

La Lune et l'origine de l'homme

■ JACQUES LASKAR

Si la Lune n'existait pas, l'orientation de l'axe de rotation de la Terre ne serait pas stable, et subirait de larges variations chaotiques au cours des âges. Les changements climatiques engendrés par ces variations auraient alors perturbé fortement le développement de la vie organisée.

Nous sommes tous familiers du rythme des saisons, dont la succession résulte de l'inclinaison de l'équateur par rapport au plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil. Cette inclinaison de $23^{\circ}27'$, appelée obliquité par les astronomes, est aussi la cause de l'existence des cercles polaires, à l'intérieur desquels les jours et les nuits peuvent durer plusieurs mois. La répartition de la quantité de chaleur solaire reçue à la surface de la Terre dépend de son obliquité, qui est l'un des éléments fondamentaux de la compréhension du climat. Les calculs que nous avons effectués au Bureau des Longitudes montrent que la Lune stabilise les oscil-

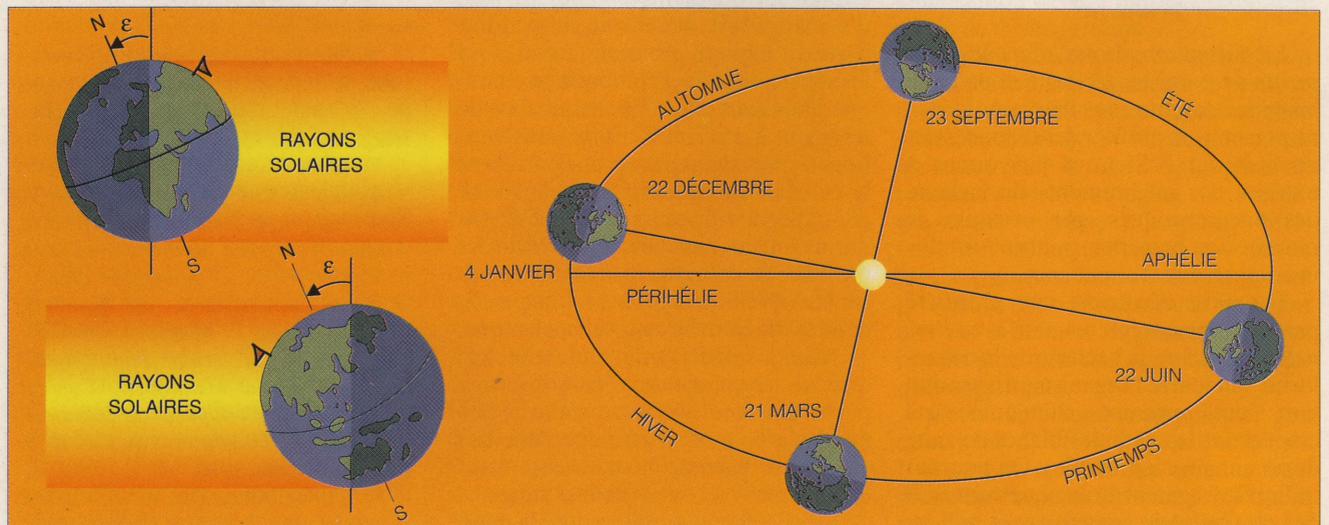
lations possibles de l'obliquité, et qu'elle agit donc comme un régulateur climatique de la Terre.

En 120 avant J.-C., Hipparque découvre que la direction de l'axe de rotation de la Terre n'est pas fixe. En effet, ce dernier décrit un cône dans l'espace, avec une période d'environ 26 000 ans. Ce mouvement, appelé précession des équinoxes, résulte de l'existence du bourrelet équatorial de la Terre, et du couple exercé sur ce bourrelet par la Lune et par le Soleil. On observe très facilement ce phénomène de précession de l'axe de rotation d'un corps solide dans un champ de pesanteur quand on fait tourner une toupie sur une table.

Une des conséquences de ce phénomène est que l'axe de rotation de la Terre ne pointe pas toujours vers l'étoile polaire, mais décrit un large cercle sur la voûte céleste.

La précession des équinoxes constitue d'ailleurs une objection importante aux arguties des adeptes de l'astrologie, car elle a introduit un tel décalage entre le calendrier et le mouvement apparent du Soleil qu'à la date correspondant au signe du Bélier, le Soleil se trouve maintenant dans la constellation des Poissons.

Cette précession a un effet sur le climat de la Terre. En effet, l'orbite de la Terre n'est pas circulaire, mais approxi-



1. L'ALTERNANCE DES SAISONS dépend de l'obliquité ϵ de la Terre (a) et de la précession des équinoxes (b). En été, la quantité de chaleur solaire reçue dans l'hémisphère Nord est plus importante que dans l'hémisphère Sud. Selon la valeur de l'angle de précession,

la Terre est au point le plus près du Soleil (périhélie), pendant l'été de l'hémisphère Nord ou pendant l'hiver, comme c'est le cas actuellement. Il en résulte une augmentation, ou une diminution du contraste des saisons.

mativement elliptique, comme l'a montré Kepler en 1609, le Soleil occupant un des foyers de l'ellipse. L'excentricité de l'ellipse (qui mesure son aplatissement) est faible (0,017), mais suffit pour changer la quantité de chaleur reçue à la surface de la Terre, entre le périhélie, position où la Terre est le plus près du Soleil, et l'aphélie où elle est à son éloignement maximal.

Actuellement, le passage au périhélie a lieu le 4 janvier pendant l'hiver boréal. Cette différence d'éloignement

diminue le contraste des saisons dans l'hémisphère Nord, alors qu'elle l'accroît dans l'hémisphère Sud. Dans 13 000 ans, l'effet sera contraire, et les contrastes des saisons seront plus accentués dans l'hémisphère Nord. La précession des équinoxes modifie donc la répartition de l'insolation en un lieu de la Terre au cours de l'année. En fait, des variations de climats beaucoup plus importantes semblent aussi résulter des variations de l'excentricité et de l'obliquité de l'orbite de la Terre.

La théorie astronomique des paléoclimats

Pour Kepler, la Terre décrivait une ellipse immuable. Newton a bouleversé cet équilibre en montrant que la masse des autres planètes du Système solaire perturbait l'orbite de la Terre, qui n'est donc une ellipse qu'en première approximation : ni l'excentricité de la Terre, ni son obliquité ne sont fixes. Le Verrier (célèbre pour avoir découvert, par le calcul des perturbations



2. LA PRÉCESSION DES ÉQUINOXES. La Terre n'est pas parfaitement sphérique, mais légèrement aplatie aux pôles et renflée à l'équateur. Sous l'action gravitationnelle de la Lune et du Soleil, son axe de rotation décrit un cône, comme le fait une toupie. La direction

de l'axe de la Terre trace un large cercle sur la voûte céleste en 26 000 ans environ. Il y a 5 000 ans, la direction du pôle Nord était donnée par l'étoile alpha du Dragon, et non pas par l'étoile polaire. Dans 13 000 ans, cette direction sera celle de Véga.

d'Uranus, la planète Neptune en 1846) a, le premier, calculé les variations à très long terme, appelées variations séculaires, de l'excentricité de la Terre. Il poursuivait en cela les travaux de Laplace effectués un peu avant la Révolution française. C'est en utilisant les solutions de LeVerrier pour le mouvement orbital de la Terre, que l'astronome yougoslave Milutin Milankovitch émit, en 1941, l'hypothèse que les grandes périodes glaciaires du Quaternaire résultent des variations de l'insolation aux hautes latitudes induites par les variations séculaires de l'orbite et de l'orientation de la Terre. Cette théorie n'a pas été acceptée immédiatement. En fait, ces variations d'insolation ne semblaient pas suffisantes pour engendrer des variations de température pouvant entraîner une glaciation.

Cette théorie a été largement consolidée depuis environ deux décennies. Les mesures isotopiques des taux d'oxygène O^{18}/O^{16} effectuées par John

Imbrie et ses collaborateurs fournissent des indicateurs de l'épaisseur des calottes polaires qui ont permis d'obtenir des estimations des températures moyennes des mers dans les époques reculées.

Actuellement, ces mesures effectuées par l'analyse des carbonates présents dans les carottes de sédiments marins permettent de retrouver les climats du passé sur des durées d'environ trois millions d'années. Il existe même des enregistrements géologiques, beaucoup moins précis, mais qui permettent de remonter jusqu'à 200 millions d'années. D'autre part, une meilleure modélisation de la réponse climatique aux variations de l'orbite terrestre montre que l'effet des changements d'insolation peut être amplifié par des effets secondaires tels que l'extension des calottes polaires ou le changement de la composition de l'atmosphère.

Un des éléments essentiels dans l'étude des variations d'insolation de la

Terre est le calcul des variations de son obliquité sous l'influence des perturbations planétaires. Sur un million d'années, cette variation n'est que de $\pm 1,3$ degré autour de la valeur moyenne de 23,3 degrés. Cela peut sembler très peu, mais entraîne cependant des variations de près de 20 pour cent dans l'insolation reçue en été à 65 degrés de latitude Nord. Or la quantité de chaleur supplémentaire reçue pendant l'été aux hautes latitudes est une donnée importante pour l'étude des climats, car c'est elle qui fait fondre les glaces accumulées pendant l'hiver et empêche l'extension des calottes polaires.

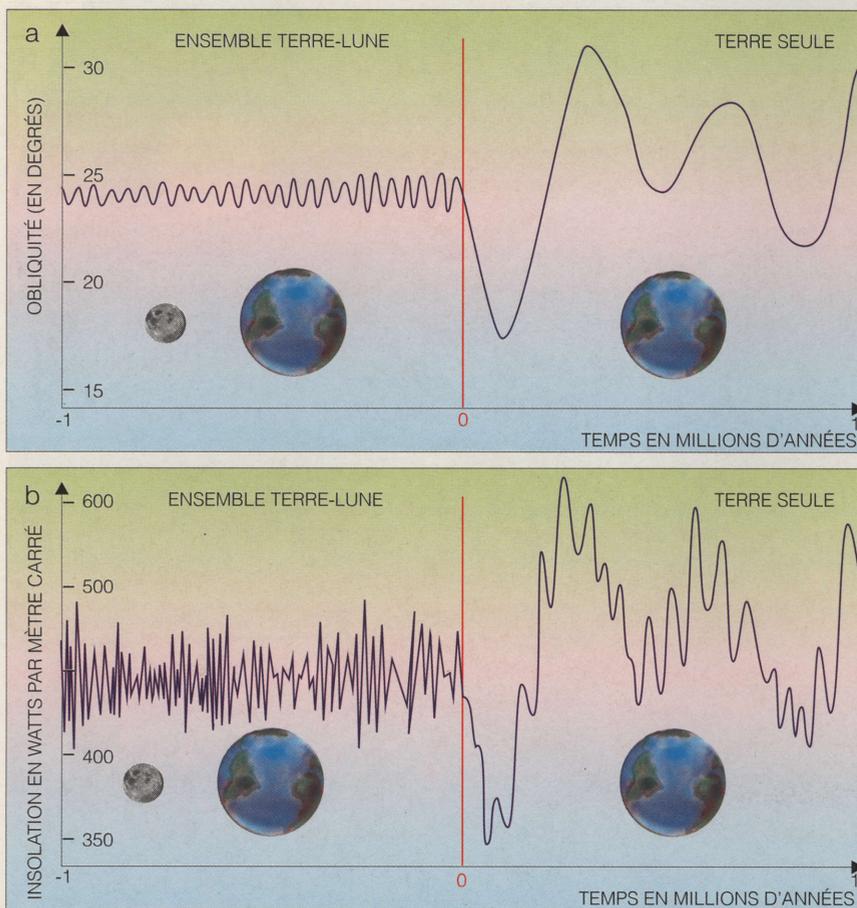
Les faibles variations de l'obliquité de la Terre sont déterminantes pour lui assurer la relative régularité climatique dont elle a bénéficié depuis plusieurs millions d'années, et qui a permis l'apparition de vie organisée telle que nous la connaissons. Les périodes glaciaires constituent des changements climatiques importants, mais qui n'ont pas été suffisants pour altérer de manière durable les conditions de vie à la surface de la Terre.

Les variations de l'obliquité de la Terre

Les perturbations exercées par les autres planètes font tourner l'orbite de la Terre dans l'espace avec un mouvement qui peut se représenter, de manière approximative, comme la résultante de plusieurs rotations uniformes de périodes allant de 40 000 à plusieurs millions d'années, chacune d'entre elles provenant plus particulièrement de l'influence d'une des planètes. C'est l'effet de ce mouvement compliqué sur notre toupie terrestre qui induit les petites oscillations de son obliquité.

Si la période de l'excitation produite par ce mouvement de l'orbite de la Terre est proche de la période de précession de son axe, un phénomène classique en physique intervient : la résonance. Il y a, par exemple, résonance si on pousse une balançoire au bon moment, à chaque fois qu'elle arrive à son point le plus haut. Même si cette poussée est très petite, on verra s'amplifier les oscillations de la balançoire (surtout s'il n'y a pas de frottements). En revanche, si l'on pousse la balançoire n'importe quand, il ne se passera rien de particulier.

Au lieu d'utiliser les périodes, nous considérerons plutôt des vitesses de rotation de ces différents mouvements. Comme tous les mouvements de précession dont nous parlerons sont très lents, l'unité employée est la seconde d'arc par an ou, en abrégé, seconde par an. Une vitesse de rotation de une seconde par an correspond alors à une période de



3. SUR CETTE SIMULATION NUMÉRIQUE, la Lune est supprimée brutalement à la date d'aujourd'hui ($t = 0$). Sous l'action des perturbations planétaires, et en présence de la Lune, l'obliquité de la Terre subit de petites variations ($\pm 1,3$ degré) autour de sa valeur moyenne (23,3 degrés) (a). Ces variations sont suffisantes pour induire les variations de près de 20 pour cent de l'insolation reçue sur Terre à 65 degrés de latitude Nord (b) qui sont, selon la théorie de M. Milankovitch, à l'origine des périodes glaciaires. Après la suppression de la Lune, les variations sur un million d'années de l'obliquité et de l'insolation deviennent beaucoup plus importantes.

$360 \times 3600 = 1\,296\,000$ ans. Je ferai même un léger abus de langage en appelant ces vitesses angulaires de rotation des fréquences.

Dans ces nouvelles rotations, la fréquence de précession de la Terre est de 50,47 secondes par an, alors que les fréquences principales du mouvement de l'orbite de la Terre vont de 26,33 secondes par an jusque pratiquement 0,67 seconde par an, les principales étant 18,85 secondes par an et 17,75 secondes par an. Nous sommes donc loin des résonances, ce qui explique les faibles variations de l'obliquité de la Terre. Il n'en est pas de même pour Mars, dont la fréquence de précession est de 7,5 secondes par an pour une obliquité actuelle de 25,2 degrés, et William Ward, du *Jet Propulsion Laboratory*, avait remarqué que Mars présentait des variations d'obliquité importantes (± 10 degrés), à cause de la proximité des résonances séculaires orbitales.

Et si l'on supprimait la Lune?

Il est, bien entendu, hors de question de faire ou d'inciter qui que ce soit à faire une chose pareille, mais seulement de comprendre, à travers des simulations numériques sur ordinateur, l'importance de l'action de la Lune sur la dynamique de la Terre. En effet, le couple gravitationnel qui s'exerce sur le bourrelet équatorial de la Terre provient aux deux tiers de l'action de la Lune, pour environ un tiers du Soleil. Sans la Lune, la fréquence de précession de la Terre passe de 50,47 secondes par an à environ 15,6 secondes par an, et elle s'approche alors des fréquences orbitales de la Terre, ce qui entraîne la possibilité de résonance. En 1982, W. Ward avait étudié ce problème sur un modèle simplifié et avait conclu que la suppression de la Lune entraînerait des variations d'obliquité de la Terre de l'ordre de celles de Mars. Toutefois, en l'absence de la Lune, la Terre aurait eu une vitesse de rotation plus élevée, ce qui augmenterait l'importance de son bourrelet équatorial. Selon W. Ward, l'effet accru du Soleil compenserait l'absence du couple dû à la Lune pour conduire finalement à des variations d'obliquité similaires à celles observées actuellement.

Au Bureau des Longitudes (Paris), nous avons étudié ce problème en utilisant un modèle beaucoup plus précis du mouvement de la Terre. Nous disposons de la solution du mouvement orbital de la Terre et des autres planètes que j'avais calculé auparavant sur 400 millions d'années. Cette solution m'avait permis de montrer, en 1989, que le mouvement orbital des planètes internes

(Mercure, Vénus, Terre et Mars) est chaotique. Il était donc possible d'étudier numériquement, sur de très longues durées, les variations de l'orientation de la Terre produites par ses variations orbitales.

Dans un premier temps, nous avons simulé une disparition brutale de la Lune et observé ce que devient l'obliquité de la Terre pendant un million d'années, ce qui est relativement court, car, pour une telle durée, les effets possibles provenant de la nature chaotique du mouvement orbital ne sont pas encore sensibles. Les variations d'obliquité de la Terre qui en résultent sont de l'ordre de ± 15 degrés, et les variations induites pour l'insolation à 65 degrés de latitude Nord sont considérablement plus importantes qu'auparavant. Si les variations passées de l'insolation dans les hautes latitudes sont bien, comme l'avance la théorie de M. Milankovitch, responsables des passages en période glaciaire, il est fort probable que les variations de la figure 3 induiront à la surface de la Terre des variations de température encore plus importantes.

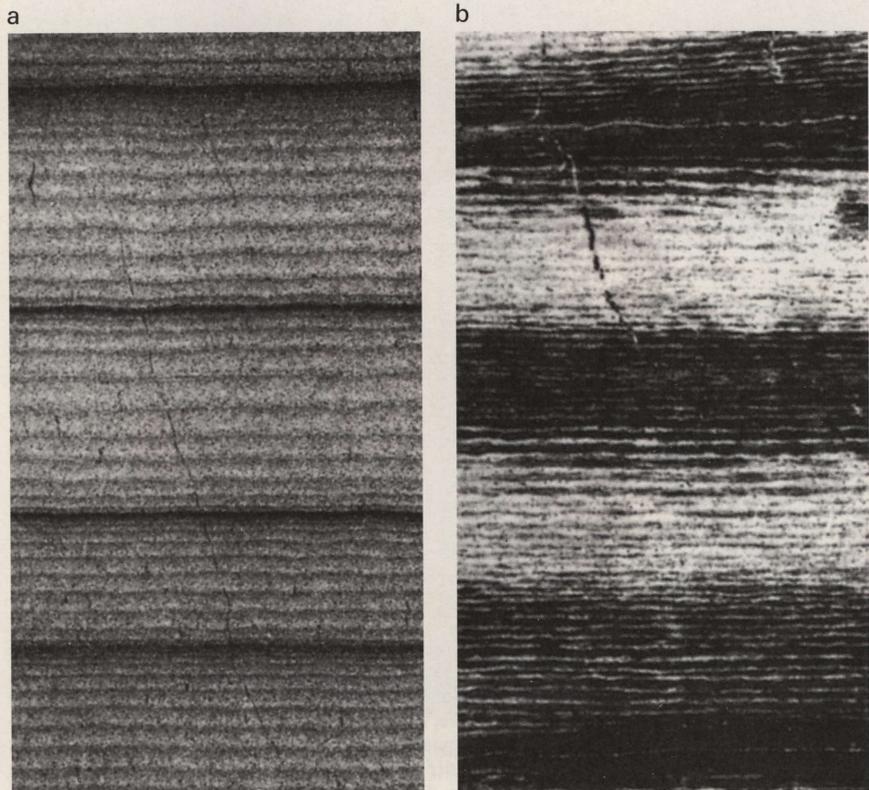
Notre but n'est cependant pas de supprimer la Lune, mais de comprendre l'évolution possible que la Terre aurait connue si la Lune n'avait pas existé ; se pose alors le problème de son origine.

L'origine de la Lune

La Lune pose de gros problèmes aux astronomes. Sa masse, 1/81 de celle de la Terre, est très importante pour un satellite d'une planète, ce qui est unique dans le Système solaire. Seuls Jupiter, Saturne et Neptune possèdent des satellites de masse comparable, alors qu'elles sont respectivement 318, 95 et 17 fois plus massives que la Terre. La formation de la Lune pose alors un problème particulier, et plusieurs scénarios ont été avancés pour expliquer la formation de la Lune.

Dans le scénario fission, la Terre, en rotation très rapide (2-3 heures), se sépare d'une partie de son manteau sous l'effet de la force centrifuge. Ce modèle est pratiquement abandonné, car il est difficile d'expliquer une rotation initiale aussi rapide de la Terre, la différence notable de composition chimique de la Terre et la Lune, et surtout le fait que la Lune ne se trouve pas dans le plan de l'équateur, mais à cinq degrés du plan de l'orbite de la Terre.

La Lune aurait pu se former en même temps que la Terre, par accréation de matériaux en orbite autour de celle-ci. Ce scénario explique la présence de la Lune proche du plan de l'écliptique, mais il n'explique pas la sensible diffé-



4. CES COUCHES SÉDIMENTAIRES AUSTRALIENNES, étudiées par G. Williams, sont âgées de 650 millions d'années (a). Elles sont produites par les dépôts successifs de boue foncée et de sable clair dans un estuaire, au rythme des marées. En supposant constante la durée de l'année, on retrouve la durée du jour et la distance Terre-Lune à ces époques reculées. Datant de 2,5 milliards d'années, les couches (b) témoignent aussi des effets de marées lunaires.

rence de composition chimique entre la Terre et la Lune.

Dans l'hypothèse de la capture, la Lune, formée dans une région voisine de l'espace, est capturée par le champ gravitationnel de la Terre. Deux modes de capture sont actuellement proposés. Une capture «douce» et une capture «brutale», où un corps massif vient percuter la Terre, les débris résultant de cette collision s'accrétant ensuite pour former la Lune. Le problème posé par ces hypothèses, la dernière étant la plus souvent retenue actuellement, réside dans la faible probabilité qu'un tel événement puisse se produire. Cela n'est guère satisfaisant car le principe de «médiocrité» voudrait que les événements observés soient des événements génériques, et non des événements exceptionnels.

Si l'origine de la Lune reste énigmatique, et est l'objet de spéculations

variées, il est en revanche possible de retracer son histoire jusqu'à une époque très reculée.

Histoire de la Lune

La Lune exerce sur la Terre une force d'attraction que nous observons quotidiennement à travers le phénomène des marées. Comme la Terre tourne plus rapidement sur elle-même (en un jour) que la Lune autour de la Terre (en 28 jours), les marées se déplacent à la surface de la Terre, et ce déplacement s'accompagne d'une dissipation d'énergie.

Il en résulte un ralentissement de la vitesse de rotation de la Terre (donc un allongement de la durée du jour de 0,002 seconde par siècle), et l'éloignement de la Lune d'environ 3,5 centimètres par an. Il y a plusieurs millions d'années, la Terre tournait donc plus

rapidement sur elle-même, et la Lune était plus près.

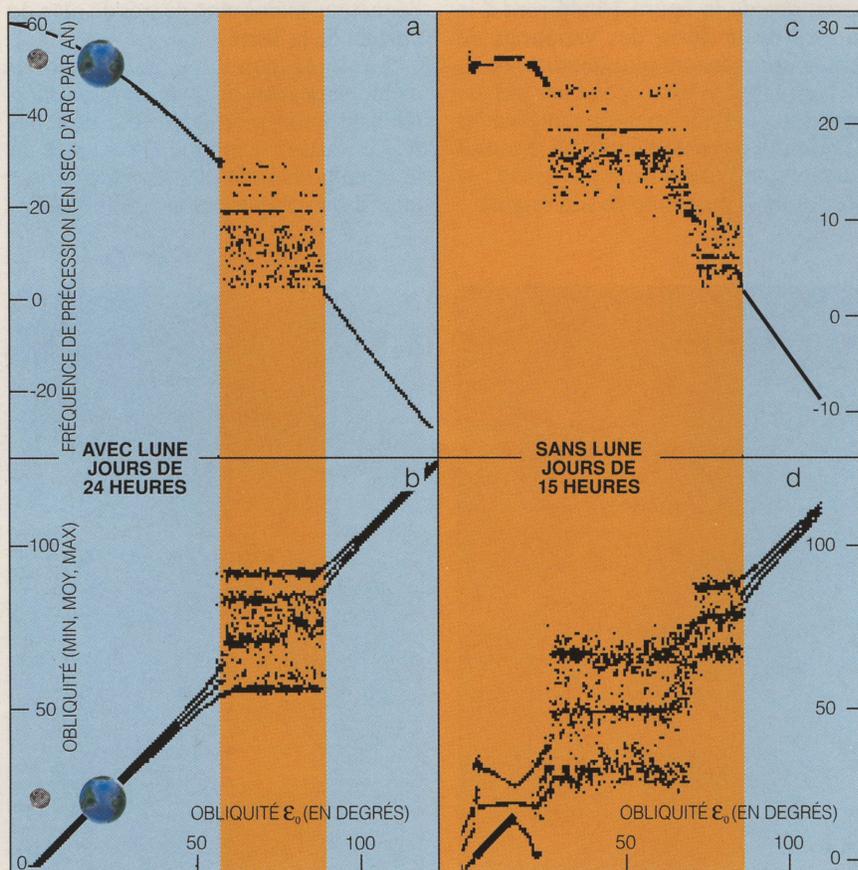
Ce ralentissement n'est pas constant, et l'on peut en retrouver une trace dans différents indicateurs qui varient suivant les cycles des marées océaniques, telle la croissance des coraux et de certains coquillages fossiles. Toutefois, c'est en analysant des dépôts sédimentaires que le géologue australien G. Williams est remonté le plus loin dans le temps pour retrouver que la durée du jour, il y a 2,5 milliards d'années, était d'environ 20 heures, alors que la Lune se trouvait à 348 000 kilomètres de la Terre (384 000 kilomètres actuellement).

Pour retrouver ces valeurs, il a analysé les dépôts successivement apportés dans un estuaire au rythme des marées. Le cycle annuel de ces marées permet de retrouver l'échelle de temps, en supposant, ce qui semble raisonnable, que la durée de l'année n'a pas sensiblement varié depuis ce temps. La Lune existait donc déjà à cette époque. D'autres traces fossiles plus ténues permettent de penser que la Lune était présente à des époques encore plus reculées, de l'ordre de 3,8 milliards d'années. Si la Lune a été capturée, elle l'a donc été dans une phase très précoce du Système Solaire.

La Terre sans Lune

Si la Lune n'avait pas été présente, la vitesse de rotation de la Terre serait, nous l'avons vu, plus élevée, car elle n'aurait pas été ralentie par l'effet de marée dû à la Lune. En extrapolant les valeurs trouvées par G. Williams, on peut estimer une vitesse de rotation primordiale de la Terre de l'ordre de 1,6 fois sa vitesse actuelle, soit une durée du jour de 15 heures. Avec Frédéric Joutel et Philippe Robutel, nous avons étudié, au Bureau des Longitudes, les variations possibles de l'obliquité de la Terre sous cette hypothèse. Pour ce faire, nous avons utilisé une nouvelle méthode d'analyse de la stabilité d'un mouvement : l'analyse en fréquence. Pour chaque valeur de l'obliquité initiale de la Terre, on obtient une vitesse de précession de son axe de rotation. Si le mouvement est stable, cette vitesse de précession varie continûment quand on change l'obliquité initiale.

En revanche, si le mouvement est chaotique ou instable, la vitesse de précession n'est plus définie de manière unique, et dépend fortement de minuscules différences dans les conditions initiales. Le graphe de la vitesse de précession en fonction de l'obliquité initiale permet alors de statuer sur la stabilité de l'obliquité de la Terre (voir la figure 5). Cette analyse montre l'existence d'une vaste zone chaotique qui va



5. CHAQUE POINT de ces figures correspond à une simulation du mouvement de la Terre sur 18 millions d'années, avec la Lune (a-b) et sans Lune (c-d). Les valeurs minimales, moyennes et maximales atteintes par l'obliquité sont portées en (b) et (d) en fonction de l'obliquité initiale. Si le mouvement est stable, la fréquence de précession (p) varie continûment en fonction de l'obliquité initiale (ϵ_0). Dans cette zone régulière (incluant les conditions actuelles de la Terre), les variations d'obliquité de la Terre sont très faibles comme dans les zones bleues des figures (a) et (c). En revanche, dans la zone rouge de la figure (a), la fréquence de précession n'est pas définie : l'obliquité est chaotique, et peut varier de 60 à 90 degrés en quelques millions d'années. Sans la Lune, et pour une période de rotation de la Terre de 15 heures, la zone chaotique (en rouge) s'étend de 0 à près de 90 degrés (c). Sur 18 millions d'années, l'obliquité ne parcourt pas intégralement cette zone (d), mais aucune barrière ne l'empêche de la faire sur une durée plus longue.

d'une obliquité nulle jusqu'à 85 degrés environ : si, quelle que soit l'obliquité initiale de la Terre comprise entre ces deux valeurs, la Lune n'est pas présente, l'obliquité de la Terre pourra subir de très fortes oscillations et parcourir pratiquement toute cette zone en quelques millions d'années.

Sur la figure 5, on a représenté les valeurs minimales, moyennes et maximales, atteintes par l'obliquité de la Terre en 18 millions d'années, pour les différentes valeurs de l'obliquité initiale. Sur une durée aussi courte, l'obliquité ne parcourt pas toute la zone chaotique pour les exemples considérés, mais notre analyse montre que des variations sur la totalité de la zone sont possibles sur des durées plus longues.

En l'absence de la Lune, la Terre présenterait donc des variations d'obliquité telles que le climat à sa surface serait terriblement modifié. Il faut en effet souligner que, avec une obliquité de 85 degrés, la Terre se retrouve pratiquement couchée sur son orbite, comme l'est Uranus. La quasi-totalité de la Terre subirait alors, comme c'est le cas actuellement pour les zones polaires, des jours et des nuits de plusieurs mois. Au pôle, le Soleil resterait longtemps très haut dans le ciel, et il est fort probable que de telles conditions d'insolation entraîneraient des modifications importantes de l'atmosphère de la Terre. Bien entendu, en supposant une vitesse de rotation primordiale de la Terre en 15 heures, nous avons fait le choix qui nous a paru le plus vraisemblable, mais d'autres scénarios de formation de la Lune peuvent conduire à des vitesses de rotation différentes pour la Terre. Comme tout cela est très fortement spéculatif, nous avons préféré étudier aussi la stabilité de l'obliquité de la Terre en l'absence de la Lune pour toute valeur de la rotation primordiale de la Terre. On trouve alors que, pour toute période de rotation qui va de 12 à 48 heures, il existe une très large zone chaotique pour l'obliquité de la Terre, allant de près de zéro degré à environ 85 degrés (voir la figure 6). Il est donc légitime d'affirmer que la Lune agit comme un régulateur climatique pour la Terre et que c'est elle qui nous assure, à long terme, une relative stabilité climatique.

On peut alors se demander ce qu'il en est des autres planètes du Système solaire.

Le comportement chaotique des obliquités des planètes

Nous avons étudié de la même manière que pour la Terre la stabilité de l'orientation de toutes les planètes principales du Système solaire. Mercure et

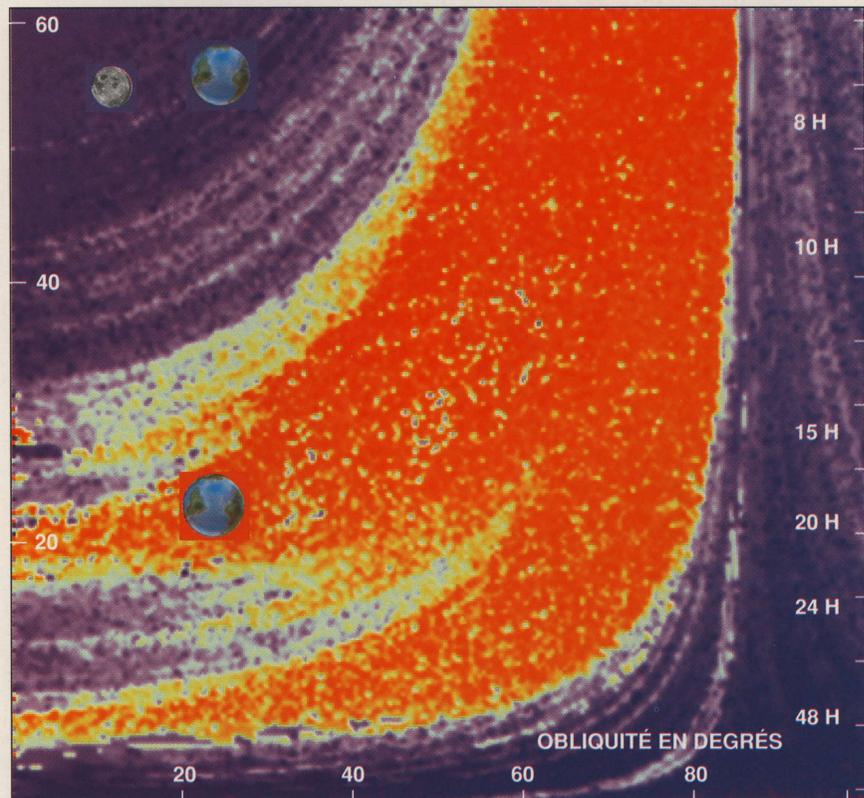
Vénus sont particulières, car, sans doute à cause des effets de marée avec le Soleil, leurs vitesses de rotation sont actuellement très faibles. Vénus possède aussi une particularité qui intrigue depuis longtemps : elle ne tourne pas dans le même sens que les autres planètes, ou en d'autres termes, elle a la tête en bas.

Jusqu'à présent, la plupart des astronomes qui s'étaient penchés sur cette question en avaient conclu que Vénus était née de cette manière, ou tout au moins couchée, car alors les effets dissipatifs résultant des interactions noyau-manteau, où des forces de marées atmosphériques dues au Soleil, peuvent la ramener la tête en bas.

Nous avons montré au contraire que, même si Vénus tourne au début avec une vitesse de rotation similaire à celle de la Terre, et dans le même sens que celle-ci, la présence d'une très large zone chaotique fait que l'obliquité de Vénus peut atteindre des valeurs très élevées, voisines de 90 degrés. Les effets dissipatifs peuvent alors l'amener dans sa position actuelle, où elle finira par se stabiliser.

Pour Mercure, la situation est un peu différente. Comme dans le cas de Vénus, nous ne connaissons pas la période de rotation primordiale de Mercure, mais il suffit de supposer qu'elle était plus courte que 300 heures pour assurer, qu'au cours de son histoire, Mercure a connu un épisode très fortement chaotique, avec des variations d'obliquité allant de 0 degré à 90 degrés en quelques millions d'années. Ensuite, comme la planète continue de ralentir à cause des effets de marée dus au Soleil, elle pourra se redresser pour finir dans sa position actuelle.

Mars est loin du Soleil, et ses satellites, Phobos et Deimos, ont des masses beaucoup trop faibles pour ralentir sa rotation, et sa période de rotation actuelle, de 24 heures 37 minutes, est voisine de sa période de rotation primordiale. L'équateur de Mars est incliné de 25 degrés sur le plan de son orbite, et la vitesse de précession de Mars, de 7,26 secondes par an, est proche de certaines fréquences du mouvement de son orbite. De plus, les variations de l'inclinaison de l'orbite de Mars sont bien plus notables que celles de la Terre. Il s'en-



6. ANALYSE DE LA STABILITÉ de l'obliquité de la Terre (sans la Lune), pour toute valeur de la durée du jour et de l'obliquité initiale. Les mouvements stables correspondent à la zone bleue, et les mouvements fortement chaotiques aux zones rouges et orange. Dans la zone stable, où l'on peut aussi représenter la position actuelle du système Terre-Lune, les variations de l'obliquité de la Terre sont très faibles. En revanche, dans la zone chaotique rouge, l'obliquité pourra parcourir intégralement une ligne horizontale de la figure en plusieurs millions d'années. Pour une vitesse de rotation de la Terre de 20 heures, par exemple, l'obliquité de la Terre sans la Lune peut aller de 0 degré à près de 85 degrés.

suit que les variations de son obliquité sur un million d'années sont beaucoup plus grandes que celles de la Terre, et W. Ward avait trouvé des variations d'obliquité de l'ordre de ± 10 degrés autour d'une valeur moyenne de 25 degrés. Ces variations entraînent de fortes variations climatiques à la surface de cette planète, et certaines structures à sa surface semblent témoigner de ces changements de climats anciens.

Les calculs que nous avons récemment effectués montrent que le mouvement de l'obliquité de Mars est chaotique. Cela a deux conséquences. Tout d'abord, comme pour le mouvement orbital des planètes intérieures, il n'est pas possible de faire des prédictions pour le mouvement de précession de Mars au-delà de quelques millions d'années.

Plus important encore, l'obliquité de Mars peut subir des variations beaucoup plus grandes que celles qui avaient été prédites par W. Ward, et qui peuvent aller de 0 degré à 60 degrés en quelques millions d'années. Les climats du passé de Mars devront être donc revus à la lumière de ces données nouvelles. L'existence de cette large zone chaotique pour l'orientation de la planète Mars a une autre conséquence : l'obliquité de Mars ne peut être considérée comme primordiale, ce qui supprime une contrainte pour les modèles de formation du Système solaire.

La formation du Système solaire

Dans les modèles de formation du Système solaire, depuis les travaux de Safronov en 1960, on admet l'existence d'une nébuleuse solaire initiale très massive. Par instabilité gravitationnelle, une partie de cette nébuleuse s'effondre et va former le Soleil. Le reste se condense en petits corps, les planétoïdes. Les planètes se forment ensuite à partir des plus gros de ces planétoïdes par accrétion des autres planétoïdes au cours de rencontres collisionnelles. Une grande partie de ces planétoïdes est ensuite éjectée.

Safronov avait montré que, si l'accrétion se faisait à partir de beaucoup de planétésimaux de petite taille, la rotation des planètes se faisait toujours dans le même sens, et que les obliquités étaient pratiquement nulles. Pour rendre compte des variations importantes observées dans les obliquités, Safronov devait introduire une composante dite stochastique dans le mécanisme d'accrétion et qui consiste dans une phase finale avec quelques collisions hétérogènes de plus gros planétésimaux qui peuvent alors rendre compte des obliquités observées.

Les résultats que nous venons d'obtenir montrent qu'en fait, toutes les obliquités des planètes inférieures (Mercure, Vénus, Terre et Mars) peuvent résulter uniquement de l'action des perturbations séculaires des planètes, complétée, pour Mercure et Vénus, par les effets dissipatifs résultant des effets de marées dues au Soleil.

Nous montrons aussi que les obliquités des planètes extérieures sont essentiellement stables, tout comme leur mouvement orbital. On ne peut donc pas expliquer de cette manière la forte obliquité d'Uranus (98 degrés). Il est cependant possible d'envisager pour Uranus un scénario similaire à celui proposé ici pour Vénus dans l'hypothèse de Safronov d'un Système solaire primordial massif.

Possibilités de vie extraterrestre

Le 12 octobre 1992, la NASA démarrait un vaste programme de recherche de signaux venant d'éventuelles civilisations évoluées dans le cadre du projet SETI (*Search for Extra Terrestrial Intelligence*). Ce programme consiste à rechercher, à l'aide de radiotélescopes, pendant les dix ans qui viennent, et dans tous les domaines de fréquence possible, des signaux radio d'origine extraterrestre.

Comme le ciel est vaste, environ 800 étoiles de type solaire se trouvant à moins de 80 années-lumière de la Terre ont été sélectionnées pour être écoutées plus attentivement, pendant environ 20 heures chacune, ce qui semble être le minimum pour avoir une chance de détecter quelque chose, à moins d'une puissance d'émission particulièrement importante provenant de cet éventuel système extrasolaire.

Un principe fondamental sous-tend un tel projet : notre situation sur la Terre, autour du Soleil ne peut être que banale, et doit donc s'être répétée de multiples fois dans notre Galaxie, sous de multiples formes. Seulement, nous sommes bien incapables de quantifier la probabilité d'apparition de vie organisée, similaire à la nôtre sur une planète autour d'une étoile de la galaxie.

Sans parler de l'apparition de la vie elle-même ni des conditions qui peuvent conduire au développement d'une civilisation susceptible de vouloir communiquer à l'aide d'émissions radio, nous n'avons, jusqu'à présent, aucune idée de la probabilité qu'une étoile de type solaire possède un cortège planétaire. Malgré les annonces fréquentes de découverte de planètes extrasolaires, aucun objet de ce type n'a encore été mis en évidence, et seules les observations de disques (peut-être) protoplané-

taires du type bêta-pictoris sont convaincantes.

Presque toutes les estimations de probabilité de vie extraterrestre semblent cependant s'accorder sur un point : dans tout système planétaire, la planète qui se trouve ni trop près, ni trop loin du Soleil peut permettre le développement d'une vie organisée telle que nous la connaissons sur la Terre. En effet, des simulations effectuées par Michael Hart en 1978 montraient que, en dehors d'une «zone d'habitabilité» étroite, il pourrait se produire un emballement de l'effet de serre entraînant une situation du genre de celle de la planète Vénus, ou une disparition quasi totale de l'atmosphère comme sur Mars.

Nos calculs montrent qu'il en est tout autrement et que l'évolution de la vie à la surface de la Terre est sans doute intimement liée à un événement qui apparaît comme peu probable dans les modèles de formation de systèmes solaires : le fait qu'une des planètes qui se trouvent dans la zone d'habitabilité parvienne à stabiliser suffisamment ses variations d'insolation à long terme grâce à un satellite massif du genre de la Lune.

Bien sûr, on pourra trouver d'autres situations particulières qui conduiront à une stabilité climatique pour la planète considérée, mais il est important de constater que cette situation n'est sans doute pas commune. La probabilité d'existence d'une planète de stabilité climatique comparable à la nôtre dans un système planétaire doit sans doute être revue à la baisse de plusieurs ordres de grandeur, et il faudra en faire de même pour la probabilité de réussite de ce projet de la NASA.

Les questions qui subsistent

En utilisant le mouvement orbital des planètes du Système solaire, nous avons montré que la Terre doit sans doute sa stabilité climatique à la présence de la Lune. Il faut du reste souligner que, si notre existence est intimement liée à l'existence de la Lune, il est possible d'accepter pour la formation de la Lune un scénario peu probable ; ce scénario serait à rejeter si nous nous imposions d'être dans une situation générique. Les modèles de formation de la Lune doivent donc être réévalués en conséquence.

D'autre part, le mouvement orbital des planètes est lui-même chaotique. Il ne semble pas que cela entraîne, pour la Terre, de changements considérables dans les paramètres de son orbite, mais, dans un autre système planétaire, il pourrait en être tout autrement, et les instabilités orbitales seules pourraient

entraîner de fortes variations climatiques, incompatibles avec l'émergence de vie organisée, ou même l'éjection de la seule planète se trouvant initialement dans la zone d'habitabilité. Seule une connaissance plus approfondie de la dynamique globale des systèmes planétaires permettra de répondre, au moins partiellement, à de telles questions.

Nous sommes aussi encore loin de connaître les mécanismes de formation des systèmes planétaires. Une des difficultés importantes dans la résolution de ce problème réside dans le fait que nous ne disposons que d'un seul exemple de système planétaire, le nôtre. La découverte d'un autre système planétaire serait un élément essentiel pour la compréhension de l'histoire de notre propre Système solaire, même si aucune forme de vie n'existe sur ce système.

Enfin, la réponse climatique à la surface d'une planète sous l'effet de changements importants de son orbite ou de son orientation est encore mal connue, et il est souhaitable que le développement de la connaissance de la dynamique des atmosphères planétaires permettent de pouvoir simuler sur ordinateur les effets de ces changements.

Ces différents problèmes, qui relèvent de champs très différents de l'astronomie, constituent un vaste programme de recherche. Des efforts soutenus pour les résoudre nous apporteront sans doute des éléments importants pour comprendre l'origine du Système solaire et l'apparition de la vie sur la Terre.

Jacques LASKAR est astronome et chercheur au CNRS et dans l'équipe «Astronomie et systèmes dynamiques» du Bureau des Longitudes.

J. LASKAR, *A Numerical Experiment of the Chaotic Behavior of the Solar System in Nature*, vol. 338, pp. 237-238, 16 mars 1989.

G. WILLIAMS, *Tidal Rhythmites : Geochronometers for the Ancient Earth-Moon System in Episodes*, vol. 12, n° 3, septembre 1989.

J. LASKAR, *La stabilité du Système solaire in Chaos et déterminisme*, sous la direction de A. Dahan et al., Point Seuil, 1992.

J. LASKAR et P. ROBUTEL, *The Chaotic Obliquity of the Planets in Nature*, vol. 361, pp. 608-612, 18 février 1993.

J. LASKAR, F. JOUTEL et P. ROBUTEL, *Stabilization of the Earth's Obliquity by the Moon in Nature*, vol. 361, pp. 615-617, 18 février 1993.