

Texte de la 191^e conférence de l'Université de tous les savoirs donnée le 9 juillet 2000.

Diversité et spécificités des mondes planétaires : que nous disent Mars, la Lune, comètes et astéroïdes ?

par Jean-Pierre Bibring

Quarante années d'exploration spatiale ont profondément modifié notre représentation du monde des planètes, et singulièrement de la Terre : ce qui frappe est leur extraordinaire diversité, et c'est l'objet majeur de la planétologie contemporaine que de tenter d'identifier et d'en comprendre les spécificités, dont la moindre n'est pas, pour la Terre, d'avoir abrité les conditions favorables à l'apparition et l'évolution du vivant. D'où vient que des objets, dont on sait aujourd'hui qu'ils se sont formés pratiquement au même moment (il y a un peu plus de 4,5 milliards d'années), d'un même matériau, et en un même lieu de notre Galaxie, aient évolué si différemment ?

Les moteurs des machines planétaires

On est bien loin de maîtriser ce que sont les moteurs de l'activité planétaire : les planètes possèdent des sources d'énergie interne multiples, qui ont un comportement variable dans le temps, et imposent les étapes et le rythme de l'évolution. Contrairement à une idée répandue, l'évolution des planètes ne provient pas du seul fait qu'elles sont en orbite autour du Soleil, et en en reçoivent de l'énergie. Bien entendu, l'énergie solaire est fondamentale pour entretenir l'activité atmosphérique, et en particulier la biosphère terrestre ; cette énergie est cependant absorbée très en surface, et ne compte pas dans le bilan énergétique de l'intérieur planétaire. C'est la radioactivité des éléments (uranium, thorium et potassium essentiellement) présents à l'intérieur de la Terre et de la plupart des autres objets solides planétaires qui en détermine principalement le devenir.

Ces éléments ont la particularité de se désintégrer spontanément (« naturellement ») au bout de périodes se mesurant en milliards d'années : comme c'est l'âge de notre système, ce sont eux qui contribuent le plus à la production énergétique interne. Ils sont toutefois très peu abondants : les « radiateurs » radioactifs sont de piètre efficacité, chaque m³ de matériau planétaire ne dissipant que 10⁻⁷ W environ ; il a fallu des centaines de millions d'années pour que les intérieurs planétaires soient chauffés jusqu'à atteindre leurs températures maximales, et donc leur niveau d'activité le plus élevé. Toutefois, comme c'est en disparaissant, par radioactivité, que les éléments libèrent de l'énergie, la production énergétique se tarit au cours du temps avec les ressources elles-mêmes : après avoir atteint leur stade d'activité maximale, les planètes se refroidissent progressivement, pour atteindre finalement la « mort géologique ».

Toutes ne s'éteignent pas au même moment : la mort géologique survient d'autant plus tôt, dans l'évolution des objets planétaires, qu'ils sont de petites dimensions. Pour en rendre compte, en simplifiant à l'extrême, supposons que tous soient faits du même matériau, réparti de manière homogène : un mètre cube d'astéroïde, de Lune, de Mars ou de Terre contiendrait donc la même concentration d'éléments radioactifs. De même volumes constituent donc des radiateurs équivalents, et la production globale d'énergie dans un objet est directement proportionnelle au volume total. Mais de même que la température atteinte dans une pièce résulte d'un équilibre entre le chauffage et les pertes, de même le bilan énergétique d'une planète est un équilibre entre cet apport d'origine radioactive et les pertes, qui s'effectuent par le rayonnement de surface, et sont donc proportionnelles au carré du rayon R. Avec des gains en R³ (volume) et des pertes en R² (surface), l'équilibre dépend de R : plus R est grand, plus les gains l'emportent sur les pertes, et plus la température atteinte est élevée. En revanche, les corps les plus petits peuvent rayonner efficacement l'énergie libérée, et demeurer froids.

Ainsi, la radioactivité a chauffé les différents objets planétaires jusqu'à des niveaux dépendant de leur taille. Ils se sont ensuite progressivement refroidis pour s'éteindre d'autant plus tôt que, plus petits, ils n'avaient pas atteints des niveaux très élevés.

Ce que nous disent les différents objets

C'est pourquoi les plus petits corps du Système Solaire, qui ont des dimensions très faibles (inférieures à quelques dizaines de kilomètres), n'ont jamais connu d'épisode d'échauffement interne global ayant effacé les propriétés acquises à leur formation. Ils les ont préservées jusqu'à aujourd'hui, et en constituent de ce fait des « fossiles ». En analysant ces objets « primitifs », on a, potentiellement, accès aux conditions initiales de l'évolution du Système Solaire, dont nous parlons plus bas.

Des cinq objets du Système Solaire interne, de taille et d'histoires semblables, la mort géologique a frappé les plus petits d'abord : la Lune s'est éteinte la première, suivie de Mercure, puis de Mars. On ne sait toujours pas si Vénus est encore active ; la Terre, elle, est toujours soumise à des mouvements internes provoquant tremblements de terre, formation de montagnes et volcanisme intense. Si des catastrophes locales peuvent en découler, cette activité est cependant globalement nécessaire à la vie : c'est grâce au volcanisme que l'atmosphère est régénérée et, par l'apport énergétique solaire, demeure propice au vivant tel qu'on le connaît. Lorsque, par la diminution de la radioactivité, les mouvements de convection internes cesseront, le recyclage atmosphérique s'effacera au profit des mécanismes de piégeage, et avec lui les conditions favorables au maintien d'une biosphère. On peut s'attendre à ce que cela arrive bien avant que le Soleil n'ait fini de briller : la vie sur Terre pourrait disparaître en plein Soleil.

Parce que l'activité géologique de la Terre est importante, elle a pratiquement tout effacé des étapes antérieures : il est très difficile de retrouver la trace des événements ayant marqué son histoire, et donc d'identifier l'origine de ses spécificités. Les objets de plus petites tailles nous le permettent davantage.

L'observation de la Lune nous apprend l'essentiel de ce qui se passait dans la cavité solaire interne peu après la formation des planètes. Des quantités d'objets ont été formés, en nombre considérablement supérieur à celui des planètes et satellites que nous connaissons. Toutefois leurs orbites étaient telles qu'ils se sont violemment heurtés les uns contre les autres, se fracassant mutuellement et disparaissant lors de ces impacts : c'est ce que l'on observe sous la forme de cratères de toutes tailles, certains larges de centaines, voire de milliers de kilomètres, les plus nombreux étant les plus petits. Il a fallu plusieurs centaines de millions d'années pour « nettoyer » ainsi le Système Solaire, et que ne subsistent que les objets que l'on connaît aujourd'hui. Ces chocs ont affecté l'ensemble des objets : une photographie de la Terre datant de 4 milliards d'années aurait donné l'image d'un objet criblé de cratères d'impacts, semblable à ce qu'est la Lune : de petites dimensions, celle-ci n'a pas subi de « remise à zéro » globale, comme ce fut le cas de la Terre, et présente toujours les traces du bombardement primordial intense. On y distingue également des structures sombres, appelées (à tort) « mers ». Elles proviennent directement de l'activité interne de la Lune : dès qu'en profondeur un magma suffisamment visqueux a été formé et mis en mouvement, il est monté en surface (par convection), surgissant dans les plus accessibles des terrains : il a rempli les cratères d'impacts les plus profonds. La solidification, une fois en surface, de cette lave basaltique, contenant plus de silicates ferro-magnésiens denses (qui se trouvent être plus sombres), a donné naissance aux mers, contrastant avec les plateaux clairs environnant. Ces mers ont été formées entre 4 et 3,3 milliards d'années, c'est-à-dire après le bombardement initial ; elles contiennent de ce fait très peu de cratères d'impact. L'analyse des échantillons lunaires et de la surface de la Lune a permis de retracer l'histoire du premier milliard d'années du Système Solaire.

Ainsi, le taux de cratérisation de la Lune nous permet d'évaluer le nombre d'impacts reçus sur Terre : vraisemblablement, plusieurs dizaines de chocs géants ont formé des bassins de plusieurs milliers de kilomètres de diamètre ; il y eut probablement plusieurs milliers de cratères de taille supérieure à une centaine de kilomètres. On n'a pas encore pris la mesure de l'ensemble des conséquences de tels événements pour l'histoire ultérieure de la Terre, et de ses mouvements orbitaux.

Il en est une au moins qui mérite d'être mentionnée : c'est à l'un de ces chocs géants, par un objet de taille comparable à celle de Mars, que l'on doit vraisemblablement la formation de la Lune. Les débris, éjectés et mis en orbite autour de la Terre, se seraient ré-accrétés pour former la Lune, ce qui expliquerait l'ensemble des propriétés qu'on lui connaît, dont le fait que sa composition est semblable à celle des couches extérieures (le manteau et la croûte, à l'exception du noyau) de la Terre. Une spécificité de la Lune, comme satellite de la Terre, est que sa masse en est comparable : on peut presque parler du système Terre/Lune comme d'un système double. C'est un cas unique dans le Système Solaire : Phobos et Deimos, autour de Mars, tout comme les satellites des planètes géantes, sont de masses considérablement plus faibles que celles des planètes autour desquelles ils gravitent. Il se pourrait que la Lune, en revanche, ait eu des effets gravitationnels majeurs pour certaines des propriétés orbitales de la Terre, et en particulier en ce qui concerne son obliquité : la Terre tourne sur elle-même autour d'un axe incliné de 23° par rapport à la perpendiculaire au plan de son orbite autour du Soleil (l'écliptique). Cet angle est fondamental pour le climat terrestre, en ce qu'il impose le degré d'insolation des différentes régions au long des saisons. On conçoit aisément que des changements climatiques féroces surviendraient s'il advenait que l'obliquité change beaucoup : imagine-t-on se qui se passerait si les pôles décidaient de basculer à l'équateur ? La stabilité des climats terrestres, qui pourrait avoir été une condition fondamentale à l'évolution d'une chimie ayant donné naissance au vivant, pourrait être une conséquence directe de l'existence de la Lune. Or sa formation résulterait d'un événement extrêmement peu probable. Ce pourrait être l'une des spécificités terrestres, que d'être dotée d'un tel régulateur d'obliquité favorisant la pérennité de climats, permettant en particulier à l'eau de demeurer stable à l'état liquide.

Il n'est pas sûr que Mars ait bénéficié d'un tel mécanisme : l'évolution parfois brutale de son climat, sous l'effet de l'évolution chaotique de son obliquité, n'a peut-être pas permis l'existence d'étendues d'eau liquide suffisamment longtemps pour que la vie y naisse. Cela fait partie des défis que nous pose Mars : plus massive que la Lune, Mars a connu des stades d'activité beaucoup plus complexe, comme en témoignent des volcans gigantesques (plus de 25 000 m d'altitude, les plus hauts de tout le Système Solaire), des réseaux de gorges (canyons) de plusieurs milliers de kilomètres, des lits de rivières et d'affluents nombreux, aujourd'hui asséchés. Pour autant, Mars est suffisamment petite pour ne pas avoir connu d'épisode effaçant les structures antérieures, si bien qu'on peut distinguer, à sa surface, des régions datant de chacune des étapes de son évolution ; on peut potentiellement y lire la mémoire de toute l'histoire des objets du Système Solaire, jusqu'à la mort géologique : c'est ce qui fait son caractère unique en planétologie comparée. En particulier, il n'est pas exclu que Mars ait connu, en même temps que la vie apparaissait sur Terre, des conditions globales similaires : peut-être abritait-elle de l'eau liquide, une chimie prébiotique, voire une exobiologie. C'est ce qui justifie qu'un grand programme d'exploration spatiale de Mars, auquel la France entend participer à haut niveau de responsabilités, ait été mis sur pied : il devrait permettre, dans la prochaine décennie, de déceler d'éventuels dépôts de roches sédimentaires, traçant, comme les carbonates terrestres, d'anciens sites lacustres ; de mettre en évidence de la glace souterraine, protégeant peut-être des réserves d'eau enfouies ; de collecter des échantillons dans des sites sélectionnés, et de les retourner sur Terre, permettant une analyse, à l'échelle des grains individuels, utilisant les instruments de laboratoire les plus

développés : un bond considérable devrait être réalisé dans la compréhension de l'histoire de Mars, avec à la clé celle de problèmes cruciaux de l'évolution de notre propre planète.

La recherche des conditions initiales : astéroïdes et météorites

L'identification des forces (les « moteurs » des machines planétaires) ne suffit pas à décrire l'évolution d'un objet : celle-ci, comme pour la flèche qu'on lance, est également fonction des « conditions initiales » qu'on lui imprime. S'agissant des planètes, que sont ces conditions initiales, en quoi ont-elles pu jouer un rôle, et comment les identifier ?

Les conditions initiales de l'évolution du Système Solaire sont fondamentalement de deux types, dynamique et compositionnel. La dynamique comprend l'ensemble des chocs, collisions et effets de marée ayant affecté les mouvements des objets, l'accrétion de matière ou leur ablation partielle, dans l'environnement du Soleil central. On a vu par exemple que la formation de la Lune, par collision, a pu jouer un rôle essentiel sur l'évolution ultérieure de la Terre.

Comment avoir aujourd'hui accès à ce que fut la dynamique primordiale ? L'une des approches est d'étudier aujourd'hui des systèmes reflétant les conditions dynamiques du nuage protosolaire (disque d'accrétion) où sont nées les planètes. Il y en a de deux types : les anneaux des planètes géantes, avec les satellites planétaires qui y sont gravitationnellement liés, et l'ensemble des « astéroïdes » : la recherche au XIX^e siècle d'une planète supposée se trouver entre Mars et Jupiter, en échouant, a permis la découverte progressive de milliers d'objets, que l'on sait être en fait beaucoup plus nombreux encore, et dont la masse intégrée est celle d'une planète à peine plus massive que Mercure. Ces astéroïdes évoluent autour du Soleil sur des orbites très voisines. Longtemps on a considéré qu'ils provenaient d'une planète ayant explosé sous l'effet des forces de marées de Jupiter ; on pense plutôt aujourd'hui qu'il s'agit au contraire des innombrables petits objets à partir desquels, par collision et accrétion, une planète était en train de se former lorsque, précisément à cause de l'apparition de Jupiter, la croissance a été stoppée. Les astéroïdes constitueraient donc un vestige du système dynamique par lequel les planètes se sont formées, maintenu jusqu'à aujourd'hui en un état inachevé de croissance avortée, et s'offrant à l'observation : seuls les chocs entre ces objets en modifient localement certaines propriétés, et éjectent des fragments qui sont à l'origine des météorites que la Terre collecte.

Les fragments éjectés sont d'autant plus nombreux qu'ils sont petits. La fréquence des gros impacts est très rare : la probabilité de recevoir sur Terre un objet de taille kilométrique est de l'ordre d'une collision tous les 100 millions d'années. Sous la violence d'un tel choc, la quantité de débris éjectés dans l'atmosphère est telle qu'elle suffirait à assombrir durablement, c'est-à-dire pendant plusieurs années, le rayonnement solaire au point de bloquer le développement de la végétation : certains pensent que l'on doit à l'un de ces événements la disparition des dinosaures, faute de nourriture, il y a quelques 65 millions d'années, disparition grâce à laquelle les mammifères, dont l'homme est issu, ont pu se développer.

Beaucoup plus petites, les météorites de masse voisine du kilogramme tombent sur Terre au rythme d'une dizaine par an sur une région grande comme la France. Au total, plusieurs milliers de météorites ont ainsi été identifiées dans le monde, collectées et rassemblées dans des Muséums pour être étudiées. La diversité des météorites reflète celle des astéroïdes, leur « corps parents », dont elles permettent l'analyse. On peut montrer que certaines d'entre elles proviennent d'objets très « primitifs », en ce qu'ils semblent n'avoir jamais connu d'échauffement important qui aurait modifié leurs propriétés d'origine : on a vu que c'est en effet ce que l'on attend des plus petits corps du Système Solaire. Il n'est pas exagéré d'affirmer que c'est à l'analyse de ces météorites les plus primitives que l'on doit

l'essentiel de notre compréhension de l'origine et de l'évolution primordiale du Système Solaire.

Par exemple, c'est ainsi que l'on a pu dater avec précision la formation du Système, c'est-à-dire l'âge de tous ses objets, à un peu plus de 4,55 milliards d'années : le Soleil et les planètes ne sont pas de première génération dans la Galaxie. Celle-ci était âgée d'une dizaine de milliards d'années quand notre Système s'est formé ; c'est ce qui explique qu'il contienne des éléments « lourds », c'est-à-dire autres que H et He, synthétisés à partir de l'hydrogène dans les cœurs d'étoiles massives, antérieures au Soleil, et réinjectés dans le milieu interstellaire à la mort, souvent explosive (supernovae), de ces étoiles. Ces éléments (C, N, O, Al, Si, Fe etc.) constituent l'ensemble (mis à part l'hydrogène) de ce qui constitue la Terre et les planètes : roches, atmosphère et structures vivantes. Les météorites permettent d'en mesurer les abondances.

Récemment, on a découvert que certaines météorites contenaient également des grains présolaires qui, formés dans l'atmosphère d'autres étoiles, avaient survécu aux différentes phases de croissance des protoplanètes, et se retrouvaient, piégés, avec des propriétés permettant d'identifier ces sites de formation. C'est ainsi que l'on a mis en évidence que l'effondrement de la nébuleuse protosolaire a vraisemblablement été déclenché par l'explosion d'une supernova proche, qui a ensemencé le nuage par du gaz et des grains fraîchement synthétisés ; parmi les atomes injectés, certains, fortement radioactifs, ont servi de source énergétique majeure pour les objets protoplanétaires qui les ont piégés. Au total, les analyses de météorites se sont révélées particulièrement fécondes, pour décrire tout à la fois l'histoire et la géographie du Soleil naissant.

La recherche des conditions initiales : comètes et micrométéorites

La brutale apparition de Jupiter n'a pas eu comme seul effet dynamique de préserver, à relativement faible distance héliocentrique, le système des astéroïdes. Elle a également fortement perturbé la croissance des objets en train de croître au delà de son orbite. A de telles distances du Soleil, la température moyenne, très basse, permet à l'essentiel des constituants volatils, comme l'eau, le gaz carbonique et l'ammoniac, de se trouver condensés en glaces : c'était effectivement sous cette forme principale que se construisaient les objets protoplanétaires au delà de l'orbite de Jupiter. Du fait de Jupiter, très peu d'objets ont atteint des tailles importantes : non seulement ils ont vu leur évolution bloquée, alors qu'ils ne faisaient guère plus que quelques kilomètres, mais surtout la plupart d'entre eux ont été éjectés à de très grandes distances du Soleil, sur des orbites des milliers de fois plus distantes du Soleil, où ils se trouvent toujours. Ce n'est qu'au hasard du passage d'une étoile proche que certains ont leur orbite à nouveau perturbée, pour replonger vers le Soleil et devenir « comète ». Alors, à mesure qu'ils s'en approchent, les glaces se subliment, se transforment en queues gazeuses caractéristiques, parfois spectaculaires ; ce processus libère de petits grains : lorsque la Terre croise de tels grains, certains, en pénétrant à vive allure dans l'atmosphère, se détruisent en « étoiles filantes ».

Ces blocs de glace kilométriques, ou « noyaux cométaires », tant qu'ils demeurent dans leur grand réservoir lointain, sont maintenus à des températures tellement basses qu'ils préservent leurs propriétés d'origine. On a donc toutes raisons de penser qu'ils sont toujours constitués des molécules et des grains qui constituaient le nuage protosolaire. Lorsqu'ils plongent dans le Système Solaire interne, ils portent avec eux un témoignage précieux, celui de la composition du matériau d'origine.

En 1986, pour le retour de la comète de Halley, pas moins de 5 sondes spatiales (2 japonaises, 2 soviétiques et une européenne, Giotto) sont parties à sa rencontre, pour en survoler le noyau même, de très près : Giotto est parvenu à moins de 600 km. Pour la première fois, on a pu procéder à une observation extrêmement rapprochée : on a découvert

un objet totalement différent de ce que à quoi l'on s'attendait. On imaginait, s'agissant d'un corps principalement fait de glaces, qu'il serait très brillant : c'est le plus sombre de tous les objets du Système Solaire, plus noir que du charbon. On se demandait si le carbone était plutôt sous la forme de gaz carbonique (CO₂) ou de méthane (CH₄) : on a découvert que plus de la moitié était sous la forme, non pas de ces petites molécules, mais de composés très complexes, qui précisément, mélangés à la glace, lui donnaient cet aspect si sombre. Il pourrait s'agir de polymères organiques de grand poids moléculaire, produits lors de l'effondrement du nuage protosolaire initial, piégés dans ces noyaux cométaires et préservés jusqu'à aujourd'hui : l'étude des comètes nous donne accès au stade d'évolution chimique final du nuage moléculaire dont est issu le Système Solaire.

Certains considèrent que parmi les molécules organiques complexes présentes dans ces noyaux, certaines (« prébiotiques ») pourraient avoir joué un rôle majeur pour initier la vie sur Terre (et peut-être à la surface d'autres planètes, Mars en particulier). Même à l'heure actuelle, la Terre, dans son périple interplanétaire, intercepte chaque année plusieurs dizaines de milliers de tonnes de matière cométaire, principalement sous la forme de micrométéorites : il s'agit des grains éjectés des noyaux cométaires par sublimation des glaces en s'approchant du Soleil, et dont une fraction se désintègre en étoiles filantes. On a toutes les raisons de penser que ce taux était considérablement plus élevé dans les premières centaines de millions d'années, alors que la cavité solaire était encore remplie d'innombrables débris de toutes tailles. Ces impacts ont pu contribuer à apporter une partie (au moins) de l'eau dont nous disposons aujourd'hui : chaque litre d'eau que l'on boit pourrait contenir au moins un verre d'eau cométaire. Bien entendu, la nature de l'eau ne dépend pas de son origine, et le fait qu'elle provienne de comètes ne modifie pas ses propriétés. En revanche, l'apport corrélé de matière organique cométaire, dans les océans terrestres primitifs, il y a quatre milliards d'années, pourrait avoir eu des effets majeurs : synthétisées dans le nuage protosolaire par des processus de chimie cosmique très spécifiques, il pourrait s'agir de molécules et radicaux possédant un niveau de complexité et de réactivité non atteints par la chimie terrestre aquatique d'alors ; leur arrivée pourrait avoir fortement contribué à amorcer l'évolution vers le vivant.

L'intérêt pour déchiffrer le matériau cométaire est tel que deux missions spatiales très importantes ont été développées, l'une par la NASA, StarDust, l'autre par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) : Rosetta. StarDust, actuellement dans l'espace, va passer dans la queue d'une comète, pour y collecter les grains, et les rapporter sur Terre, en 2006 : on espère pouvoir analyser, grain par grain, ce matériau, et en identifier la composition. Rosetta, qui sera lancée de Kourou le 18 janvier 2003, va aller à la rencontre d'un noyau cométaire pour se mettre en orbite et l'analyser pendant des mois ; un petit engin de 80 kg en sera éjecté, pour se poser à même le noyau, forer le sol, prélever des échantillons, et les analyser *in situ*, avec les plus performants des instruments disponibles actuellement : véritables prouesses robotiques, ils devront, de manière parfaitement automatisée, tenter d'identifier la composition élémentaire, isotopique, moléculaire et minéralogique de l'ensemble de cette matière cométaire : glaces et grains, minéraux, réfractaires et organiques ; autant de reliques du matériau d'origine du Système Solaire. Rendez-vous en octobre 2012.