

Comètes, astéroïdes et apparition de la vie

Philippe Jamet



La nécessité d'élaborer des stratégies préventives pour faire face aux impacts d'astéroïdes ou de comètes, représente un véritable défi à la vie. C'est un argument complémentaire non négligeable aux justifications traditionnelles relatives à l'extension des activités humaines hors de sa biosphère. Cette démarche pourrait bien, à très long terme, conduire l'espèce humaine à élargir le champ de ses activités jusqu'au niveau de la Galaxie...

L'homme a toujours été émerveillé par le ballet cosmique qui se déroule sur des volumes et des distances considérables, et dont la trame temporelle s'écoule sur des milliards d'années, générant des processus de plus en plus complexes. Aujourd'hui, grâce aux découvertes scientifiques les plus modernes, nous commençons à rendre visible le fil qui relie la nature profonde du Cosmos au phénomène d'apparition de la vie, puis de l'intelligence. Apparemment et au premier abord, il n'y a rien de bien significatif qui puisse faire considérer que l'effondrement d'un nuage de poussières et de molécules interstellaires donnant naissance à une étoile et à son cortège planétaire, l'existence de plus en plus probable d'une chimie prébiotique dans l'espace, l'apparition sur une planète de formes de vie primitives de type procaryote (à cellule sans noyau), le phénomène que nous connaissons sous forme d'astéroïdes et de comètes, ou bien encore l'apparition de la science et de la technologie chez l'homme, constituent à chaque fois en eux-mêmes, de façon « aveugle » ou raisonnée, des processus participant à une même « construction » !

On peut d'ailleurs affirmer que l'existence préalable « d'ingrédients » et de « lois » n'implique pas forcément l'apparition de la vie et que celle-ci ne débouche pas automatiquement sur l'intelligence. D'autre part, le développement vers des processus de croissance et de complexité en matière d'organisation peut être interrompu soit par des événements aléatoires, soit par des phénomènes endogènes, conséquences, eux aussi, de ces ingrédients et de ces lois. Dans l'état actuel de nos faibles connaissances en matière d'exobiologie, il ne nous est possible de raisonner que sur un seul exemple, à savoir notre système solaire et notre planète Terre. Mais l'examen rétrospectif de la façon dont il s'est constitué, en étant lui-même en permanence un élément d'une chaîne de résonance qui implique de porter notre réflexion jusqu'au niveau galactique ainsi que l'examen des « crises de la vie » et des régressions de celle-ci où interviennent indiscutablement des phéno-

mènes cosmiques, tendraient à prouver que la vie, est et a toujours été suffisamment forte pour parer à toutes les agressions dont elle a été l'objet. Cette « victoire » se gagna quelque fois au prix d'une sorte de « mise en veilleuse » durant un laps de temps comparable à l'intervalle entre l'apparition des premiers hominiens et le lancement du Spoutnik.

Souvent sur le point de disparaître, ou réduite pendant plusieurs centaines de milliers d'années à des espèces soit plus primitives, soit en apparence plus « chétives » que celles qui les avaient précédé, la vie sur Terre, à la manière de la flamme d'un feu quasi-éteint et se rallumant brusquement, est à chaque fois repartie vers des formes d'organisation supérieures et plus sophistiquées que celles qui dominaient auparavant...

L'on peut considérer l'homme, avec son intelligence, sa science et sa technologie et depuis peu une réelle capacité d'intervention hors de sa biosphère, comme le produit le plus élaboré de ce « rallumage de flamme ». Plus intéressant encore, il a pu, grâce à quelques pionniers de l'astronomie cométaire et aux premiers débarquements habités sur la Lune, comprendre pleinement la nature profonde du phénomène des comètes et des astéroïdes. C'est ainsi qu'il s'offre, dès à présent et pour la première fois, la possibilité d'imaginer des stratégies d'intervention sur cet Univers, au prix de tout un arsenal technologique dont l'une des nombreuses justifications est sa survie !

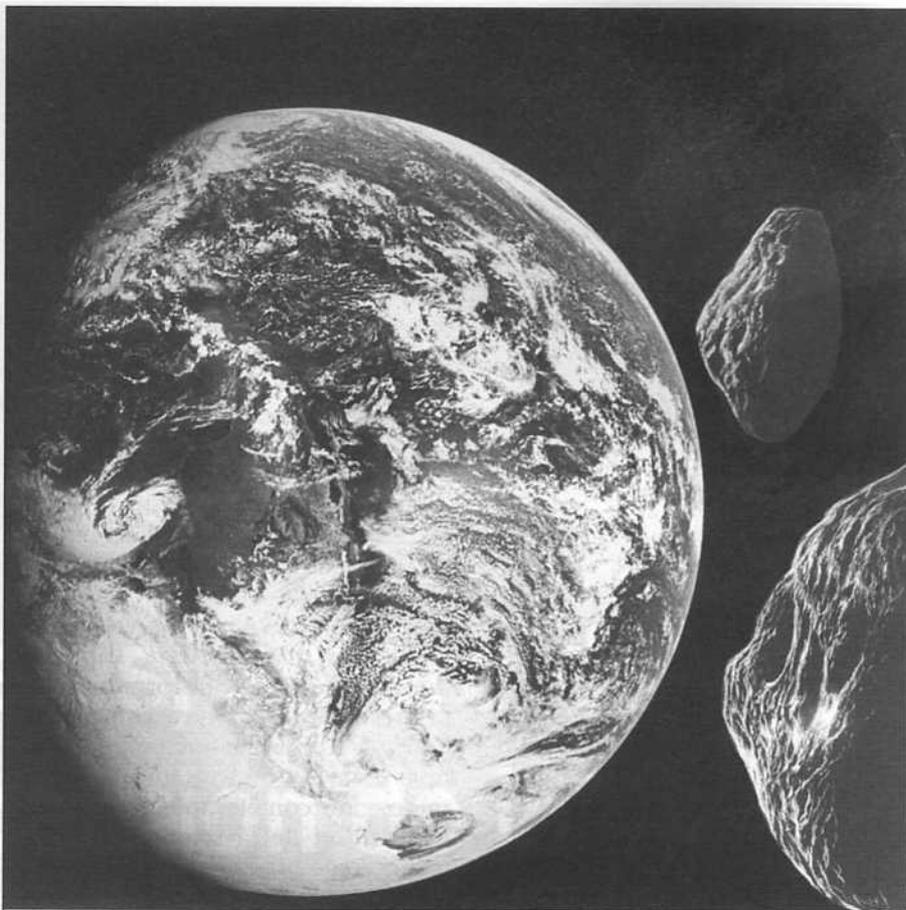
Il semble pour le moins curieux que cet Univers puisse avoir contenu au départ tous les ingrédients permettant une lente, chaotique et discontinue, mais inévitable évolution vers l'émergence d'une créature capable d'intervenir à son tour sur l'Univers lui-même, mais c'est un fait qu'il nous est bien difficile de nier. Ceci implique de rejeter toute causalité retenante le « Hasard » comme déterminant majeur du processus vital, même si les conditions permettant l'émergence de la vie à partir d'une chimie prébiotique sont peut-être rarement réunies aussi favorablement que sur Terre. Toutefois, le fait que

notre Soleil (de catégorie spectrale G2) ne soit qu'une étoile tout à fait « ordinaire » d'une galaxie de type courant (laquelle compte environ 100 milliards d'étoiles, dont au moins 40 milliards de type solaire) conforte l'hypothèse selon laquelle un tel processus se soit reproduit ailleurs dans le passé ou se déroule actuellement sur quelques planètes d'étoiles. Rejeter cette hypothèse reviendrait en fait à considérer l'émergence de la vie sur Terre comme un « accident »... Il n'est pas non plus interdit de considérer que le démarrage de processus vitaux ayant caractérisé la Terre soit le seul possible : de récentes expériences effectuées par Bertrand Rowe (et citées par notre confrère *Science&Vie* dans son numéro de mai 1995) renforcent les découvertes de scientifiques russes et néerlandais*, laissant même entrevoir la possibilité que des processus vitaux primitifs aient pu démarrer dans le milieu spatial lui-même.

C'est ce processus global — naissant dans le milieu spatial, se poursuivant en milieu planétaire avec un ensemencement permanent de molécules organiques à partir des comètes et des astéroïdes, et aboutissant à l'intelligence — que nous allons tenter d'expliquer. Il se pourrait bien qu'il y ait une suite logique et chronologique, ponctuée de multiples étapes se déroulant sur plusieurs milliards d'années, entre la formation des molécules du Cosmos et l'existence de cerveaux capables d'agir en dehors de leur biotope. Tout ne serait finalement qu'une question de *temps de gestation...* et cette idée s'accorde parfaitement avec les notions d'espace et de temps qui caractérisent l'Univers !

Rôle catalyseur des impacts cosmiques

D'une certaine manière, le long chemin qui va nous mener de la chimie prébiotique (étape de formation de molécules complexes et intermédiaire entre l'inanimé et le vivant) jusqu'à l'homme revêt presque un caractère « inévitable », à partir du moment où d'autres acteurs (in-



Astéroïdes croisant la Terre. Il semble bien que notre histoire terrestre soit intimement liée à des impacts d'astéroïdes et de noyaux cométaires, ayant parfois entraîné des événements catastrophiques.

ternes et externes) ne viennent pas entraver le processus. En fait, la montée en puissance du processus vital ne pourrait bien être que la résultante, à un niveau toujours supérieur, d'un certain nombre « d'apports », de « constructions », de « stimulants » et de « réponses » agissant, parfois avec rétroactivité, les uns sur les autres par l'intermédiaire de chaînes de résonance. Au sein de celles-ci, les astéroïdes, et plus encore les comètes, joueraient tout à la fois le rôle « d'accélérateurs », de « freins temporaires » et de « défis » pour la vie. Elles contraignent la vie, sous peine de régressions, à prendre des virages à angle droit, caractérisés à chaque fois

* Travaux réalisés dans les années 80 par le Russe Goldanskii et ses collaborateurs (Barkalov, Kaplan, Kiryukhin) et les Néerlandais Allamandola et Greenberg sur la « chimie du froid extrême » en milieu spatial.

par des niveaux supérieurs d'organisation et d'utilisation de l'énergie.

Ces objets cosmiques sont au cœur d'un certain nombre d'interrogations portant sur des points d'importance fondamentale concernant l'apparition de la vie en milieu terrestre. Mais, celle-ci est-elle uniquement « endogène » et issue de processus ayant fait appel à des matériaux chimiques provenant du milieu terrestre, ou bien est-elle en partie « exogène », c'est-à-dire ayant bénéficié de l'apport de matériel organique en provenance des espaces interstellaires (nuages denses de poussières et de molécules). En effet, des comètes passant à proximité de la Terre et dont la queue balaie les couches supérieures de notre atmosphère, auraient-elles ensemencé le milieu terrestre de molécules complexes ? Ces molécules auraient-elles trouvé dans ce milieu des conditions favorables à un

développement vers des processus d'organisation et de réplication débouchant, dans un premier temps, sur des organismes primitifs ?

De nombreux fossiles procaryotes (sous forme d'algues bleues et d'archéobactéries) ont été retrouvés dans des gisements de stromatolithes, en 1954 par Tyler et Barghoorn au Canada, puis, plus récemment, à North Pole (Australie) par les Américains Schopf et Awramik et les Australiens Groves, Dunlop et Buick. De telles structures ont été également retrouvées dans la région parisienne par l'équipe de Philippe Blot, dans les parties supérieures des marnes d'Argenteuil (dites « Ludien du Vaujours »). A ce jour, le gisement de North Pole semble être celui qui contient les plus anciens microorganismes connus, puisque son âge a été estimé entre 3,5 et 3,8 milliards d'années par datation radio-isotopique* Samarium 147-Néodyme 143. Parmi les

plus anciens microorganismes découverts figurent également des bacilles (*Eobacterium Isolatium*) identifiés en 1966 par Schopf et Barghoorn dans le gisement de Fig Tree au Swaziland. Cependant, au-delà de 3,5 milliards d'années, et dans les roches sédimentaires les plus anciennes (roches formées par « dépôts » sur le fond des lacs et des océans), il n'existe que de rares présomptions entachées d'incertitudes sur la présence d'organismes plus anciens. On peut expliquer cette « absence » par le fait que ces éventuels organismes ultra-primitifs auraient été détruits par les différents mouvements et processus de formation et destruction affectant la géologie terrestre, et particulièrement les roches sédimentaires. Il faut signaler également qu'à cette époque de formation des stromatolithes, l'atmosphère terrestre n'était pas encore oxy-

* Méthode prenant en compte la « demi-vie » d'un certain nombre d'éléments contenus dans les roches et dont on connaît à peu près la vitesse de désintégration dans le temps.



Stromatolithes du Minnesota. De nombreux fossiles procaryotes (sous forme d'algues bleues et d'archéobactéries) ont été retrouvés dans des gisements de stromatolithes.

génée. Donc, une hypothèse à prendre en compte est que les organismes antérieurs à 3,8 milliards d'années n'ont pas pu tolérer et s'adapter progressivement à une atmosphère oxygénée (contrairement à d'autres organismes plus évolués avec lesquels ils ont coexisté) et se seraient ainsi, peu à peu dissous sans laisser de traces sur l'environnement. On peut supposer également qu'ils ont été dévorés par les nouveaux organismes en gestation, pour lesquels ils auraient constitué des « proies de choix ». Il serait très intéressant de pouvoir un jour avoir une réponse définitive à cette irritante question et d'être en mesure de comparer ce que l'on croit savoir de ces premiers organismes avec certaines découvertes effectuées sur des résidus d'impacts cosmiques dans diverses parties du monde...

Cette idée selon laquelle la vie terrestre a pu être fortement favorisée par l'apport de matériel organique et d'eau venus des comètes et des astéroïdes est actuellement partagée par la plupart des spécialistes. Citons

notamment le cas de François Raulin, du Belge Armand Delsemme (pour qui 95% de l'eau terrestre viendrait des comètes) et de l'Américain Frank selon lequel des centaines de millions de mini-comètes, se dissociant en haute atmosphère sous l'effet de l'échauffement et des forces de gravitation tout au long de notre histoire terrestre, auraient apporté l'essentiel du matériel organique.

Aujourd'hui il ne fait guère de doute que les thèses traditionnelles sur l'atmosphère primitive imaginées par Oparin et Haldane (composée majoritairement d'hydrogène, de vapeur d'eau, d'ammoniac et de méthane pour le premier, d'ammoniac, de dioxyde de carbone et de vapeur d'eau pour le second), même si elles ont le mérite d'avoir induit la plupart des recherches ultérieures, ne correspondent que très imparfaitement à la réalité. Ces hypothèses avancent que l'atmosphère terrestre originelle était de type « réductrice », c'est-à-dire capable de « provoquer » quasi-naturellement, avec l'apport d'une source d'énergie qui aurait pu être le rayonnement UV solaire, la formation des « bases architecturales de la vie », tels les acides aminés. Ainsi, la Terre primitive, grâce à la présence d'ammoniac et de méthane (condition impérative à la formation de molécules complexes puis d'une chimie prébiotique), aurait contenu en elle-même tous les ingrédients permettant le passage de l'inanimé au vivant. On peut toutefois se demander pourquoi la Terre aurait été la seule planète tellurique à disposer de cette spécificité et les modèles admis de formation du système solaire et les découvertes des astrophysiciens vont plutôt contre cette thèse !

En effet, il ne faut pas oublier que notre système solaire (dont l'âge est estimé à 5 milliards d'années) n'est pas encore « stabilisé » à l'époque de

la formation de la jeune Terre par accrétion de « planétésimaux » et que notre étoile centrale, émergeant à peine du stade de « T-Tauri », est particulièrement instable et énergétiquement très active. De ce fait, le Soleil a déjà éliminé massivement la plupart des éléments volatils contenus dans les franges internes du nouveau système planétaire de la nébuleuse primitive et, de Mercure jusqu'à Mars, méthane et ammoniac, « vecteurs chimiques indispensables », n'existent plus qu'en petites quantités sur ces planètes, contenus à titre « résiduel » dans des poches souterraines ou piégés par les roches. Par contre (et du fait de la filiation certaine entre les éléments contenus dans les comètes et les nuages de poussières et de molécules interstellaires), on sait aujourd'hui qu'il existe des quantités non négligeables de ce méthane et de cet ammoniac dans les noyaux cométaires. A l'époque de la formation de la Terre, le ciel est sillonné en permanence par des milliers de comètes et le phénomène de collision avec celles-ci (révélé par le programme Apollo) n'est aussi courant que la pluie et les averses en bocage normand ou en verte Irlande ! Et la violence des impacts avec les planètes telluriques et la Terre est telle, et le dégagement d'énergie tellement incroyablement à cause de la vitesse d'arrivée des noyaux cométaires sur des orbites excentrées, que la plupart de ces composants sont *détruits* de façon instantanée, comme l'a montré Michel Combes dans sa thèse d'Etat en 1979. Il n'y a pourtant pas de doute que ces impacts laissent à chaque fois pratiquement intacts (par éjection avant arrivée à terre), une fraction infime (peut-être moins de 0,005%) de ces composants cométaires (grains et molécules complexes en partie dissociés, méthane et ammoniac) nécessaires au démarrage de la chimie prébiotique. Ce schéma n'explique qu'*imparfaitement* la quantité probable et nécessaire de matériau organique dont a bénéficié la Terre et donne toute sa valeur à la thèse de Frank sur les mini-comètes.

Cette thèse apparaît plausible si l'on tient compte des effets conjugués de la gravité terrestre et de la mécanique céleste. Il est, en effet,



Nébuleuse à tête de cheval. Une des découvertes les plus fantastiques de l'astronomie contemporaine vient de la mise en évidence, au sein de nuages de molécules et de poussières interstellaires, d'éléments complexes qui semblent indispensables au démarrage des processus vitaux.

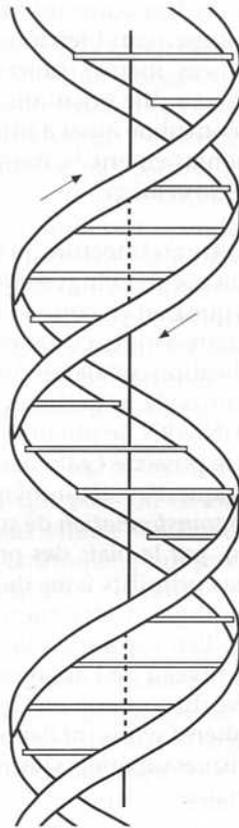
fort probable que nombre de mini-comètes sont arrivées en partie disloquées au niveau de l'orbite terrestre et tangentiellement aux couches atmosphériques. Si la comète (ou ce qu'il en reste) arrive suffisamment vite pour éviter d'être captée par la gravité terrestre et bénéficier de l'effet bien connu de « levier gravitationnel » qui va l'accélérer, son noyau peut partiellement se rompre en laissant derrière lui une fantastique queue de molécules, lesquelles vont se fondre dans l'atmosphère terrestre avant d'avoir été dissociées et détruites par le rayonnement UV et la chaleur solaire, puis « descendre » peu à peu vers la surface terrestre. Si la comète arrive moins vite au même point, c'est la gravité terrestre qui l'emporte et alors la mini-comète « explose » dans la haute atmosphère : la quantité de matériau organique détruite est plus grande mais la masse résiduelle susceptible d'atteindre la surface terrestre n'est pas non plus négligeable.

La validité des thèses de Frank nous semble renforcée par une découverte étonnante qui a été effectuée lors de l'observation de comètes en phase « dégazage », au fur et à mesure qu'elles s'approchent du Soleil. Les astrophysiciens ont souvent manifesté leur désappointement devant les quantités infimes de carbone et d'azote dé-

tectées dans les queues cométaires car ils s'attendaient à y en trouver de grandes quantités à l'état « réduit » et liés à des atomes d'hydrogène sous forme de méthane (CH₄) et d'ammoniac (NH₃). C'est pourquoi ils attendaient beaucoup des missions relatives à la comète de Halley. Leur déception fut grande. Les appareils embarqués sur les sondes ne détectèrent pour cette comète que 1,5% d'ammoniac et 2% de méthane. Prises telles quelles, ces mesures auraient pu faire croire à la difficulté de « réarrangement » des molécules de carbone et d'azote, dans le cadre des réactions chimiques qui prédominent au niveau des parties externes très froides de la nébuleuse primitive, et où la formation sur les « grains » et l'effet « tunnel » compensent les modes de formation moléculaire traditionnels. Partant de l'hypothèse selon laquelle il y avait analogie entre comètes et nuages interstellaires et réalisant des simulations en laboratoire, ce sont les scientifiques néerlandais Allamandola et Greenberg qui ont trouvé la solution, lourde d'implications pour ce qui concerne l'apport de molécules complexes sur Terre par les objets cométaires. D'après eux, ce « manque de carbone » des noyaux cométaires ne serait qu'apparent. Celui-ci serait caché au niveau des noyaux cométaires sous forme d'une subs-

tance très résistante, mise en évidence lors de travaux effectués à l'Université de Leyden, et capable de résister longtemps sans dislocation aux conditions extrêmes du milieu spatial (froid et chaud) ou d'une pénétration dans une atmosphère. Les mêmes travaux ont également montré que ce matériau cométaire étonnant s'associait probablement *in situ* avec de l'hydrogène et des radicaux pour former des « molécules-étapes » vers une complexité supérieure de type « glyoxal » ou « formaldéhyde », grâce à l'action des rayons UV solaires, confirmant une hypothèse qui avait été émise auparavant par l'Américain Burkerman. Or il semble bien que cette « chimie du froid extrême », par des processus faisant appel aux lois de la physique quantique, puisse évoluer sur un temps relativement long vers des chaînes de type amidon et cellulose. L'hypothèse selon laquelle les comètes ont accéléré le processus de démarrage de la vie sur Terre se trouve ainsi renforcée. Et d'autres faits, allant dans le même sens, sont également troublants. Tout d'abord, si les modèles d'atmosphère d'Oparin et d'Haldane sont aujourd'hui rejetés au profit d'un modèle d'atmosphère primitive constituée seulement de dioxyde de carbone et d'azote, il apparaît que ce modèle n'aurait pu permettre le développement des « briques de la vie » sans apport extérieur pour opérer sa *transformation*... Les simulations montrent, en effet, qu'un tel type d'atmosphère constitue un obstacle pour le maintien de l'eau à l'état liquide et la formation d'acides aminés. Ensuite, il existe en abondance sur les comètes trois des matériaux permettant précisément cette synthèse des acides aminés : l'eau, l'acide cyanhydrique et le formaldéhyde. Les deux derniers éléments permettent également la synthèse de la glycine, et il n'est pas inintéressant de souligner que celle-ci fait partie des vingt acides aminés considérés comme des briques essentielles de la phase de chimie prébiotique, conduisant à l'émergence des processus vivants !

Mais parmi les apports du cosmos, il ne faut pas non plus oublier les astéroïdes où la recherche d'éléments prébiotiques a fait, depuis le début



Double hélice ADN. Il semble bien que l'architecture de base des systèmes vivants et le code génétique contiennent en eux-mêmes tous les ingrédients d'un processus de croissance. Celui-ci permettrait l'émergence d'organismes toujours plus complexes basés sur des formes d'organisation et d'utilisation efficace de l'énergie de type exponentiel.

des années 50, l'objet de découvertes étonnantes*. Toutes ces études sur des morceaux d'astéroïdes ont mis en évidence la présence de molécules complexes construites en chaînes et ressemblant à des hydrocarbures. Ces travaux suggèrent qu'il y ait au sein de celles-ci de la cytosine qui est l'une des quatre bases portant le « code génétique de la vie » dans l'ADN.

D'autres études, portant notamment sur la météorite de Murchison tombée en Australie en 1969, ont mis en évidence la présence incontestable d'acides aminés visiblement synthétisés en milieu non terrestre (glycine, acide glutamique, valine, proline), et certaines études effectuées à Paris, au Muséum, vont dans le même sens. En fait, depuis les expériences de Stanley Miller et Urey (synthèse

* Travaux de Muller (1951) sur la météorite de Bokkeveld, de Calvin et Vaughan sur la météorite de Murray, puis ultérieurement (début des années 60), de Bartholomew, Nagy, Meinschein, Ross et Anders-Ficht sur la fameuse météorite d'Orgueil tombée en France près de Montauban.

artificielle d'éléments en simulant une atmosphère primitive et un apport d'énergie par décharges électriques), on sait que des éléments comme la glycine, l'acide glutamique et l'alanine peuvent se former automatiquement à partir des éléments qui leur sont indispensables et d'un apport d'énergie. Pourtant, même si cet apport du Cosmos apparaît indéniable, nous sommes encore bien loin de structures capables peu à peu de réplication et de stocker les informations nécessaires à cette réplication. Comment s'est effectué ce passage ? Y a-t-il eu un ancêtre unique à toutes les formes de vie ? Ou bien y a-t-il eu plusieurs « souches » issues de processus différenciés, lesquelles auraient adopté la même solution pour leur réplication ? Jusqu'à ce jour personne n'a pu apporter de réponse satisfaisante : la vie est-elle née dans des lacs peu profonds, dans des mers à la suite de la formation de « coacervats » à partir d'agglomérats de molécules, au bord des mers où le phénomène des marées aurait pu permettre une alternance entre milieu sec et milieu humide, grâce à la présence d'argiles servant de catalyseurs à des

molécules ayant trouvé la bonne solution pour leur réplication ? Hypothèses parmi bien d'autres...

Quoi qu'il en soit, quatre faits indiscutables caractérisent cette montée en puissance qui allait conduire jusqu'à l'émergence d'un être pensant capable de se poser des questions sur l'Univers et ses propres origines :

- tous les organismes vivants, même les plus primitifs, font appel à des composés riches en carbone, que l'on retrouve abondamment dans l'Univers et qui sert de « liant » à l'assemblage des molécules les plus ramifiées.

- il existe une étonnante similitude de l'architecture des systèmes vivants et de leur code génétique (basée sur le couple ADN/ARN, Acide désoxyribonucléique/acide ribonucléique) que l'on retrouve depuis les organismes les plus simples jusqu'aux plus complexes.

- l'on trouve une totale imbrication des chaînes de l'inanimé et du vivant qui explique comment, à partir du premier et grâce à l'effet accélérateur des objets cosmiques, l'apparition d'organismes primitifs a contribué à *modifier* l'environnement terrestre avec pour résultat et *finalité* de le rendre plus favorable à l'émergence d'organismes supérieurs et à l'intelligence ;

- l'évolution qui va des organismes les plus simples vers les plus sophistiqués (et l'Homme) entraîne à chaque fois une *extension* de la biomasse hors de son biotope de départ et un niveau supérieur de transformation de l'énergie que l'on peut qualifier par une suite de « stades énergétiques de référence ». L'extension des activités de l'Homme hors de sa biosphère, au prix de justifications énergétiques, économiques, scientifiques et démographiques se situe en droite ligne sur cet axe d'évolution, comme si la vie, pour se maintenir et se développer, n'avait d'autre choix que celui d'intervenir sur l'Univers dont elle est issue... L'étrange histoire qui nous relie aux objets cosmiques pourrait être comparée à une sorte

« d'aiguillon » impliquant, pour la vie et l'espèce humaine, un passage à des stades supérieurs bien longtemps après que ces mêmes objets aient apporté le « souffle organique du levain » et contribué aussi à interrompre momentanément la montée en puissance de celui-ci.

Outre cette architecture quasi-universelle des mêmes vingt acides aminés (alors que l'on en connaît un peu plus de quatre-vingt), ce même système de réplication cellulaire et de transmission du code génétiques par le couple ADN/ARN, le phénomène vital terrestre possède également pour caractéristique d'avoir lui-même contribué à la *transformation* de son propre milieu, par le biais des premiers organismes primitifs issus de la chimie prébiotique. Cette transformation du milieu est particulièrement visible au niveau de l'augmentation progressive du contenu en O₂ de cette atmosphère favorisant l'apparition des organismes supérieurs jusqu'à l'espèce humaine.

Une preuve fondamentale de l'absence quasi-totale d'oxygène à l'état libre, dans l'atmosphère des premiers âges de la Terre primitive, nous est donnée par l'examen de quelques sites privilégiés constitués par des terrains anciens âgés de 3 à 3,9 milliards d'années. Parmi ces terrains très anciens, il n'est pas rare de trouver ce que les spécialistes appellent « Banded Iron Formations » ou B'ifs, alternance de couches riches et pauvres en fer qui ont souvent été converties par métamorphisme en grès siliceux. L'oxygène, qui est un des éléments les plus abondants au niveau de la croûte terrestre (48%), possède la caractéristique d'être facilement « piègeable » par les roches. L'on a également constaté ce phénomène sur la Lune dont les roches contiennent parfois plus de 40% de cet élément.

Lorsque les paléontologues examinent ces Bif's, ils constatent que ces formations ferreuses ne contiennent pratiquement pas d'oxygène, ce qui indique qu'à l'époque de leur formation, l'atmosphère terrestre en était pratiquement dépourvue, tout au moins à l'état libre. Un témoin

géologique de la *croissance accélérée* de l'atmosphère oxygénée nous est donné par l'existence, à des stades géologiques ultérieurs de ces Bif's, de « couches rouges » appelées *Red Beds* dans des terrains dont l'existence est estimée à 3 milliards d'années. Dans ces *Red Beds*, on trouve des quantités importantes d'oxydes ferriques (Fe₃O₄ puis Fe₂O₃) qui prouvent l'existence de l'oxygène à l'état libre et en grande quantité à l'époque de la formation de ces oxydes. Il est infiniment probable, qu'outre l'apport des comètes, les UV solaires ont dû jouer un rôle pour dissocier les molécules d'eau de la haute atmosphère produites par les éruptions volcaniques : l'hydrogène, élément léger moins facilement retenu par le champ gravitationnel, s'échappant partiellement de l'atmosphère terrestre à cause de la forte agitation thermique de ses molécules ; l'oxygène qui s'accumulait peu à peu dans l'atmosphère sous forme libre (O₂). Toutefois, des différents modèles d'atmosphère primitive envisagés, il ressort que la quantité d'oxygène accumulée de cette façon dans l'atmosphère terrestre depuis 4,5 milliards d'années est bien inférieure à la quantité actuellement présente.

Il semble donc logique de considérer que l'évolution de la biochimie des organismes primitifs vers une adaptation à la vie oxygénée, qui déboucha sur la *photosynthèse* (formation par les plantes et les algues d'oxygène libre et de composés organiques aux dépens de la lumière solaire et du dioxyde de carbone atmosphérique), est la *cause essentielle* de cette évolution de l'atmosphère terrestre. L'examen des stromatolithes et des couches géologiques correspondant à l'époque où cette atmosphère était peu oxygénée montre que les formes de vie étaient uniquement procaryotes. Le même examen des couches géologiques supérieures montre quant à lui une montée en complexification constante des processus vitaux ultérieurs, qui semble aller de pair avec la montée du taux d'oxygène dans l'atmosphère terrestre. Ces organismes primitifs procaryotes, en rejetant l'oxygène dans l'atmosphère, auraient considérablement contribué à l'augmentation en

teneur en oxygène de celle-ci, ce qui aurait permis le développement des organismes à cellules eucaryotes (à noyau), d'où sont issus tous les organismes supérieurs et la plupart des organismes contemporains.

L'hypothèse selon laquelle les premiers organismes vivants apparus sur Terre ont dû être procaryotes et ont contribué activement à « préparer l'avenir », outre l'examen des couches géologiques considérées, repose sur un certain nombre de faits.

Tout d'abord, les cellules eucaryotes ont un besoin impératif d'oxygène, incompatible avec les conditions régnant dans l'atmosphère terrestre primitive. Il existe des cas d'exception très rares que les spécialistes considèrent comme des « fossiles vivants » de l'époque, où les premières cellules eucaryotes sont apparues au fur et à mesure que l'atmosphère terrestre devenait plus oxygénée. Des expériences de laboratoire effectuées au cours des années 1960-1970 ont montré que la mitose de ces cellules (processus de division cellulaire), ne peut se produire si l'oxygène n'atteint pas un certain degré de concentration.

Ensuite, l'observation du comportement des procaryotes contemporains (bactéries et algues bleues de Shark Bay en Australie, par exemple),

a révélé que, d'une espèce à l'autre, leur comportement et leur tolérance vis-à-vis de l'oxygène étaient très *variables*. Si certains organismes procaryotes sont strictement aérobies et ne peuvent vivre en l'absence d'oxygène, d'autres, par contre, le tolèrent mais peuvent vivre sans lui (anaérobies facultatives). Cependant, le cas le plus étonnant est rencontré chez les bactéries dites « anaérobies obligatoires » qui ne peuvent pas croître ou se reproduire en présence d'oxygène (cas des bactéries des fosses hydrothermales sous-marines).

Il existe donc bel et bien un *chemin continu* qui part du démarrage des processus vitaux sur Terre, avec un apport cosmique, pour passer à l'étape essentielle de cette transformation du milieu terrestre, par ces mêmes processus vitaux, avec pour finalité de le rendre plus adéquat à l'émergence et à la pérennité de *nouveaux processus* de niveaux d'organisation et énergétiques supérieurs, lesquels agiront à leur tour sur le milieu environnant. Quoiqu'on en pense, il y a dans ce processus naturel quelques similitudes avec ce que l'on nomme la « Technologie »...

Au cours des milliards et centaines de millions d'années passées, comètes et astéroïdes, qui ont joué le rôle que l'on sait aujourd'hui, ont en quel-

que sorte servi de référentiel à un processus de montée en puissance comparable à une courbe sinusoïdale ascendante ponctuée, à intervalles plus ou moins réguliers, de « chutes » brutales suivies longtemps après de phases ascendantes comportant parfois des sous-phases de type exponentiel. Ce que l'on constate toutefois, et qui est étrange et lourd de signification, c'est que sur une longue durée, rien n'a pu empêcher l'émergence de l'intelligence. Elle, qui doit une part certaine de son existence aux apports des objets cosmiques, pourrait bien d'ici peu montrer sa *capacité d'intervenir sur ceux-ci*, et pas seulement pour sa survie. Dès lors la vie, contrairement aux idées émises par Monod dans son ouvrage *Le hasard et la nécessité*, ne serait pas un « accident ». L'intelligence, la science et la technologie seraient plutôt une forme de prolongement inévitables de la cosmochimie de l'Univers...

L'apparition de l'homme

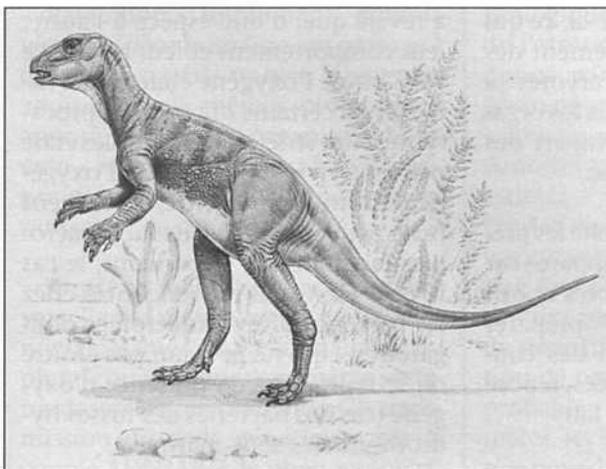
Nous comprenons maintenant combien il est important de ne plus considérer ces problèmes du seul point de vue paléontologique, en intégrant les effets de feed-back et de rétroactivité qui relie le planétaire au stellaire et au galactique. Les travaux de Raup et Sepkoski sur les crises d'extinction des espèces (qui semblent avoir été « brutales » et suivre des « crêtes » et des « cycles » plus ou moins réguliers), ont une concordance telle avec ceux de Rampino et Stothers sur les dates évaluées des plus gros impacts que tout ceci ne saurait être le fait du hasard (voir *Fusion* n° 53). Toutefois, ce que nous montre le paléontologue c'est que la vie, en dépit de régressions souvent liées à ces impacts, semble couler au cours du temps comme un fleuve irrésistible, enrichi de façon continue au niveau de son débit et de sa composition. Comètes et astéroïdes apparaissent sous cet angle comme des « coups de canif » érodant la corde avant que celle-ci ne se reforme d'elle-même toujours plus puissante et complexe au niveau de sa structure et de son organisation interne.



Disque de poussières protoplanétaires autour de l'étoile Beta Pictoris. L'étude de nombreuses étoiles en formation tend à montrer qu'une part importante de leur disque de poussières et de leur gaz est rapidement éjectée dans les espaces interstellaires. Ainsi, le phénomène de formation de grosses planètes gazeuses et de comètes pourrait être moins accentué que dans notre système solaire. Pourtant le satellite infrarouge Iras a permis de mettre en évidence un phénomène cométaire important autour de l'étoile Beta Pictoris, située à 53 années-lumière de notre planète.

Bien sûr, comme le pense Michel Maurette, le « temps nous est compté avant qu'une comète de taille importante ne revienne s'écraser sur la planète ». Cela implique que l'Homme prenne les mesures nécessaires pour intervenir sur le processus lui-même. Néanmoins, cette situation a déjà existé par le passé et il n'est pas exclu d'envisager qu'au moment de la crise de la fin du Secondaire, il a seulement manqué quelques millions d'années d'évolution à la vie pour y faire face ! Il semble bien, en effet, que chez certaines des dernières familles de dinosaures ayant existé avant la disparition de l'espèce, on ne puisse plus rejeter totalement l'éventualité d'une évolution vers « quelque chose de supérieur » avec un psychisme plus élaboré et un début « d'intelligence » ! Pour trancher, il faudrait être définitivement sûr du fait que, contrairement aux vrais reptiles qui peuvent se satisfaire d'un sang froid et d'un cerveau relativement limité pour assurer leurs fonctions, les dinosaures possédaient en fait un sang chaud analogue aux mammifères, thèse aujourd'hui défendue par de nombreux spécialistes comme L.S. Russell et Orstrom. Certaines découvertes effectuées en Argentine et aux Etats-Unis laissent entrevoir cette évolution et cette thèse est partagée par le paléontologue canadien Dale Russell, à la suite de l'examen de fossiles d'un petit dinosaure vivant il y a quelque 75 millions d'années en Alberta. Selon le scientifique canadien (cité par Gene Bylinsky dans son ouvrage paru à New York, en 1981) :

« Cette créature marchait manifestement sur ses deux membres postérieurs et possédait des mains à trois doigts dont le doigt extérieur s'opposait aux deux autres comme un pouce. Les yeux étaient grands et dirigés vers l'avant du crâne, suggérant un champ de vision stéréoscopique. Plus significative encore, les hémisphères cérébraux de l'animal étaient hypertrophiés, bien plus grands proportionnellement que ceux de tout reptile vivant et de la même taille que ceux de nos mammifères. Ce petit dinosaure était une manifestation de la tendance répandue chez les organismes avancés à devenir plus intelligents au fur et à mesure de l'écoulement du temps géologique ».

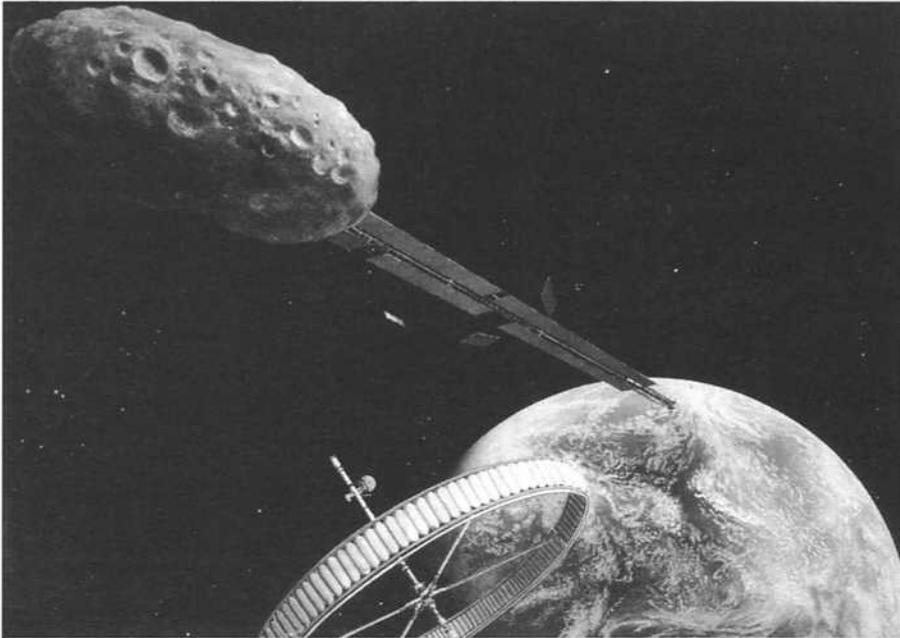


Contrairement à ce que l'on pensait il y a quelques années, les dinosaures n'étaient pas des « reptiles » mais des animaux à sang chaud. Leur métabolisme et leur niveau d'utilisation de l'énergie étaient ainsi supérieur à celui des reptiles. De plus, certaines espèces présentaient indiscutablement un début d'encéphalisation.

Dans cette description étonnante, qui a été confirmée également par l'examen d'une autre espèce dite *Stenonychosaurus Inequalis*, on ne peut que penser à quelque chose de similaire à ce que l'on nomme la faculté de préhension, la mémorisation et le « calcul » permettant d'élaborer des stratégies de survie. Le plus frappant pour les paléontologues, lors de ces examens, c'est qu'il semble y avoir un début « d'encéphalisation », à savoir l'élaboration d'une structure permettant à la fois l'apparition d'hémisphères cérébraux, d'un cervelet et d'un tronc cérébral. Plus étonnant encore, l'évolution morphologique laisse à penser que, si celle-ci avait duré pendant quelque 5 à 10 millions d'années, elle aurait pu déboucher sur un processus ayant quelques similitudes avec « l'homínisation ». Cette thèse peut apparaître « osée » mais n'est pas plus stupide que celle d'Yves Coppens selon laquelle « l'Homme serait né d'un accident géologique ». En clair l'examen des faits laisse penser que ce serait la nature elle-même de l'évolution, où le processus de montée en puissance est étroitement lié au principe de moindre action pour le choix de solutions les plus efficaces, qui conduirait peu à peu à l'émergence de l'intelligence, en adoptant la morphologie la plus efficace. La créature en question, nécessairement de type « humain », ne devrait rien au « Hasard ». De plus, elle serait nécessairement à sang chaud puisque celui-ci permet une utilisation de l'énergie à un niveau plus efficace et que cette condition est impérative pour permettre l'évolution vers un cerveau de grande taille, apte à contenir les mul-

tiples connexions nerveuses indispensables à l'intelligence et à la régulation de multiples fonctions de type « capteur-senseur », comme le soupçonnait, dès les années 1890, le savant néerlandais Eugène Dubois. Comètes et astéroïdes ont participé activement aux « crises de la vie », comme le montrent les travaux d'Alvarez et d'Asaro sur les anomalies en iridium de provenance cosmique dans la couche géologique située à la limite entre le Crétacé et le Tertiaire. Elles ont, après avoir contribué au démarrage de la chimie prébiotique sur Terre, certainement joué plusieurs fois un rôle actif dans ses phases, plus ou moins longues, de régression (thèse de Norman Sleep), sans pouvoir toutefois arrêter définitivement le cours de la vie.

Un examen rétrospectif des phases paléontologiques connues, montre qu'il y a une sorte d'accélération exponentielle du processus qui part des premiers microorganismes connus (entre 3,5 et 3,8 milliards d'années) pour parvenir ensuite (de 1,6 à 1,2 milliards d'années en arrière) à la première atmosphère terrestre oxygénée, aux premiers organismes aérobies et à la reproduction, sexuée. Il faudra encore 600 millions d'années pour voir apparaître les premiers animaux à squelette externe dans les mers (faune d'Ediacara en Australie) et 165 millions d'années après apparaissent les premiers poissons « gnathostomes », après une étape où dominant des vertébrés aquatiques primitifs, et 85 à 145 millions de plus pour voir l'arrivée de l'ancêtre du coelocanthe actuel, des reptiles marins et, sur Terre, les premiers végé-



Tractage d'un astéroïde par un accélérateur électromagnétique spatial. L'extension des activités de l'homme hors de son biotope naturel apparaît comme une manifestation inévitable de la vie, à partir du moment où elle a atteint des niveaux d'organisation et énergétiques supérieurs. Toutefois, la façon de traiter le problème des comètes nécessitera un bond technologique plus important encore que celui des astéroïdes.

taux, les amphibiens, les insectes, les reptiles. L'ère secondaire (qui va de 230 à 65 millions d'années avant notre ère) verra le développement des poissons dans les mers et l'apparition des oiseaux et des petits mammifères, dans le même temps où dominent les dinosaures*.

A la suite des événements catastrophiques de la fin du Secondaire on sait que disparurent, en mer, la plupart des foraminifères (petits organismes à l'origine du plancton marin), quatre à cinq familles de tortues, les crocodiliens « goniopholidés », les mosasaures, les ichtyosaures et les plésiosaures (reptiles marins abusivement répertoriés comme « dinosaures ») et, sur Terre, quasiment toutes les familles de dinosaures (à l'exception des incompréhensibles fossiles du Montana), 80% des espèces végétales et animales. L'hypothèse selon laquelle les objets cosmiques

*Il paraît évident que la disparition n'est pas uniquement liée à un phénomène d'inadaptation de type paléontologique classique et doit intégrer les impacts, même si des fossiles de dinosaures « ultérieurs » à la fameuse couche géologique K/T ont été découverts en 1985 dans le Montana.

responsables seraient tombés en mer semble être confirmée par la découverte du monstrueux cratère de Chicxulub, au large du Mexique, et le fait que, sur Terre, quelques rares mammifères survécurent, de même que quelques plantes et poissons d'eau douce.

La suite fut, à cause des perturbations de l'environnement, une longue période de régression, jusqu'au jour où, après l'explosion brutale des mammifères, les ancêtres de l'Homme (« hominidés primitifs ») apparaissent, il y a environ 1,8 millions d'années avec, plus récemment, la technologie et la science et un être pensant capable, pour la première fois sur Terre, de s'interroger sur ses origines et son devenir. Issu d'un extraordinaire processus de fertilisation croisée accompagnant une montée continue en puissance des processus énergétiques, la civilisation technologique moderne passera, en un peu plus d'un siècle seulement, des premières locomotives à vapeur au TGV et la deuxième moitié du XXème siècle verra Armstrong et Aldrin mettre le pied sur la Lune, et les premières sondes scientifiques martiennes déposer des instruments d'analyse à la surface de la planète rouge !

L'astronomie des comètes et des astéroïdes, née des travaux de Reinmuth en 1922, commence peu à peu à changer la perception qu'en ont les scientifiques. Parallèlement, la crise de l'énergie, impliquant un fantastique passage à un niveau supérieur, se profile à l'horizon...

A la fin du XXème siècle le potentiel technologique et scientifique n'a pas, hélas, encore vraiment entraîné l'adoption des indispensables « stratégies de sortie de crises ». En tous cas, l'adoption de nouvelles « solutions » pour la survie de la vie et de l'intelligence semble toutefois revêtir un caractère inéluctable... Si la science et les techniques disponibles semblent déjà pouvoir apporter un début de réponse aux nécessités d'extension des activités humaines hors de sa biosphère, il apparaît toutefois que face au problème des comètes, nous sommes singulièrement démunis sur le plan de la technologie. En effet, ce défi doit nous entraîner à nous doter de capacités d'intervention jusqu'au niveau galactique ! Nous aborderons ce sujet dans un troisième article. ■

Bibliographie

1. Philippe Jamet, « Les recherches en matière d'origine de la Vie : une nécessaire pluridisciplinarité », *Medispace* - Volume 2 - n°2, mai 1990.
2. Philippe Jamet, « Dossier : les Comètes », *Medispace*, Volume 3, n°1 et 2, janvier-avril 1991.
3. Vitali Gordanskii, « Les réactions chimiques à basse température », *Pour la Science*, avril 1986.
4. Philippe Jamet, « Collisions d'astéroïdes et de comètes : la Terre est-elle menacée ? », *Fusion*, n° 53, novembre-décembre 1994.
5. H. Beust et J.J. Lissauer, « The effect of stellar rotation on the absorption spectra of Comets orbiting Beta Pictoris », *IAP*, 424, octobre 1993.
6. J.M. Dutuit : « La montée en puissance du processus vivant » (FEF-Conférence Pasteur- Juillet 1986-Domus Medica)
7. J.M. Dutuit, « Théorie de l'évolution de la biosphère et établissement de nouvelles frontières », *Fusion*, n°54, janvier-février 1995.
8. Gene Bylinsky, *La vie dans l'univers de Darwin*, Robert Laffont, 1983.