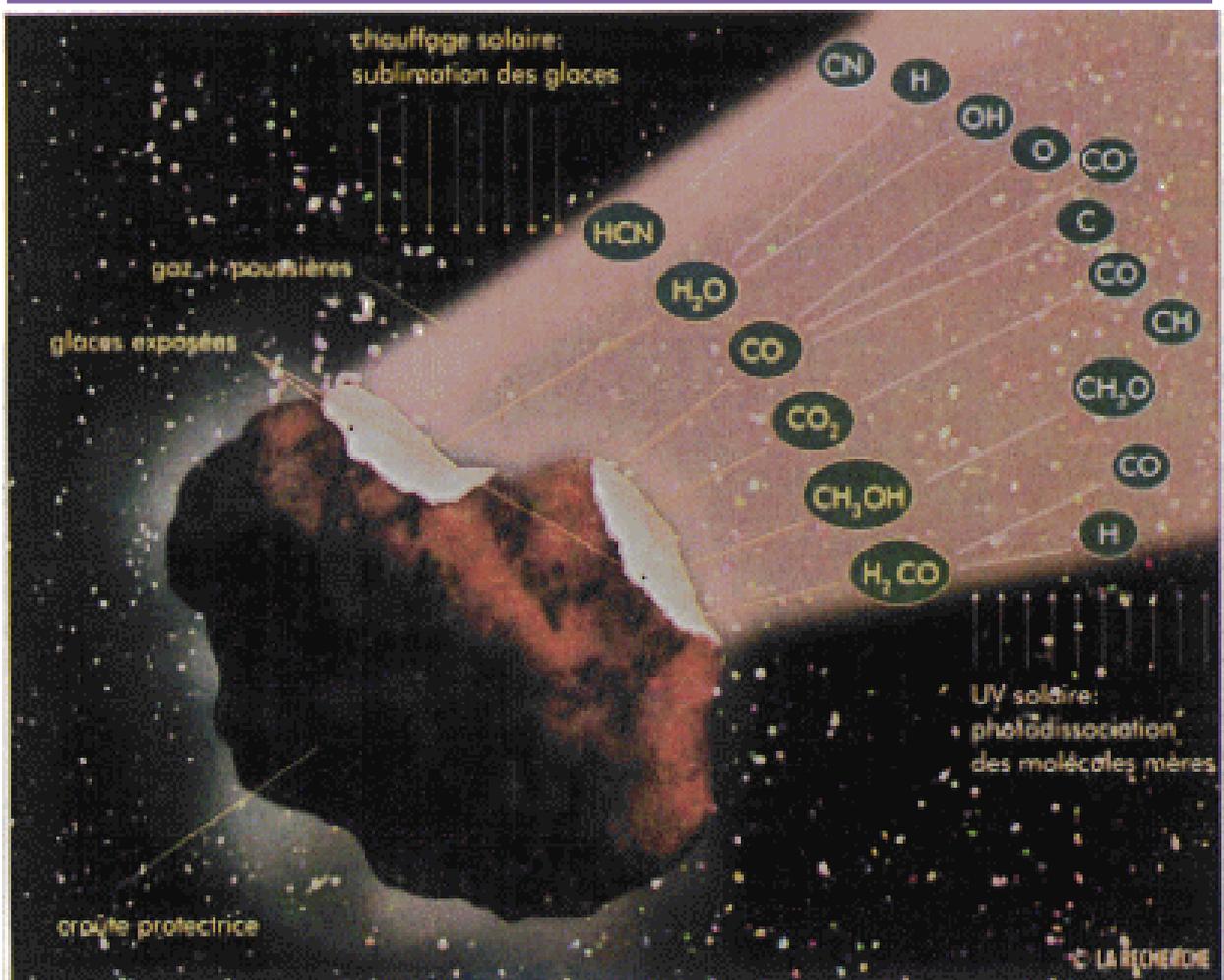
De nombreuses comètes ont ainsi été perdues juste après leur formation. Mais ce phénomène joue toujours, et une certaine proportion de comètes sont observées sur des orbites hyperboliques

<http://www.imcce.fr/promenade/pages3/310.html>

<http://www.imcce.fr/promenade/pages5/598.html>

## Les molécules cométaires que l'on observe provenant des glaces du noyau.

Molécule		Abondance relative	Technique d'observation
eau	H <sub>2</sub> O	100	IR, radio
monoxyde de carbone	CO	23	radio, IR, UV
dioxyde de carbone	CO <sub>2</sub>	6	IR
méthane	CH <sub>4</sub>	0.6	IR
acétylène	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0.1	IR
éthane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.3	IR
méthanol	CH <sub>3</sub> OH	2.4	radio, IR
formaldéhyde	H <sub>2</sub> CO	1.1	radio
acide formique	HCOOH	0.09	radio
éthanal	CH <sub>3</sub> CHO	0.02	radio
formiate de méthyle	HCOOCH <sub>3</sub>	0.08	radio
ammoniac	NH <sub>3</sub>	0.7	radio, IR
cyanure d'hydrogène	HCN	0.25	radio, IR
isocyanure d'hydrogène	HNC	0.04	radio
cyanure de méthyle	CH <sub>3</sub> CN	0.02	radio
cyanoacétylène	HC <sub>3</sub> N	0.02	radio
acide isocyanique	HNCO	0.1	radio
formamide	NH <sub>2</sub> CHO	0.015	radio
sulfure d'hydrogène	H <sub>2</sub> S	1.5	radio
monoxyde de soufre	SO	0.3	radio
dioxyde de soufre	SO <sub>2</sub>	0.2	radio
oxysulfure de carbone	OCS	0.4	radio, IR
disulfure de carbone	CS <sub>2</sub>	0.2	UV, radio
thioformaldéhyde	H <sub>2</sub> CS	0.02	radio
disoufre	S <sub>2</sub>	0.005	UV



## Les Molécules des Comètes



### La Composition des Comètes

Pour connaître la composition chimique des comètes, c'est-à-dire la nature des glaces et des roches qui composent le noyau, l'idéal serait d'envoyer une sonde automatique se poser à sa surface pour en effectuer l'analyse. C'est l'objectif de la mission spatiale *Rosetta* qui doit explorer la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko vers 2014-2015. En attendant, nous sommes contraints d'observer à distance les produits relâchés par la sublimation des glaces cométaires.

Cette tâche est difficile. Les molécules volatiles directement issues du noyau (nommées *molécules mères*) sont difficilement observables, car leurs signatures spectrales (bandes de rotation et de vibration-rotation) apparaissent dans les domaines infrarouge et millimétrique, moins accessibles que les ondes visibles. En revanche, les radicaux, atomes et ions produits par la photodissociation des molécules-mères (que l'on nomme *molécules filles*), présentent des signatures spectrales très intenses, liées à leurs transitions électroniques, dans le domaine visible; ces produits secondaires sont observés depuis les débuts de la spectroscopie il y a plus d'un siècle, et ont été identifiés depuis de nombreuses décennies (O, C, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, CH, CN, CS, CO<sup>+</sup>, CO<sub>2</sub><sup>+</sup>, H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>...).

Les produits secondaires observés sont nombreux, et les réactions de dissociation et d'ionisation sont multiples; dans la plupart des cas, l'observation des produits secondaires ne permet pas de déterminer sans ambiguïté la composition des molécules-mères dont ils sont issus. C'est pourquoi il est préférable d'observer directement les molécules-mères, dans les domaines infrarouge et millimétrique, la méthode ultime consistant bien évidemment à effectuer une observation *in situ* depuis une sonde spatiale. Voir [l'Exploration Spatiale des Comètes](#).

### La Chasse aux Molécules Mères

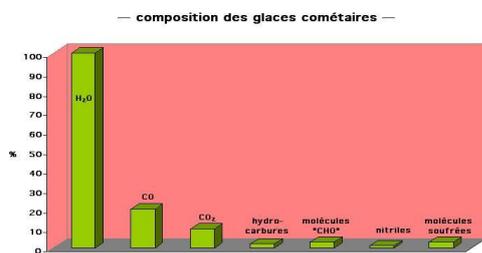
Mais les techniques spectroscopiques ont récemment fait des progrès spectaculaires dans des domaines exotiques de longueurs d'onde: en ultraviolet avec le satellite IUE (International Ultraviolet Explorer) puis le télescope spatial Hubble; en infrarouge, soit du sol avec des télescopes et des détecteurs performants, soit de l'espace avec l'Observatoire spatial infrarouge (ISO); en radio avec des radiotélescopes et des radiointerféromètres qui couvrent maintenant les domaines millimétriques et submillimétriques (comme ceux de l'Institut de radioastronomie millimétrique IRAM). L'application de ces techniques modernes aux comètes exceptionnellement brillantes Hyakutake et Hale-Bopp ont permis de récolter une moisson de nouvelles molécules cométaires.

molécule	abondance relative	technique d'observation
eau	H <sub>2</sub> O 100	IR, radio
monoxyde de carbone	CO 23	radio, IR, UV
dioxyde de carbone	CO <sub>2</sub> 6	IR
méthane	CH <sub>4</sub> 0,6	IR
acétylène	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> 0,1	IR
éthane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 0,3	IR
méthanol	CH <sub>3</sub> OH 2,4	radio, IR
formaldéhyde	H <sub>2</sub> CO 1,1	radio
éthylène glycol	HOCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH 0,25	radio
acide formique	HCOOH 0,09	radio
éthanal	CH <sub>3</sub> CHO 0,02	radio
formiate de méthyle	HCOOCH <sub>3</sub> 0,08	radio
ammoniac	NH <sub>3</sub> 0,7	radio, IR
cyanure d'hydrogène	HCN 0,25	radio, IR
isocyanure d'hydrogène	HNC 0,04	radio
cyanure de méthyle	CH <sub>3</sub> CN 0,02	radio
cianoacétylène	HC <sub>3</sub> N 0,02	radio
acide isocyanique	HNCO 0,1	radio
formamide	NH <sub>2</sub> CHO 0,015	radio
sulfure d'hydrogène	H <sub>2</sub> S 1,5	radio
monoxyde de soufre	SO 0,3	radio
dioxyde de soufre	SO <sub>2</sub> 0,2	radio
oxysulfure de carbone	OCS 0,4	radio, IR
disulfure de carbone	CS <sub>2</sub> 0,2	UV, radio
thioformaldéhyde	H <sub>2</sub> CS 0,02	radio
disoufre	S <sub>2</sub> 0,005	UV

Les "abondances relatives" sont données ici en nombre de molécules par rapport à l'eau.

Les "abondances relatives" sont données ici en nombre de molécules par rapport à l'eau.

Les glaces cométaires sont donc essentiellement constituées d'eau, de monoxyde et de dioxyde de carbone, d'hydrocarbures comme le méthane, de molécules à base de C, H, O comme l'alcool méthylique et le formaldéhyde. Un certain nombre de molécules azotées et soufrées sont identifiées, mais avec des abondances bien moindre. Notre inventaire des molécules cométaires est certainement encore bien loin d'être complet, mais les molécules sont de plus en plus difficiles à mettre en évidence au fur et à mesure que leur complexité augmente et que leur abondance diminue. La molécule cométaire la plus complexe identifiée à ce jour est l'[éthylène glycol](#) (connu dans la vie courante comme *antigel*).



Il est important de noter que les molécules les plus abondantes des glaces cométaires - l'eau, le monoxyde et le dioxyde de carbone, le méthanol, le formaldéhyde, l'ammoniac, le méthane - se trouvent également dans les glaces interstellaires.

Bien sûr, la composition des comètes nous renseigne sur leur origine. Voir [l'origine des comètes](#).

## Les Poussières Cométaires

C'est la spectroscopie infrarouge et (dans le cas de l'exploration spatiale de la comète de Halley) l'analyse directe par spectroscopie de masse qui nous ont permis de connaître la composition des

grains et des poussières cométaires. Une grande fraction de ces grains sont des silicates réfractaires (comme l'olivine), semblables à ceux qui constituent en grande partie l'écorce terrestre. Certains de ces silicates sont cristallins, d'autres sont amorphes (c'est à dire sous forme vitreuse).

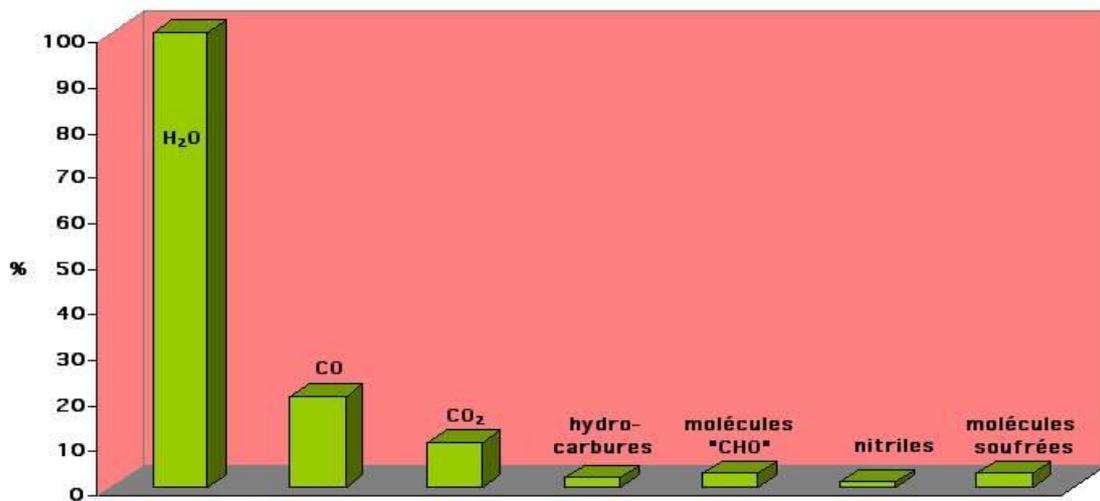
La sonde *Stardust* a prélevé des échantillons de ces poussières le 2 janvier 2004 dans la chevelure de la comète 81P/Wild 2. Elle nous les a rapportés le 15 janvier 2006, et ces précieux échantillons sont actuellement en cours d'analyse. Les premiers résultats nous révèlent des grains très semblables à ce que nous attendions à partir des observations spectroscopiques à distance, et similaires aux particules récoltées dans la haute stratosphère terrestre.

Des silicates semblables sont observés dans les météorites et les poussières interstellaires, dont l'origine est sûrement liée aux comètes. Mais on les retrouve également dans la poussière interstellaire et dans les disques de poussière entourant certaines étoiles.

Les sondes spatiales *VEGA* et *Giotto* nous ont révélé qu'une fraction importante des grains cométaires étaient riches en atomes d'hydrogène, carbone, oxygène et azote (les grains "CHON"). Ces grains sont probablement recouverts d'un manteau de molécules organiques. Ces molécules, sans doute de masse moléculaire élevée, s'évaporent difficilement, ou bien se décomposent en molécules plus légères qui contribuent à l'atmosphère cométaire lorsque les grains sont chauffés par le Soleil.

Des grains glacés sont également entraînés.  
Près du Soleil, ils s'évaporent très vite,  
contribuant également à la formation de  
l'atmosphère gazeuse.

— composition des glaces cométaires —





Que voyez-vous ?

Notamment de l'eau contenue dans la comète et du CO<sub>2</sub>, n'est-ce pas ?

Si l'eau existe dans tout l'univers comment peut-on en manquer un jour sur Terre alors que selon les scientifiques nous disent qu'elle existe depuis quelques d'années. Ce serait un vrai miracle que nous ayons pu polluer tout l'Univers avec le CO<sub>2</sub>.

La vérité c'est que tous ces composants chimiques existent partout dans l'Univers.

Composition chimique

L'eau constitue 75 à 80 % de la matière volatile de la plupart des comètes. D'autres glaces fréquentes sont le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>), l'ammoniac (NH<sub>3</sub>) et le formaldéhyde (H<sub>2</sub>CO).

Voici la liste des molécules qui ont été détectées dans la comète Hale-Bopp, certaines pour la première fois, comme le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), l'acide formique (HCOOH) ou l'acide cyanhydrique deutéré

(DCN) (source : [ESO Comet Hale-Bopp Update, May 16, 1997](http://eso.org/obs/obsnewcomet/comet_hale_bopp/comet_hale_bopp_update_may_16_1997.html)) :

H<sub>2</sub>O, OH, H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>,  
CO, CO<sub>2</sub>, CO<sup>+</sup>, HCO<sup>+</sup>,  
H<sub>2</sub>S, SO, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>CS, OCS, CS,  
CH<sub>3</sub>OH, H<sub>2</sub>CO, HCOOH, CH<sub>3</sub>OCHO,  
HCN, CH<sub>3</sub>CN, HNC, HC<sub>3</sub>N, HNCO,  
CN, NH<sub>3</sub>, NH<sub>2</sub>, NH<sub>2</sub>CHO, NH,  
CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sup>+</sup>, C<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>,

He, Na, K, O<sup>+</sup>,  
Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>

ainsi que les isotopes suivants :

HDO, DCN, H<sup>13</sup>CN, HC<sup>15</sup>N, C<sup>34</sup>S

La plupart des composés organiques de Hale-Bopp ont déjà été identifiés dans les denses nuages moléculaires interstellaires, ce qui renforce le lien entre la matière cométaire et la matière interstellaire, lien mis en évidence lors de l'exploration de la comète de Halley en 1986.

<http://www.astro.ulg.ac.be/~demoulin/da.ta.htm>

## Découverte de deux nouvelles molécules dans la Voie Lactée

### Découverte de deux nouvelles molécules dans la Voie Lactée

Une équipe internationale d'astronomes du Green Bank Telescope a annoncé la découverte de deux nouvelles molécules dans les nuages interstellaires de la Voie Lactée.

Le 04/07/2004 à 15:47 - Par [France-science](#)



Cent trente [molécules](#) avaient déjà été identifiées dans ce type de milieu mais elles étaient en général de petite taille, constituées de quelques [atomes](#) seulement. Les deux nouveaux composés sont quant à eux plus longs ; l'un, du propénal, comporte 8 atomes et l'autre, du propanal, 10 atomes.

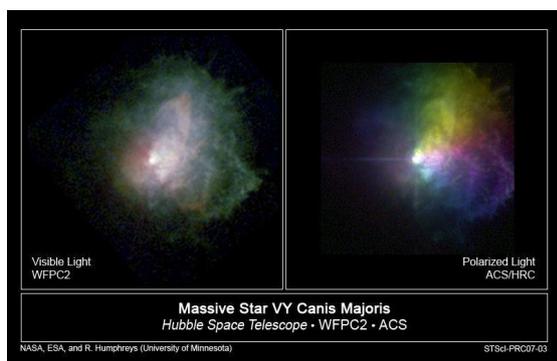
Tous deux ont été détectés dans la région du Sagittarius B2, à 26 000 années-lumière de la [Terre](#). Ces résultats, publiés dans l'Astrophysical Journal of Letters, vont sans doute aider les spécialistes à mieux comprendre la formation et la chimie, dans les [nuages interstellaires](#), de ces molécules organiques constituées de [carbone](#), d'hydrogène et d'oxygène. Certains pensent en effet qu'elles auraient pu être apportées sur notre planète par des [comètes](#) et ainsi contribuer à l'[émergence](#) de la vie.

<http://www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/actu/d/physique-decouverte-deux-nouvelles-molecules-voie-lactee-3949/>

## Des molécules indispensables à la vie produites par une étoile supergéante

### Des molécules indispensables à la vie produites par une étoile supergéante

Une équipe d'astronomes de l'université d'Arizona a mis en évidence une vingtaine de molécules, dont certains composés indispensables à la vie, dans l'atmosphère d'une étoile supergéante riche en oxygène.



### VY Canis Majoris et son nuage de gaz environnant, vus par le Hubble Space Telescope.

Cette découverte est aussi un paradoxe. Jusqu'ici, les astronomes pensaient que ce type de chimie se produisait exclusivement dans les nuages de gaz entourant de vieilles [étoiles](#) riches en [carbone](#). Mais VY Canis Majoris est un objet atypique. Distante de 5000 années-lumière, elle est environ un demi million de fois plus lumineuse que le [Soleil](#) mais brille essentiellement dans l'[infrarouge](#). Son volume est gigantesque, puisque placée au centre de notre [Système solaire](#), sa surface atteindrait l'[orbite](#) de [Jupiter](#), le tout pour une masse de 25 fois celle de notre [astre](#) du jour. Cette faible densité s'explique par le fait qu'il s'agit d'une étoile froide.



ailles comparées du Soleil (le petit point à gauche) et de VY Canis Majoris (à droite).

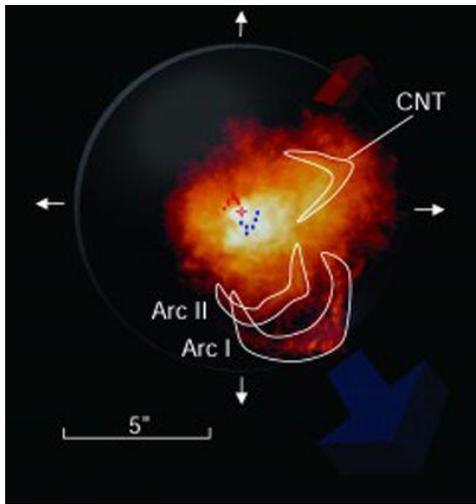
Arrivée en fin de vie, VY Canis Majoris perd rapidement de sa masse, et elle aura complètement disparu d'ici un million d'années, un clignement d'[œil](#) à l'échelle de l'Univers. Elle a déjà soufflé au loin la plus grande partie de son [atmosphère](#), qui renferme - et c'est là que ça devient intéressant - deux fois plus d'oxygène que de carbone.

### Un instrument encore expérimental

L'équipe d'astronomes, conduite par Lucy Ziurys, professeur d'astronomie et de chimie à l'Université de l'Arizona et directrice de l'[Arizona Radio Observatory](#) (ARO), a utilisé pour cette découverte un nouveau type de récepteur en cours de test en collaboration avec le *National Radio Astronomy Observatory*, et développé comme prototype pour l'*Atacama Large Millimeter Array*, un [radiotélescope](#) en construction au Chili. Cet appareil a la capacité d'augmenter la sensibilité d'une antenne d'un facteur dix.

Ce dispositif, dont les essais ne font que commencer, a permis d'identifier dans l'atmosphère éjectée par l'étoile une variété de composés chimiques inattendus, tels le NaCl, le PN, le HNC et le HCO<sup>+</sup>. Ces [molécules](#) peuvent être distinguées comme surgissant de trois régions cinématiques

distinctes : un écoulement sphérique, une expansion étroitement collimatée et décalée vers le bleu, et un écoulement dirigé et décalé vers le rouge.



Régions d'émission des molécules détectées. Crédit Arizona Radio Observatory.

Les molécules de SiO, PN et NaCl semblent provenir exclusivement de l'écoulement sphérique, tandis que les molécules de HNC et les composés soufrés, entre autres, paraissent issus des deux expansions, résultant peut-être des ondes de choc. CO, le HCN, le CS et le HCO+ peuplent chacune des trois régions.

Le HCN semble être aussi abondant que le CO, et cela en dépit d'un environnement particulièrement riche en oxygène, ce qui ouvre la voie à de nouvelles perspectives de recherches car ce milieu paraissait jusqu'ici incompatible avec l'élaboration d'une chimie organique complexe.

### Une véritable usine moléculaire

"A mon avis, personne n'aurait pu prévoir que VY Canis Majoris était une véritable usine moléculaire", déclare Lucy Ziurys. "Nous pensions tous que ce type de chimie ne se produisait que dans les nuages de gaz proches de vieilles étoiles riches en carbone", ajoute-t-il. "Mais quand nous

avons commencé à scruter étroitement pour la première fois un objectif riche en oxygène, nous avons immédiatement découvert toutes ces choses intéressantes qui n'étaient pas censées se trouver là".

Parmi les molécules mises en évidence, les plus intéressantes selon Ziurys sont le chlorure de [sodium](#), ou sel de table (NaCl); un composé de phosphore (phosphorus nitride - PN), qui contient deux des cinq ingrédients les plus indispensables à l'élaboration du vivant; des molécules de HNC, une variante d'une molécule organique, le cyanure d'hydrogène, et enfin une forme ionisée de [monoxyde de carbone](#), HCO+.

"Nous pensons que cette matière se répand ensuite dans le milieu interstellaire avant de se concentrer en des nuages denses qui sont à l'origine de nouvelles étoiles et de nouveaux [systèmes stellaires](#)", déclare Ziurys. Chaque année, les [comètes](#) et les [météorites](#) apportent sur [Terre](#) environ 40 000 tonnes de [poussière interstellaire](#), et selon Ziurys, sans ce processus, la vie basée sur le carbone n'aurait pu s'y développer car cet élément aurait été complètement épuisé lors de la formation de son atmosphère initiale à base de méthane.

"Les astronomes avaient déjà examiné VY Canis Majoris par des moyens optiques et infrarouges", ajoute-t-il, "mais c'était comme plonger dedans avec un couteau de boucher, alors que nous avons utilisé un scalpel de chirurgien", conclut-il, précisant que ces observations n'en sont qu'à leurs débuts et le procédé encore expérimental.

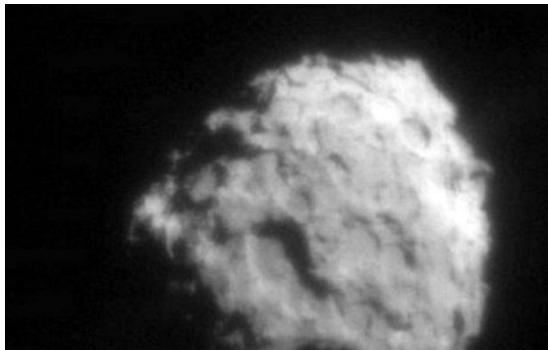
<http://www.futura-sciences.com/magazines/espace/infos/actu/d/astronomie-molecules-indispensables-vie-produites-etoile-supergeante-12474/>

## Des acides aminés d'origine extra-terrestre découverts sur une comète

### Pourquoi devons-nous explorer les comètes ?

- Ils ont conservé la composition du système solaire initial.
- Ils ont créé la Terre en y apportant eaux et minéraux.
- Ils ont tué nos concurrents, les Dinosaures!

### Des acides aminés d'origine extra-terrestre découverts sur une comète



Des acides aminés extra-terrestres ont été retrouvés sur des échantillons de la comète Wild 2. - HO/EPA/SIPA

P.N. avec agence

Mis à jour le 15.09.2014 à 12:12

Des astrobiologistes de la Nasa ont mis en évidence la présence d'acides aminés extra-terrestres sur des échantillons de [la comète Wild 2](#). Une première. Jamie Elsila, astrobiologiste à la Nasa, a déclaré que des acides aminés avaient déjà été trouvés sur des météorites mais jamais sur une comète.

En janvier 2004, ces échantillons avaient été prélevés dans la queue de la comète par la sonde Stardust de la Nasa à 390 millions de kilomètres de la Terre. Les [acides aminés](#) sont les constituants de base des protéines qui forment l'intégralité des organes, cellules et enzymes des organismes vivants. Ils existent sous une

vingtaine de formes différentes dans le code génétique.

### La piste d'ET

Ici, c'est la glycine qui a été identifiée sur la comète. Mais il a fallu «longtemps aux chercheurs pour s'assurer qu'elle ne provenait pas d'une contamination et qu'elle était bien d'origine extraterrestre», explique l'agence Reuters, qui enfonce le clou: «Cette découverte renforce l'hypothèse selon laquelle la vie [pourrait être d'origine extra-terrestre](#)».

De nombreux scientifiques pensent en effet que les premiers acides aminés seraient arrivés sur Terre à bord de météorites ou de comètes et auraient donc été à l'origine des êtres vivants sur la Terre mais également sur d'autres planètes.

<http://www.20minutes.fr/sciences/342147-20090818-acides-amines-origine-extra-terrestre-decouverts-comete>

### Des acides aminés découverts dans des échantillons de comète

mardi 18 août 2009 08h04



par Steve Gorman

LOS ANGELES (Reuters) - Des traces d'un acide aminé, la glycine, ont été découvertes pour la première fois sur une comète, ont annoncé lundi des scientifiques, selon lesquels cette découverte renforce l'hypothèse selon laquelle la vie pourrait être d'origine extraterrestre.

Les acides aminés sont les éléments constitutifs des protéines, et la glycine est le plus courant des vingt différents qui existent.

Ces traces de glycine ont été retrouvées dans les échantillons prélevés en janvier 2004 dans la queue de la comète Wild 2 par la sonde Stardust de la Nasa, à 390 millions de km de la Terre. Les échantillons étaient revenus sur Terre deux ans après à bord d'un caisson automatisé.

La présence de glycine avait été signalée dès l'an dernier, mais il a fallu longtemps aux chercheurs pour s'assurer qu'elle ne provenait pas d'une contamination et qu'elle était bien d'origine extraterrestre.

"Nous n'étions pas certains qu'elle ne venait pas de la fabrication ou de la manipulation de la sonde", a expliqué Jamie Elsila, astrobiologiste au Centre spatial Goddard de la Nasa, dans le Maryland.

Les travaux qu'elle a dirigés sont présentés dans la revue "Meteoritics and Planetary Science".

"Nous avons déjà trouvé des acides aminés dans des météorites, mais c'est la première fois qu'il en est détecté dans une comète", a-t-elle déclaré.

Les protéines, qui forment l'intégralité des organes, cellules et enzymes des organismes vivants, sont formées de chaînes d'acides aminés.

De nombreux scientifiques pensent que les premiers acides aminés auraient pu arriver sur Terre à bord de météorites ou de comètes, et que d'autres planètes dans l'univers auraient pu être "ensemencées" de la même manière.

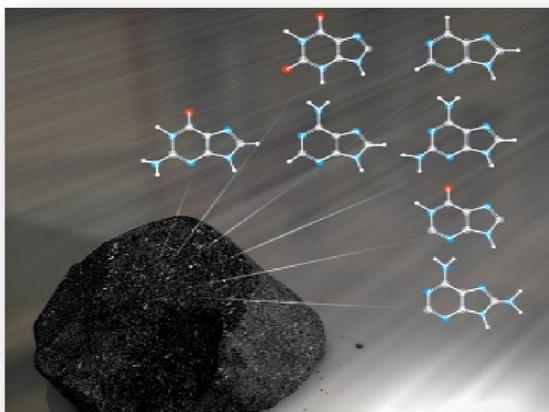
"La découverte de glycine dans une comète renforce l'idée selon laquelle les briques fondamentales de la vie sont répandues dans l'espace, et était l'argument selon lequel la vie pourrait être bien plus répandue dans l'univers qu'on ne le pense", a estimé Carl Pilcher, directeur de l'Institut d'astrobiologie de la Nasa en Californie.

Version française Gregory Schwartz

<http://fr.reuters.com/article/idFRPAE57H01M20090818?pageNumber=2&virtualBrandChannel=0&sp=true>

## Des morceaux d'ADN dans les météorites

### Des morceaux d'ADN dans les météorites



**Les météorites renferment des morceaux d'ADN, elles pourraient donc avoir apporté la vie sur Terre. Crédit: NASA's Goddard Space Flight Center/Chris Smith**

Cette fois, on en est certain: des météorites abritent bien des molécules organiques, premières briques de la vie. Celle-ci pourrait donc avoir été importée sur Terre dans les premiers âges par un [bombardement d'astéroïdes](#), sous forme de molécules organiques qui en interagissant auraient peu à peu formé des molécules plus complexes, de l'ADN, puis des cellules, puis, bien plus tard, l'homme !

Ce n'est pas la première fois qu'une telle nouvelle est annoncée. Mais à chaque fois, un doute subsistait : comment être sûr qu'il ne s'agit pas bêtement de ces molécules qui abondent sur la Terre, et qui auraient contaminé la météorite au fil des années ?

### Une contamination terrestre peu probable

Jim Cleaves, du Laboratoire de Géophysique de Carnegie, a répété l'expérience dans 12 échantillons de météorites, trouvées pour la plupart dans la glace de l'Antarctique. Bilan :

de l'adénine et de la guanine, constituants de base de l'ADN. Mais surtout... des traces de purine. Celles-ci ressemblent aux bases azotées de l'ADN, mais n'interviennent absolument pas dans la chimie du vivant. Alors pourquoi le signaler ? C'est quelles sont rarissimes sur Terre ! Ce serait une coïncidence incroyable que les [météorites](#) soient tombées pile sur un endroit contenant ces molécules ! La découverte de ces molécules parmi toutes les autres tend à prouver qu'elles proviennent toutes bien de la météorite, et non d'une contamination terrestre.

Mais les coïncidences existent. Les chercheurs ont donc analysé la glace et le sol où les météorites ont été découvertes. S'ils ont trouvé de la guanine et de l'adénine en proportion bien plus faible que dans la météorite, pas la moindre molécule de purine !

### Astéroïdes en laboratoire

Pour enfoncer le clou, ils ont reproduit en laboratoire les conditions chimiques qui règnent dans un [astéroïde](#). A partir de cyanure d'hydrogène, d'ammoniac et d'eau, et ont réussi par cette technique à synthétiser toutes les nucléobases citées précédemment.

Au final, ce triple succès renforce l'idée selon laquelle les premières molécules importantes pour le développement de la vie auraient été apportées dans l'océan primordial terrestre par les astéroïdes, en un mot : que la vie serait tombée du ciel.



<https://www.youtube.com/watch?v=1g7AKVZ3HC4>

(Des sous-titres en Français sont disponibles en cliquant sur cc)

<http://www.cieletespace.fr/node/7630>

## Du sucre détecté autour d'étoiles en formation !

### Du sucre détecté autour d'étoiles en formation !

Une molécule de sucre, précurseur de l'ARN, vient d'être découverte dans un nuage de gaz et de poussières dans lequel des étoiles sont probablement en train de naître. C'est la première fois que l'on détecte ce genre de molécule organique là où peuvent se former des planètes.

Le 30/11/2008 à 16:01 - Par Jean Etienne, [Futura-Sciences](#)



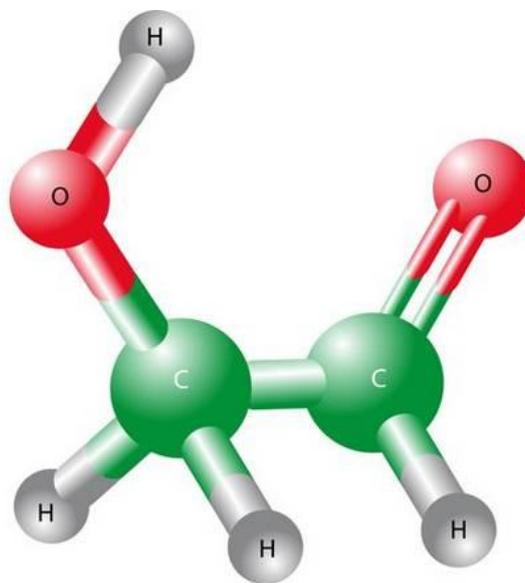
### Le radio-interféromètre du plateau de Bure. Crédit IRAM

De nombreuses [molécules organiques](#) (c'est-à-dire à [squelette de carbone](#)) ont été découvertes dans l'espace, au sein de nuages de gaz ou dans des [météorites](#) tombées sur [Terre](#). La liste est longue et inclut des [hydrocarbures](#), de l'[adénine](#) (composant de l'[ADN](#)), des sucres et des [acides aminés](#), autant de composés qui caractérisent la vie terrestre.

Mais jusqu'à présent, aucune [molécule](#) organique n'avait été détectée dans des nuages de gaz et de poussières entourant des [étoiles](#) en formation. Il manquait donc la preuve que cette chimie fabriquant ces molécules dans des nuages de gaz chauds pouvait aussi se dérouler dans un système planétaire en train de se constituer.

C'est ce [chaînon manquant](#) qui vient d'être découvert grâce au radio-interféromètre Iram du Plateau de Bure (France), par une équipe européenne (M. T. Beltran, département d'Astronomie de l'Université de Barcelone, C. Codella, Institut de Radioastronomie de Florence, S. Viti, département de Physique et d'Astronomie du *University College London*, R. Neri, Iram, et R. Cesaroni, Observatoire d'[Astrophysique](#) de Florence). Leurs résultats viennent présentés dans [Science & Technology](#).

Ces chercheurs ont mis en évidence trois raies d'[absorption](#) principales à 1,4, 2,1 et 2,9 millimètres au cœur du nuage de gaz et de poussières, baptisé G31.41+0.31, situé à 26.000 années-lumière de la Terre et considéré comme une vaste région d'étoiles en formation. Mais d'autres raies ont été découvertes, en particulier un pic d'[émission](#) correspondant à la molécule de glycolaldéhyde.



Une molécule de glycolaldéhyde,  $\text{CH}_2\text{OH}-\text{CHO}$ , un sucre monosaccharide, ou "ose", c'est-à-dire un monomère, par opposition aux glucides formés de plus de deux atomes de carbone (trioses, tétroses, pentoses...). Source *Commons*

Le glycolaldéhyde, de formule  $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$  est le plus simple des sucres [monosaccharides](#).

Il peut réagir avec un autre sucre pour former le [ribose](#), épine dorsale de l'[ARN](#) (de même que le [désoxyribose](#) forme le squelette de l'ADN).

Ce sucre avait déjà été mis en évidence plusieurs fois près du centre galactique entre 2000 et 2008. Cette nouvelle observation, loin du centre de la [galaxie](#), suggère que la production de cet élément essentiel à la vie pourrait être commune à toute la galaxie. Il s'agit donc d'une bonne nouvelle pour la recherche d'une forme de vie extraterrestre.

Cette observation confirme que, à l'instar du glycolaldéhyde, certains éléments fondamentaux de la vie sont bien d'origine extraterrestre et répandus en abondance dans l'espace. Il est même vraisemblable que ces molécules se soient formées au niveau des [systèmes stellaires](#) bien avant l'apparition des planètes susceptibles d'accueillir la vie, demeurant inaltérées dans ces régions froides avant d'ensemencer les planètes dès le début de la solidification de leur croûte par le biais des [comètes](#). *« La découverte d'une molécule de sucre autour d'une étoile en formation est passionnante, commente Keith Mason, directeur du STFC (Science and Technology Facilities Council), et fournira des informations utiles pour la recherche d'une vie extraterrestre ».*

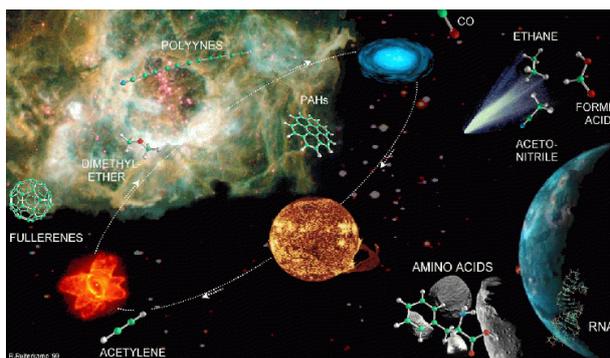
<http://www.futura-sciences.com/magazines/espace/infos/actu/d/astronomie-sucre-detecte-autour-etoiles-formation-17474/>

## L'adénine du premier ADN : une origine extraterrestre ?

L'adénine du premier ADN : une origine extraterrestre ?

L'adénine est une des molécules fondamentales de la Vie puisque c'est une des quatre bases azotées composant l'ADN et l'ARN (5 si l'on compte l'uracile dans l'ARN). Depuis les travaux de R.Shapiro, sa synthèse dans les conditions de la soupe prébiotique primitive, selon un mécanisme du genre proposé par Miller et Oparine, semble peu probable. Des chimistes de l'Université du Missouri ont peut-être résolu l'énigme : l'adénine serait synthétisée massivement dans l'espace à l'intérieur des nuages moléculaires.

Le 29/08/2007 à 11:35 - Par Laurent Sacco, Futura-Sciences



En 1993, Robert Shapiro de l'université de New York publie un article dans lequel il argue que les propriétés chimiques de l'adénine cadrent mal avec une supposée large disponibilité dans les conditions pré-biotiques et avec sa participation aux premiers mécanismes de réplifications.

Si l'on reprend son analyse à propos de cette molécule de formule brute  $C_5H_5N_5$ , et appartenant à la famille des purines, alors on est en effet amené aux conclusions suivantes :

- La synthèse de l'adénine par oligomérisation du cyanure
- 

d'hydrogène (HCN) demande des concentrations d'HCN voisines de 0,01

M. C'est peu crédible étant donné l'environnement de la Terre primitive ;

- L'adénine s'hydrolyse facilement.

Difficile d'imaginer son apparition dans l'océan primitif en grandes quantités.

### Une solution possible pour la synthèse de l'adénine

Rainer Glaser et ses collègues proposent donc une origine extraterrestre. L'adénine serait essentiellement synthétisée dans l'espace et c'est le bombardement intense des micrométéorites et des comètes, ayant eu lieu au début de l'histoire du système solaire, qui aurait apporté les précieuses molécules en quantité suffisante sur Terre. De fait, on trouve de l'adénine dans certaines météorites : c'est par exemple le cas de la météorite de Murchison, une chondrite carbonée contenant 230 composés organiques, dont 92 acides aminés.



La météorite de Murchison.

Comme Glaser, Brian Hodgen (Creighton University), Dean Farrelly (University of Manchester) et Elliot McKee (St. Louis University) l'expliquent dans l'article du journal "Astrobiology" et intitulé "Adenine Synthesis in Interstellar Space: Mechanisms of Prebiotic Pyrimidine-Ring Formation of

*Monocyclic HCN-Pentamers*", les conditions particulières régnant dans les nuages moléculaires, riches en HCN et grains de poussières, peuvent conduire à la fabrication de la quantité d'adénine exigée à partir de la suite de réactions dont ils ont fait l'étude détaillée.

Il a fallu pour cela mobiliser les outils de la chimie [numérique](#) sur [ordinateur](#) avec la fameuse théorie des perturbations de [Møller-Plesset](#) en chimie quantique.

<http://www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/actu/d/c/himie-adenine-premier-adn-origine-extraterrestre-12664/>

## L'eau vient des Comètes

### Comètes: des corps "chevelus" de mieux en mieux compris

#### Comètes : des corps "chevelus" de mieux en mieux compris

AFP le 07/11/2014 à 11:44



La comète 67P/Churyumov-Gerasimenko prise en photo quand Rosetta était à 28,6 km d'elle (ESA/ROSETTA/NAVCAM/AFP/Archives)

Les comètes ont longtemps fait peur: on les pensait annonciatrices de catastrophes (éruptions volcaniques, épidémies, guerres, famines). Mais elles suscitent désormais un véritable engouement populaire à mesure que les sondes spatiales leur donnent un visage.

Le mot comète vient du grec Komê qui signifie chevelure.

Une comète est un petit corps du système solaire constitué d'un noyau fait de glace, de matériaux organiques et de roches, et entouré de poussières et de gaz. On dit souvent que la comète ressemble à une "boule de neige sale".

Sa trajectoire souvent fortement elliptique passe périodiquement à proximité du Soleil, comme c'est le cas de Tchourioumov-Guérassimenko actuellement.

Lorsque la comète approche de l'astre, les glaces se transforment en gaz et les molécules gazeuses s'échappent du noyau sous forme de jets, explique à l'AFP l'astrophysicien Francis Rocard, responsable du programme Rosetta au CNES (Centre national d'études spatiales), l'agence spatiale française.

Ces jets puissants entraînent des grains de poussières conduisant à la formation d'un nuage de poussières et de gaz (la fameuse "chevelure" ou "coma").

Les molécules sont ensuite cassées et ionisées et sont alors entraînées par le vent solaire produisant une traînée lumineuse, la "queue d'ions".

"La pression de radiation induite par les photons du Soleil, pousse les petits grains de poussière, produisant une deuxième queue constituée de poussières", poursuit M. Rocard.

Les comètes captivent les scientifiques parce qu'ils pensent qu'elles ont pu apporter de l'eau et des molécules carbonées sur la Terre, contribuant ainsi à l'apparition de la vie sur la planète bleue.

En'86, six sondes spatiales ont survolé la célèbre comète de Halley. La sonde européenne Giotto a révélé que sa surface était plus noire que le charbon.

Depuis, d'autres comètes ont été survolées et "cartographiées": Borrelly (2001), Wild 2 (2004), Tempel 1 (2005 et 2011) et enfin Hartley 2 (2010).

La comète 67P Tchourioumov-Guérassimenko est la sixième à livrer une partie de ses secrets.

<http://www.boursorama.com/actualites/cometes-des-corps-chevelus-de-mieux-en-mieux-compris-a3165607c470597199ad83525b08d5b6>

## Une molécule inattendue découverte dans l'espace interstellaire

### Une molécule inattendue découverte dans l'espace interstellaire

vendredi 3 octobre 2014



Grâce au radiotélescope géant ALMA basé au Chili, des astronomes allemands et américains ont découvert l'existence d'une molécule carbonée étonnamment complexe dans un nuage de gaz interstellaire. Crédits : Y. Beletsky/ESO

Une molécule carbonée étonnamment complexe a été découverte dans un nuage de gaz interstellaire situé à 27 000 années-lumière de la Terre. Ce résultat suggère que les molécules complexes nécessaires à l'apparition de la vie peuvent se former dans l'espace interstellaire.

C'est une molécule à la configuration pour le moins inattendue qui vient d'être découverte à 27 000 années-lumière de la Terre, dans la région du nuage de gaz Sagittarius B2. Et pour cause, puisque cette molécule carbonée, connue sous le nom d'isopropyl cyanide ( $1-C_3H_7CN$ ), est dotée d'une structure dotée d'un embranchement (une sorte de ramification formant une patte d'oie).

En quoi est-ce si étonnant ? C'est que jusqu'à présent, les molécules carbonées qui avaient été détectées dans l'espace interstellaire étaient moins complexes : elles se caractérisaient généralement par un alignement des atomes de carbone les uns à la suite des autres, un peu comme les maillons d'une chaîne, et non par une structure ramifiée comme c'est le cas de l'isopropyl cyanide.

Cette découverte, effectuée depuis l'observatoire ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) au Chili par des astronomes allemands et américains (Institut Max Planck de Bonn, université de Cologne et université Cornell aux États-Unis), a fait l'objet d'une publication le 26 septembre 2014 dans la revue Science, sous le titre "[Detection of a branched alkyl molecule in the interstellar medium: iso-propyl cyanide](#)"

Or, cette découverte est de la plus haute importance pour les exobiologistes, car elle suggère que les molécules complexes indispensables à la vie peuvent se former dans l'espace interstellaire. En effet, la structure de l'isopropyl cyanide correspond à celle des molécules nécessaires à l'émergence de la vie, comme les amino-acides, lesquelles sont en quelque sorte les "briques élémentaires" des protéines.

Ce résultat renforce donc l'hypothèse selon laquelle les molécules cruciales pour l'apparition de la vie, comme les amino-acides qui sont souvent retrouvés sur les météorites, sont fabriqués très précocement dans le processus de formation des étoiles, avant même que les planètes comme la Terre ne se forment.

Ces travaux ont été publiés le 26 septembre 2014 dans la revue Science, sous le titre "[Detection of a branched alkyl molecule in the interstellar medium: iso-propyl cyanide](#)"

<http://www.journaldelascience.fr/espace/articles/molecule-inattendue-decouverte-lespace-interstellaire-4147>