

Le chat dans l'écosystème subantarctique

Les écosystèmes insulaires ont, plus que les écosystèmes continentaux, souffert des introductions d'espèces animales : depuis le début du XVII^e siècle, 93 pour cent des 176 espèces d'oiseaux éteintes vivaient sur des îles océaniques. De toutes les espèces de prédateurs introduites, le chat est souvent considéré comme l'espèce la plus nuisible pour les espèces natives. Pour évaluer précisément l'impact du chat sur la faune aviaire des îles, nous avons étudié le fonctionnement des populations de chats et leurs interactions avec l'ensemble des proies, natives (oiseaux) et introduites (lapins et rongeurs).

Le chat présent sur tous les continents, l'est aussi sur au moins 118 des 131 principaux groupes d'îles. Dans les milieux insulaires subantarctiques, le chat se nourrit exclusivement du produit de sa chasse. La disponibilité et la répartition spatiale des proies modifient la densité des chats, la structuration sociale, le système d'appariement, le succès de reproduction et la démographie. Ainsi, contrairement aux chats errants des villes qui vivent en grands groupes sociaux dans de petits domaines qui se chevauchent, les chats des îles subantarctiques vivent solitaires dans de vastes domaines séparés.

Plusieurs introductions ont eu lieu au XIX^e et au début du XX^e siècle, mais quatre chats seulement seraient à l'origine de la population actuelle de la grande île de l'archipel des Kerguelen. Deux chats furent débarqués en 1951 pour lutter contre les rongeurs et les lapins qui proliféraient. Ils disparurent rapidement de la station de Port-aux-Français et, sans savoir si l'espèce s'était éteinte, deux autres chats ont été introduits en 1956. Ces chats se sont parfaitement adaptés aux nouvelles conditions, et leurs descendants, d'abord cantonnés aux abords de Port-aux-Français, ont colonisé l'île en longeant les côtes. En 1974, le cinquième de l'île était envahi par les chats. L'effectif était estimé à 2 500 chats en 1974 et à 3 500 chats en 1977. La phase de croissance exponentielle est terminée. Aujourd'hui, nous estimons que la densité des chats sur les îles subantarctiques varie entre un et trois chats par kilomètre carré (cette densité atteint 1 000 chats par kilomètre carré dans certains jardins publics ou cimetières).

Le succès de la colonisation de Kerguelen tient à l'abondance des proies, à la possibilité d'utiliser des terriers qui protègent les chatons contre les variations des conditions climatiques et contre d'éventuels prédateurs aériens (les skuas), à l'absence d'autres prédateurs terrestres et à la quasi-absence de parasites du chat.

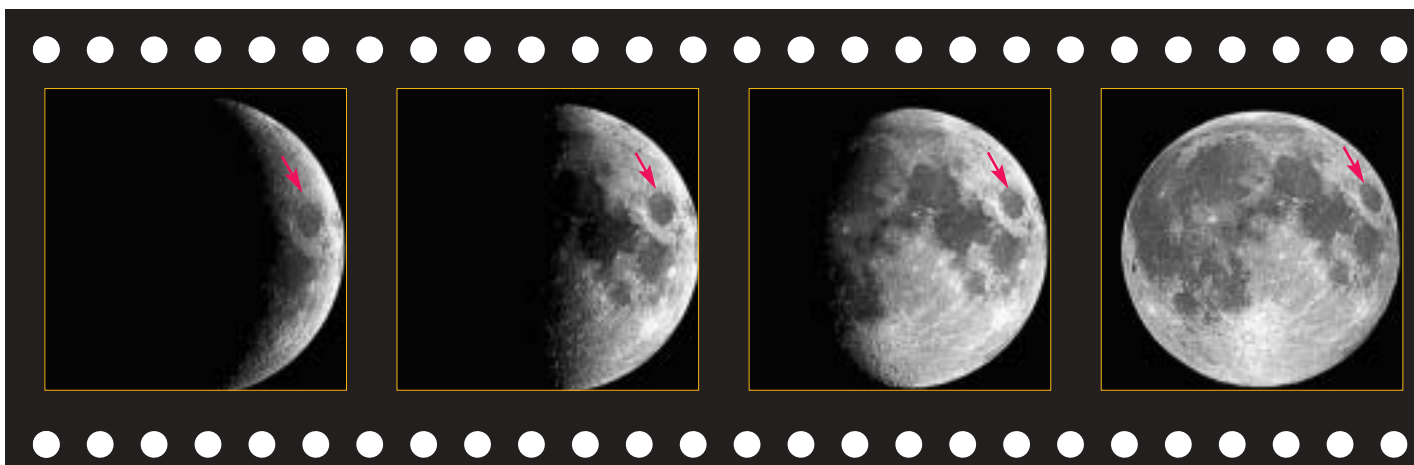
Le chat est un prédateur opportuniste et son régime alimentaire reflète la disponibilité des proies. Bien que le lapin constitue la principale ressource alimentaire du chat, on estime qu'en 1976, les quelque 3 500 chats présents sur l'île ont prélevé plus d'un million d'oiseaux. Huit espèces d'oiseaux surtout sont concernées par la prédation du chat : le pétrel bleu (*Halobaena caerulea*), le pétrel à tête blanche (*Pterodroma lessoni*), le pétrel noir (*Pterodroma macroptera*), le pétrel de Kerguelen (*Pterodroma brevirostris*), le pétrel à menton blanc (*Procellaria aequinoctialis*), le pétrel plongeur commun (*Pelecanoides urinator*), le pétrel de Wilson (*Oceanites oceanicus*) et le prion de la désolation (*Pachyptila desolata*). Toutes ces espèces ont évolué en l'absence de prédateurs mammaliens et n'ont développé aucun mécanisme de défense ou de fuite ; les espèces les plus menacées sont celles qui nichent dans des terriers comme le pétrel bleu et le prion de la désolation. Même si aucune extinction d'espèce d'oiseaux n'a été observée – les petites îles sont dépourvues de chats et servent de refuge aux oiseaux – la prédation du chat a certainement un impact notable sur les populations d'oiseaux, à Kerguelen. Les programmes de conservation sont de plus en plus ciblés sur le contrôle des effectifs de chats sur les îles.

Ni la chasse ni le piégeage ni l'utilisation d'appâts empoisonnés n'ont donné de résultats sur l'archipel des Kerguelen, parce qu'il est trop vaste et que le terrain est difficile d'accès. L'introduction d'un virus pathogène a été également envisagée. L'absence de pathogènes rend les chats des Kerguelen particulièrement vulnérables à l'introduction d'agents infectieux contre lesquels ils n'ont aucune défense immunitaire. Une telle introduction a été réalisée sur l'île Marion, où l'introduction du chat est en partie responsable de l'extinction locale du pétrel plongeur. Le virus choisi a été introduit en 1977 et a permis de réduire de 82 pour cent l'effectif de la population au bout de six ans. Nous avons confirmé à partir d'un modèle mathématique que le virus de la panleucopénie stabilise l'effectif de chats de l'île Marion autour de 300 au bout de dix ans. L'éradication du chat sur l'île Marion n'a été obtenue qu'en 1991, soit 15 ans après l'introduction du virus, en associant durant cinq ans, tir, empoisonnement et piégeage des chats survivants. Le succès reproducteur du pétrel noir, qui variait entre 0 à 20,5 pour cent durant la période où le chat était présent sur l'île, est remonté à 59,6 pour cent après son éradication. Cependant, l'introduction d'une infection virale ou bactérienne dans une population indemne peut être lourde de conséquences et une telle opération ne peut avoir lieu que si la spécificité de l'agent pathogène ne fait aucun doute. De plus, le succès obtenu à Marion ne garantit pas le même succès à Kerguelen.

Le chat a incontestablement des effets négatifs... mais il en a aussi de positifs. Sur les îles Kerguelen ou sur l'île Amsterdam, rongeurs et lapins abondent et ont des effets néfastes sur les populations d'oiseaux endémiques soit directement par la prédation (c'est le cas des rongeurs) ou indirectement par la destruction de l'habitat (les lapins). Les tentatives de réduction de la population de chats sur l'île Amsterdam y auraient favorisé l'augmentation du nombre de surmulots *Rattus norvegicus* et de souris *Mus musculus* : sur cette île, les chats se nourrissent essentiellement de souris et de surmulots. La modélisation des interactions des oiseaux insulaires et des mammifères introduits (rat et chat) a montré que l'explosion démographique de la population de prédateurs intermédiaires (les rats) consécutive à l'élimination brutale du chat aboutirait à une extinction rapide des proies communes aux deux prédateurs, les oiseaux. Une population limitée de chats maintient les populations de rongeurs et de lapins à des niveaux suffisamment bas pour que leur impact soit réduit.

La protection des espèces menacées passe par un contrôle des effectifs de chats. L'éradication des chats à Kerguelen, difficilement envisageable, n'est pas souhaitable si elle n'est pas accompagnée de l'élimination des lapins qui constituent la principale source de nourriture des chats, surtout l'hiver, lorsque la plupart des oiseaux sont en mer. De surcroît, en fonction de la démographie des proies, les effets de la prédation peuvent être plus ou moins dramatiques selon que les prédateurs tuent les jeunes (œufs, poussins, juvéniles) ou les adultes, ou encore selon que le prélèvement est occasionnel ou systématique. On a montré que les effectifs des populations d'oiseaux à courte durée de vie sont très sensibles à la prédation des jeunes, tandis que, pour les espèces d'oiseaux qui vivent longtemps, les effectifs des populations diminuent quand les prédateurs s'attaquent aux adultes. Aujourd'hui, nous suivons la population de chats des îles Kerguelen afin de préciser ses comportements de prédation et afin de déterminer les espèces les plus exposées, qui devront être protégées en priorité.

Dominique PONTIER, Emmanuelle FROMONT, Ludovic SAY
UMR-CNRS 5558, Université Claude Bernard-Lyon 1



Les danses spatiales de la Lune

ÉRIC BOIS

La Lune est soumise à des balancements réguliers autour d'une configuration d'équilibre stable. On connaît aujourd'hui avec précision les origines de ces balancements, nommés «librations».

Fidèle depuis quelques milliards d'années, la Lune tourne autour de la Terre. Son mouvement ne se limite pas à cette simple révolution : elle tourne aussi sur elle-même et nous montre ainsi toujours la même face. Outre l'attraction de la Terre, elle subit d'importantes perturbations de la part du Soleil et des autres planètes du Système solaire, ce qui engendre de nombreuses complications. Le mouvement de la Lune est si complexe que Newton lui-même disait qu'il lui donnait mal à la tête ! Toutefois, aujourd'hui, les mouvements les plus fins de la rotation de la Lune sont connus avec une si grande précision, que la Lune pourrait servir de «détecteur» des moindres interactions entre la Terre et la Lune, et même au sein du Système solaire.

Les premières mesures de la distance entre la Terre et la Lune apparaissent au III^e siècle avant notre ère.

L'astronome grec Aristarque de Samos estime la distance entre la Terre et la Lune à 121 000 kilomètres (au lieu de 384 400 kilomètres en moyenne). Environ 200 ans plus tard, l'astronome et mathématicien grec Hipparque réduit l'erreur à dix pour cent, puis Ptolémée la réduit à un pour cent, au II^e siècle de notre ère. Au XVIII^e siècle, les astronomes français Joseph Jérôme Lefrançois de Lalande et Nicolas Louis de La Caille obtiennent une distance moyenne à 0,2 pour cent près, en observant la Lune simultanément sur un même méridien terrestre (Lalande se tenait à Berlin et La Caille au Cap).

Dans les années 1950, l'exactitude fait un bond grâce aux premiers échos radar sur la Lune : l'erreur est de l'ordre du kilomètre. En 1969, Neil Armstrong marche sur la Lune et, lors de ce vol *Apollo XI*, le premier panneau réflecteur est déposé : l'ère de la télémétrie laser commence pour

la Lune. Trois stations terrestres mesurent la distance de la Terre à la Lune par cette technique : au Texas, à Grasse, en France, et à Hawaï. Le principe est simple : un laser de forte puissance émet une séquence d'impulsions en direction d'un réflecteur déposé à la surface de la Lune. Le faisceau laser est émis par un télescope qui, en retour, recueille la lumière réfléchie par le réflecteur lunaire. Une horloge atomique mesure le temps mis par les photons pour effectuer l'aller-retour (environ 2,5 secondes). Connaissant la vitesse de la lumière, on déduit la distance entre la Terre et la Lune au moment du tir laser. Ainsi, dans les années 1990, l'incertitude sur la mesure passe à quelques centimètres.

Aujourd'hui, à peine deux centimètres d'incertitude limitent l'exactitude sur la mesure obtenue par la station française, seule sur la Terre à



1. LEVER DE LUNE SUR LA TERRE. Notre satellite a un mouvement très complexe : outre sa révolution et sa rotation, il effectue de légers balancements nommés «librations». Certaines de ces librations sont visibles de la Terre : en suivant l'évolution d'un cratère (par exemple, celui marqué d'une flèche rouge) (*en haut, à gauche*), on voit qu'il se décale et qu'il se rapproche du bord supérieur de la Lune. Les librations sont si importantes qu'elles découvrent des régions normalement hors de notre vue : nous voyons 59 pour cent de la surface totale de la Lune, au lieu de 50 pour cent si les librations n'existaient pas.

NASA

poursuivre les records de précision. Cette incertitude est surtout due aux perturbations atmosphériques subies par le faisceau laser. Des réflecteurs ont été déposés sur le sol lunaire à des endroits différents en longitude et en latitude, de sorte que l'on mesure également la rotation de la Lune sur elle-même avec une précision angulaire voisine d'une milliseconde. La télémétrie laser-Lune a stimulé des progrès importants dans les théories sur les mouvements de la Lune.

La Lune, en tournant sur elle-même, effectue de nombreux balancements, des «librations» provoquées par des mécanismes physiques, gravitationnels ou non, internes ou externes à la Lune. La plupart des librations sont imperceptibles, mais d'autres sont visibles à l'œil nu. Quand on suit la position d'un cratère visible de la Lune, il se trouve plus ou moins près du bord de la Lune, signe que celle-ci «libre» (voir la figure 1). D'où viennent les librations? Elles ont des origines variées, et il aura fallu trois siècles pour qu'elles soient identifiées, comprises et classées.

Pour comprendre les librations de la Lune, décrivons son mouvement. Comme pour toute planète, le mouvement global de la Lune se décompose en deux modes : un mouvement de translation curviligne ou «mouvement orbital» (la révolution autour de la Terre), et un mouvement de rotation autour de son centre de masse, mouvement dit «spin».

Au XVII^e siècle, grâce à Isaac Newton, intégrant les travaux de Johannes Kepler et ceux d'Edmond Halley, la description des orbites célestes passe d'un statut géométrique et ciné-

matique à un statut dynamique. Ainsi, la deuxième loi de Newton relie le mouvement d'un corps céleste aux forces qui le produisent et le perturbent au cours du temps. D'après les lois de Kepler, une planète décrit une trajectoire elliptique. S'il n'y avait pas de perturbations liées aux autres planètes du Système solaire, l'orbite de la planète serait une ellipse parfaite, fixe et invariable. À cause des autres planètes, l'astre dévie de son orbite keplerienne et décrit des trajectoires variables, mais qui restent confinées dans une couronne (voir la figure 2).

La Lune : une exception !

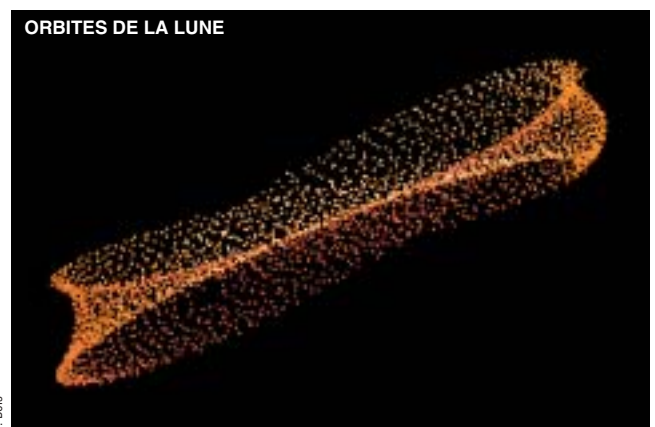
L'orbite keplerienne décrit correctement l'orbite moyenne d'une planète du Système solaire. Ceci n'est plus vrai dans le cas de la Lune. La présence du Soleil rompt en effet la simplicité keplerienne prévue pour le problème des deux corps : le mouvement orbital de la Lune relève du problème des trois corps. Ses trajectoires consécutives prennent une forme de couronne torsadée très complexe, surtout quand on prend en compte toutes les perturbations pour calculer son mouvement avec une grande précision (voir la figure 2). On considère que le plan de l'orbite de la Lune est incliné de cinq degrés en moyenne par rapport à l'écliptique (l'écliptique est le plan qui contient le Soleil et le plan orbital moyen de la Terre).

L'orbite de la Lune est complexe, mais sa rotation sur elle-même ne l'est pas moins. Elle tourne sur elle-même dans la même période de temps qu'elle effectue une révolution autour

de la Terre, soit 27 jours, 7 heures, 43 minutes et 11,5 secondes. En bref, elle tourne sur elle-même et autour de la Terre en même temps, c'est pourquoi elle présente toujours la même face à la Terre. Son axe de rotation polaire fait un angle moyen de un degré et 35 minutes avec le pôle de l'écliptique, c'est-à-dire l'axe perpendiculaire au plan de l'écliptique (voir la figure 3). La Lune est également soumise à un mouvement de précession, telle une toupie : son axe de rotation décrit un cône autour du pôle de l'écliptique, dans le sens inverse de celui de sa rotation (voir la figure 4).

Le mouvement de la Lune présente une particularité : il réalise un double synchronisme. Premièrement, la Lune décrit une révolution autour de la Terre dans le même temps qu'une rotation sur elle-même. Ce mouvement synchrone de la rotation et du mouvement orbital moyen, ou encore «résonance spin-orbite», a une période de 27,3 jours. Le deuxième synchronisme se produit entre la précession de l'axe de rotation lunaire et une seconde précession, celle du plan de l'orbite lunaire par rapport au plan de l'écliptique (voir la figure 4). Ces deux précessions ont une période de 18,6 ans. Ce double synchronisme engendre deux fréquences supplémentaires, dites «fréquences de résonance», de 2,9 ans et de 80,1 ans. Toutes les perturbations de la rotation de la Lune reviennent selon quatre fréquences : 27, 3 jours, 18,6 ans, et les deux fréquences de résonance de 2,9 ans et 80,1 ans.

La rotation complète de la Lune (sa rotation moyenne et ses librations)



2. LES ORBITES DE LA TERRE ET DE LA LUNE ont des formes géométriques très différentes. Les orbites consécutives de la Terre (ici, une centaine sont représentées) sont contenues dans une couronne elliptique, tandis que celles de la Lune forment une couronne torsadée

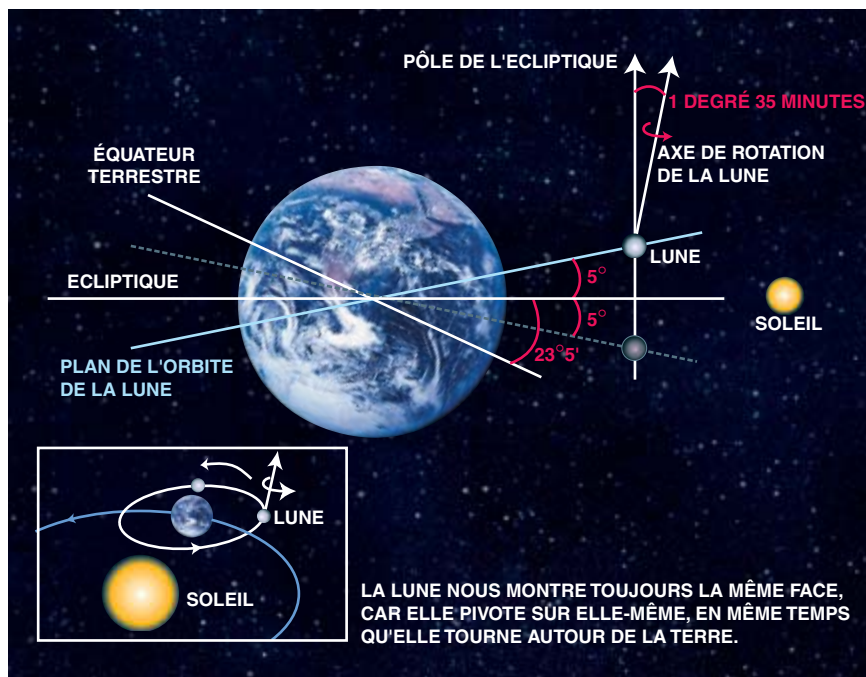
complexe (vue ici par la tranche). Les orbites de la Lune ne relèvent pas du problème des deux corps (la Terre et la Lune), mais des trois corps, en raison de la proximité du Soleil, dont la masse est plus de 330 000 fois plus élevée que celle de la Terre.

est décrite par les équations traditionnelles de la rotation des corps solides sur eux-mêmes (équations d'Euler). Elle peut être représentée par les angles d'Euler dans l'espace réel à trois dimensions (espace dit de configuration) (voir l'encadré de la page 58). Dans l'espace des phases (l'espace où le corps étudié est repéré par ses positions, mais aussi par ses vitesses), les libérations dites «géométriques» traduisent des solutions quasi périodiques aux équations de rotation, présentes sous forme d'îles de libérations autour de points fixes qui, eux, correspondent à des solutions périodiques. Les libérations lunaires sont des mouvements quasi périodiques (autour des quatre fréquences précédemment citées).

Les libérations sont très nombreuses et fortement imbriquées. Leur classification est fondée sur la distinction entre l'énergie potentielle et l'énergie cinétique de la Lune. Les deux familles sont les libérations potentielles, dont les causes sont gravitationnelles (elles correspondent à une variation d'énergie potentielle de la Lune), et les libérations cinétiques, dont les causes ne sont pas gravitationnelles, mais directement liées au mouvement qui les produit (elles correspondent à une variation d'énergie cinétique de la Lune). Pour les sous-familles de libérations, on relie le nom de la libération à sa cause, selon sa nature. Cette méthode de désignation, simple et évolutive, permet de rester proche de l'interprétation physique directe.

Dans les libérations potentielles, on trouve les libérations dites de «figure principale», dues aux perturbations engendrées par des masses ponctuelles (les astres sont considérés comme des points) sur la «figure» de la Lune (la figure dynamique représente la répartition spatiale de la masse dans le corps) ; les libérations dites d'«interaction figure-figure», qui prennent en compte les figures des astres dont les potentiels interagissent avec celui de la Lune. Les libérations cinétiques contiennent les libérations centrifuges, produites par des déformations internes à la Lune, provoquées, par exemple, par la présence d'un noyau liquide (voir la figure 5).

Une sous-classe commune aux libérations potentielles et aux libérations cinétiques contient les libérations



3. LA LUNE TOURNE autour de la Terre en 27,3 jours. Le plan de son orbite forme un angle de cinq degrés par rapport au plan de l'écliptique (le plan contenant le Soleil et l'orbite moyenne de la Terre). Elle tourne aussi sur elle-même en 27,3 jours ; son axe de rotation est incliné de un degré et 35 minutes par rapport à la perpendiculaire au plan de l'écliptique, nommée pôle de l'écliptique. La révolution et la rotation s'effectuent dans le même sens et sont synchronisées : la Lune nous montre toujours la même face.

dites accidentelles. Il s'agit de libérations résiduelles sans cause permanente dans le temps. Elles peuvent être déclenchées par un impact important de météore, qui introduit de l'énergie cinétique supplémentaire (libérations cinétiques), ou par le passage proche et rapide d'un autre corps céleste (libérations potentielles).

Modèle relativiste

Pour étudier les libérations réelles dans le détail et approfondir leurs origines, il a fallu mettre au point un modèle global de la Lune, issu de l'intégration du Système solaire dans son ensemble, afin d'y «prélever» ensuite un mouvement précis de la Lune. Les progrès des mesures astronomiques sont à l'origine de modèles théoriques toujours plus précis et plus complets. Les limites du «négligeable» ne cessent de reculer, et les approximations d'hier n'ont plus cours. Toutefois, les observations à la microseconde près ne suffisent pas à donner la cause du phénomène.

Désormais, l'objectif n'est plus seulement de construire des éphémérides : prédire n'est pas toujours expliquer. On construit parfois des solutions sous forme de séries formelles dont on ajuste progressivement les paramètres aux

observations. Les pseudo-solutions ainsi obtenues ne peuvent expliquer les phénomènes, même si elles donnent des prédictions sur les positions. Au contraire, un modèle physique, construit à partir des lois de la physique, allie prévision et compréhension des phénomènes.

Le Système solaire est constitué de sous-systèmes dont les interactions empêchent qu'on les considère comme tout à fait indépendants et isolés. Le système Terre-Lune est l'un de ces sous-systèmes immergés dans le Système solaire. Pour construire une théorie moderne de la Lune qui rende compte de la dynamique du système Terre-Lune en ayant une précision compatible avec celle des observations de télémétrie, on ne pouvait plus se limiter à la seule intégration des équations du mouvement de la Lune, modifiées par les perturbations provoquées par les autres astres du Système solaire ; ni se contenter d'une description newtonienne de la gravitation ; ni, l'on s'en doute, considérer les corps comme ponctuels.

Nous avons intégré le Système solaire dans son ensemble (le Soleil, les planètes, une série d'astéroïdes et la Lune), c'est-à-dire que nous avons intégré les équations de tous ces corps (au lieu de les traiter seulement

comme des perturbations), afin d'y prélever ensuite le mouvement spin-orbite de la Lune, avec une cohérence relativiste «postnewtonienne» jamais réalisée jusqu'à présent. Expliquons en quoi consiste une formulation postnewtonienne.

La théorie de la relativité générale représente la réalité physique par un champ continu. En l'occurrence, il s'agit d'un champ de gravitation où les masses «particulières», les étoiles et les planètes par exemple, sont considérées

comme des singularités de ce champ, et non plus comme des systèmes discrets de points matériels isolés les uns des autres. Ce concept rend impossible l'idée d'une mécanique céleste purement relativiste. Cependant, les formulations dites postnewtoniennes permettent, en dérivant des solutions approchées aux équations d'Einstein, d'intégrer dans un cadre relativiste le problème des «N corps» sur la base de la description de la gravitation donnée par la théorie d'Einstein.

Notre modèle, mis au point avec Alain Journet et David Vokrouhlicky, est le seul qui combine, dans ce cadre post-newtonien, la rotation des corps sur eux-mêmes et leurs mouvements dans le champ de gravitation local. Il tient compte de la distribution de la masse dans les corps (c'est-à-dire de leur figure dynamique) et de leurs déformations dues aux marées. Grâce à ce modèle, en 1995, nous avons identifié une troisième famille de libration : les librations relativistes.

Et pourtant, elle libre !

Jusqu'à ces dernières années, une distinction était établie entre les librations vues de la Terre (librations dites «apparentes») et celles censées traduire des balancements «plus réels» de la Lune (librations dites «physiques»). En réalité, cette distinction provient de l'utilisation de deux repères de référence différents. Dans la classification actuelle, l'ensemble des librations est considéré dans un repère de référence unique.

Les librations apparentes contiennent deux familles, les librations «diurnes» et les librations «optiques». Les librations optiques se divisent aussi en deux familles : les librations optiques en longitude et les librations optiques en latitude. Elles ont été observées au XVII^e siècle par l'astronome allemand Johannes Hevelius et par Galilée. Toutes ces librations apparentes se combinent et voilà pourquoi, au total, la face visible de la Lune représente 59 pour cent de sa surface totale, et non 50 pour cent.

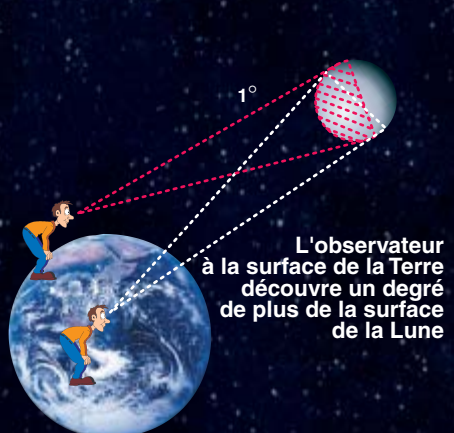
Les librations apparentes, observées depuis la Terre, proviennent de la configuration géométrique de la Lune par rapport à la Terre. Toutefois, la Lune est soumise à des balancements qui lui sont propres. Newton eut le premier l'idée d'un mouvement de balancement réel de la Lune qui se superposerait à sa rotation. Ces librations étaient nommées librations physiques. Cette distinction entre les librations apparentes et les librations physiques est conventionnelle et liée à l'histoire de leur découverte... sur Terre. La Lune libre, c'est un phénomène réel, et ses librations sont visibles depuis la Terre.

a) Les librations diurnes proviennent d'un phénomène de parallaxe. L'observateur terrestre ne se trouve pas au centre, mais à la surface de la Terre et il tourne avec la Terre. Il ne voit pas la même surface de la Lune qu'un observateur qui serait situé au centre. Tout se passe comme si la Lune avait bougé : l'amplitude de ces librations diurnes atteint un degré.

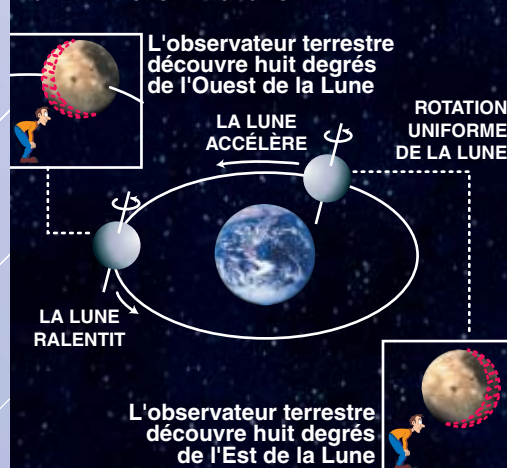
b) Dans les librations en longitude, la face visible de la Lune semble se déplacer de huit degrés tantôt vers l'Est, tantôt vers l'Ouest. La raison est simple : la vitesse de révolution de la Lune varie entre le périégée (vitesse maximale) et l'apogée (vitesse minimale), alors que sa vitesse de rotation est relativement uniforme. La rotation est en avance ou en retard sur la révolution. Quand la Lune s'éloigne de la Terre, sa vitesse radiale est inférieure à la vitesse moyenne de sorte qu'elle semble tourner sur elle-même trop vite, dévoilant des régions normalement cachées. De même, quand elle se rapproche de la Terre, sa vitesse radiale devient supérieure, et elle semble ne pas tourner assez vite sur elle-même. À nouveau, une partie de la région normalement cachée est dévoilée.

c) Dans les librations optiques en latitude, la Lune semble osciller du Nord au Sud, et l'on aperçoit des régions polaires normalement dissimulées. L'équateur de la Lune est incliné d'environ 6,5 degrés par rapport à son plan orbital, de sorte qu'au cours de sa précession, elle présente un peu plus son hémisphère Nord ou Sud.

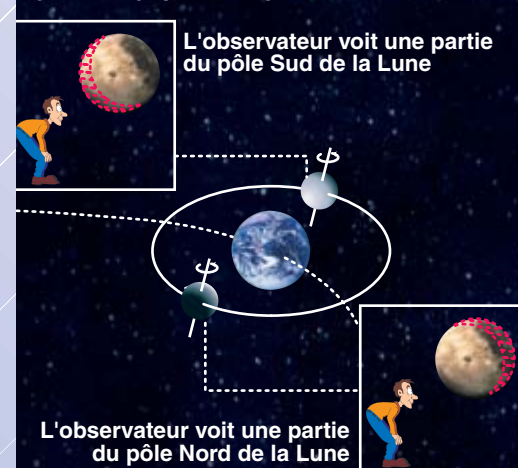
a. LIBRATIONS DIURNES

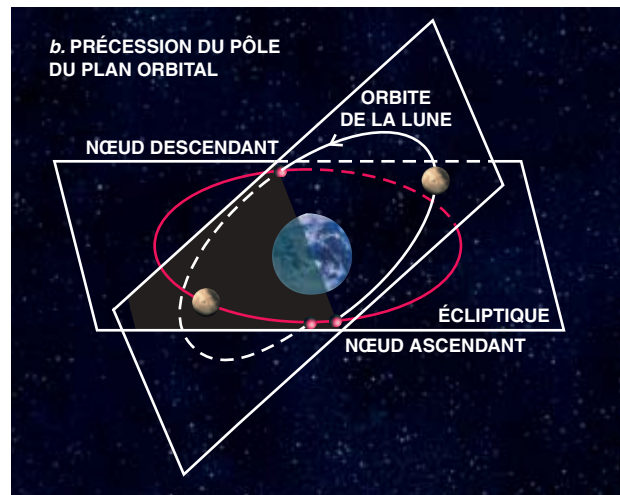
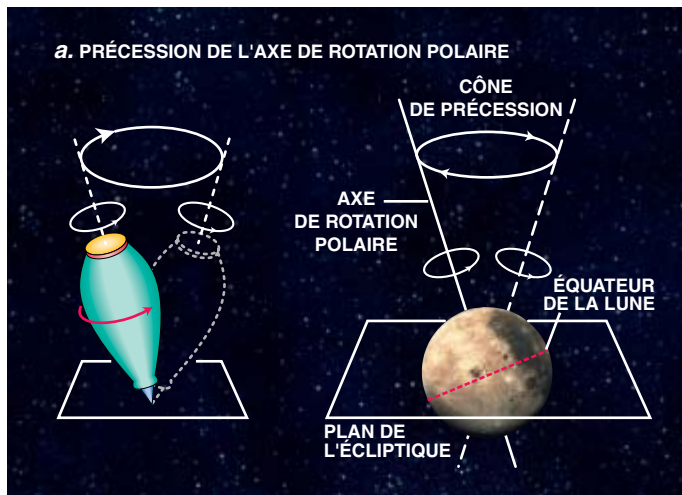


b. LIBRATIONS EN LONGITUDE



c. LIBRATIONS EN LATITUDE





4. LE MOUVEMENT DE PRÉCESSION ressemble à celui d'une toupie. La Lune a deux mouvements de précession. Le premier concerne son axe de rotation polaire : il tourne autour d'une position moyenne et décrit un cône en 18,6 ans (a). Le second concerne le pôle de son plan orbital (l'axe perpendiculaire à son plan orbital), qui décrit lui aussi un cône (b). L'orbite de la Lune croise le plan de

l'écliptique en deux points, nommés nœud ascendant et nœud descendant. À cause de cette seconde précession, à chaque fois que la Lune croise le plan de l'écliptique, les nœuds sont un peu décalés des nœuds précédents. Les nœuds retrouvent leur position initiale au bout de 18,6 ans. Les deux précessions sont synchronisées selon la période de 18,6 ans.

Dans le modèle, on retrouve un ensemble de termes identiques aux termes newtoniens et un autre ensemble de termes proportionnels au facteur $1/c^2$, où c est la vitesse de la lumière. Nous nommons cette seconde catégorie de termes, les contributions «strictement» relativistes. Les libérations relativistes correspondent à ces contributions dans le mouvement de rotation de la Lune. L'amplitude de ces libérations atteint une milliseconde de degré avec des périodes de 18,6 ans et 80,1 ans. Les libérations relativistes constituent une troisième famille de libérations à part entière. Elles atteignent le seuil de la précision actuelle des observations.

Dans le cas de la rotation de la Terre, les contributions «strictement» relativistes sont près de deux ordres de grandeur inférieures à la précision des observations sur la rotation de la Terre. La Lune se présente donc comme une meilleure candidate que la Terre pour la vérification de ce type de termes relativistes prévus par les développements théoriques des équations d'Einstein. Par ailleurs, elle pourrait aussi servir de détecteur ou de «témoin» de phénomènes autres, telles les interactions du Système solaire, comme nous venons de le montrer sur un cas : la figure dynamique du Soleil.

Le Soleil est très légèrement aplati à ses pôles, mais la valeur de cet aplatissement, qui se situe entre 10^{-8} et 10^{-5} , n'est pas connue avec précision. Or, l'aplatissement solaire a un effet

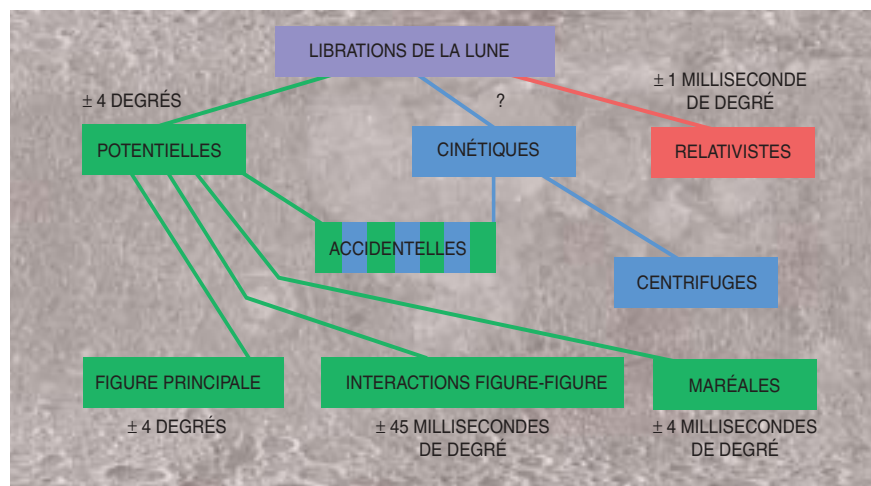
gravitationnel sur les libérations lunaires. Nous avons calculé les libérations produites par cet effet et déterminé celles qui sont compatibles avec les libérations connues. Nous avons ainsi réduit en retour la fourchette des valeurs possibles en estimant la borne supérieure à 3×10^{-6} .

Le noyau de la Lune est-il liquide?

Nous utilisons aussi notre modèle pour étudier les libérations créées par le cœur de notre satellite. Le noyau de la Lune reste très mystérieux : on ne connaît ni sa taille ni sa nature. Des sismographes ont été posés sur le sol lunaire et mesurent toutes les secousses. Plusieurs milliers de séismes profonds se produisent

chaque année. Cependant, le signal est très faible et se propage lentement. Les tremblements du sol lunaire semblent contrôlés par les déformations de la croûte, liées aux marées. Malgré ces mesures, on ignore si le noyau de la Lune est solide, liquide ou visqueux. Le noyau serait probablement petit. S'il est métallique, son rayon est inférieur ou égal à 600 kilomètres. S'il est liquide, son rayon est inférieur ou égal à 400 kilomètres.

Quoi qu'il en soit, le rapport de la masse du noyau à la masse totale de la Lune est faible, moins de 15 pour cent (pour un rayon de 400 kilomètres), alors qu'il atteint 50 pour cent pour Mercure et 33 pour cent pour la Terre. La description du noyau de la Lune est importante, car les astronomes remontent aux mécanismes de formation des



5. TABLEAU RÉCAPITULATIF des familles et sous-familles de libérations, et de leurs amplitudes maximales.

planètes notamment grâce à la connaissance des noyaux planétaires.

Comment utiliser les descriptions hyperfines de la rotation de la Lune pour résoudre l'énigme du noyau ? De la même façon qu'on peut identifier un œuf cru d'un œuf dur sans les casser, seulement en les faisant tourner sur eux-mêmes : les deux œufs ne pré-

sentent pas un mouvement de rotation identique ! L'œuf dur a une rotation régulière qui diminue progressivement, tandis que la rotation de l'œuf cru présente des oscillations, à cause du jaune qui bouge à l'intérieur.

Nous avons construit une représentation simple de noyau lunaire dans notre modèle global des librations de

la Lune. Nous lui avons attribué différentes compositions et tailles. Pour chacun des noyaux, nous avons calculé les librations lunaires et sélectionné celles qui sont compatibles avec les observations. Certaines des librations calculées ont une fréquence de 2,9 ans, c'est-à-dire une des fréquences de résonance du système. Seul un noyau très

Les librations de la Lune décrites par trois angles

La description de la rotation complète de la Lune s'obtient par la résolution des équations générales de la rotation d'un corps solide. La solution de ces équations, paramétrée par des angles dits d'Euler (à gauche, ci-dessous), donne l'évolution temporelle de la rotation de la Lune (sa rotation moyenne et ses librations) (à droite, ci-dessous).

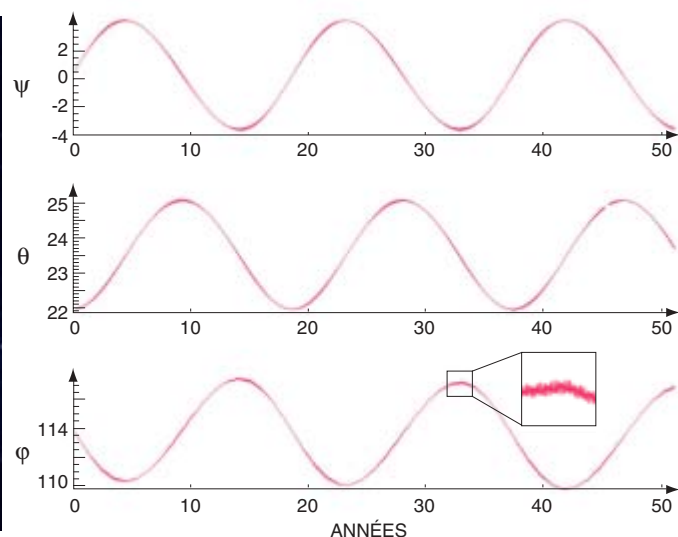
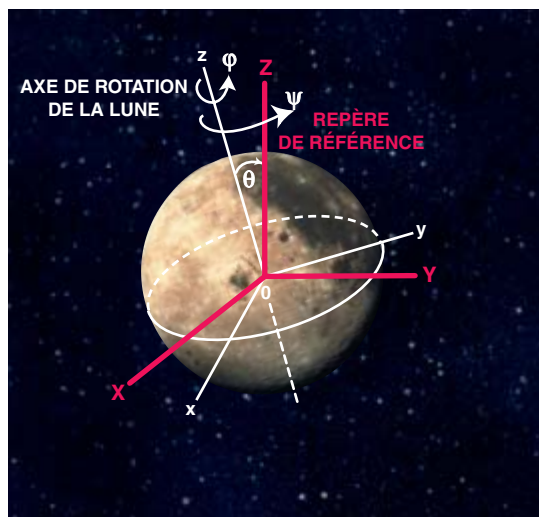
L'évolution de ces angles exprime la rotation d'un repère $Oxyz$, lié à la Lune, par rapport à un repère de référence $OXYZ$ non-tournant, centré sur le centre de masse de la Lune. Le plan de référence OXY est ici un équateur terrestre fixe, défini comme plan de référence à une date donnée (le plan «J2000»).

La rotation de la Lune autour de son axe polaire Oz est représentée par l'angle φ (cette rotation élémentaire est nommée «rotation propre»). L'angle θ représente les variations de l'inclinaison de l'axe polaire lunaire par rapport à l'axe de référence OZ (θ est l'angle dit de «nutation»). Enfin, l'angle ψ représente la «précession» de l'axe polaire lunaire Oz autour de l'axe de référence OZ . La Lune tourne sur elle-même en 27,3 jours, mais l'angle φ a été tracé sans cette rotation uniforme et rapide, afin que l'on distingue les oscillations périodiques.

Les trois angles oscillent avec une période majeure de 18,6 ans, conduite par la précession des nœuds de la Lune. Ces larges oscillations, de plusieurs degrés d'amplitude, rendent compte des librations apparentes optiques (celles «vues de la Terre», c'est-à-dire liées à la configuration relative de la Lune par rapport à la Terre). L'angle θ varie régulièrement entre 22 et 25 degrés

(l'équateur terrestre J2000 est incliné de 23,5 degrés par rapport au plan de l'écliptique et l'axe polaire lunaire oscille autour d'un angle de 1,5 degré par rapport au pôle du plan de l'écliptique). Cet angle θ représente les librations apparentes optiques en latitude (à l'exception de celles de période égale à 27,3 jours, non représentées ici). La modulation en ψ de 18,6 ans rend compte des librations apparentes optiques en longitude (toujours sans celles de période égale au mois lunaire). Dans la présente «expérience numérique», tout ce passe comme si l'observateur était situé au centre de la Terre. Les librations dites diurnes ne sont donc pas représentées.

De plus petites oscillations se superposent aux trois grandes modulations de période 18,6 ans : elles sont visibles dans l'épaisseur du trait. Il s'agit de toutes les autres librations, dont les amplitudes sont plus faibles. Leurs amplitudes sont au maximum de l'ordre de 500 secondes de degré en ψ et φ , et 250 secondes de degré en θ . Une modulation intermédiaire apparaît en φ , due à l'action gravitationnelle directe du Soleil sur la rotation de la Lune : sa période est de un an. Les librations furent nommées «physiques», et elles traduisent les déviations au mouvement moyen décrit par les lois empiriques de Cassini. Les deux types de librations («apparentes» et «physiques») ne sont ni plus ni moins physiques, et tout aussi réelles, l'une que l'autre. Dans les équations de la rotation de la Lune, les librations apparentes et la plus grande des librations «physiques» correspondent au même terme perturbatif, c'est-à-dire à l'action gravitationnelle directe de la Terre sur la rotation de la Lune.



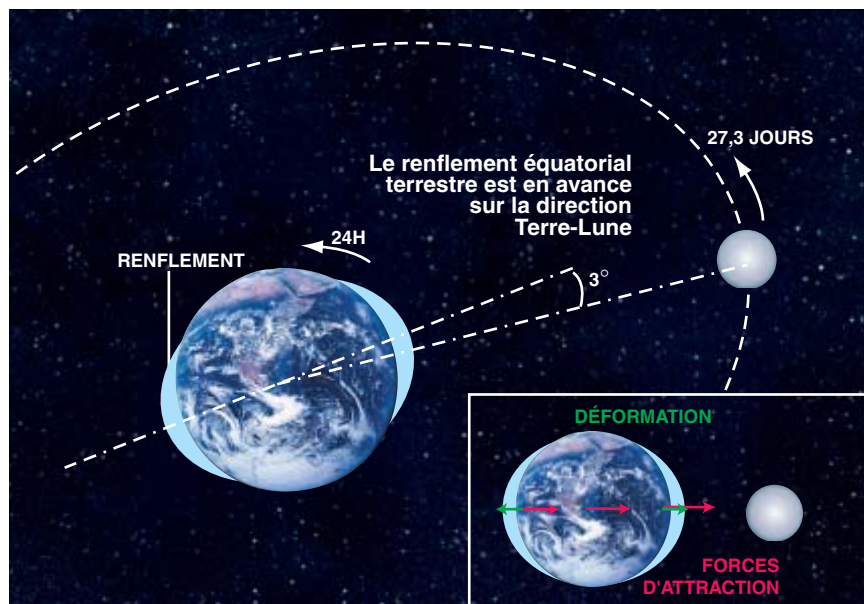
petit (environ 200 kilomètres de rayon), s'il est liquide ou très visqueux, est compatible avec l'ensemble des libractions connues aujourd'hui. Si sa taille est supérieure, alors le noyau est plus dense. Pour lever cette ambiguïté, nous modélisons aujourd'hui d'autres types de noyaux lunaires en tirant profit des modélisations du noyau terrestre.

Grâce à notre modèle, nous avons étudié les marées lunaires et montré qu'elles conduisent à des libractions spécifiques. Sur la Terre, les marées sont dues à l'attraction de la Lune, qui déforme le globe terrestre dans son ensemble. Réciproquement, la Terre attire la Lune, et cette attraction provoque des marées lunaires, sous forme de déformations solides de la Lune, qui engendrent des libractions dites libractions maréales. Nous avons calculé leur amplitude : elle vaut quatre millisecondes de degré. Elles suffisent à provoquer un bulbe équatorial lunaire dans la direction moyenne de la Terre.

À cause de l'inclinaison de l'équateur de la Lune sur son orbite, ce bulbe oscille légèrement en latitude autour de l'équateur lunaire. En outre, une partie de l'énergie maréale se dissipe dans la structure interne de la Lune où des déformations inélastiques engendrent des libractions de même allure que les libractions maréales, mais d'amplitude beaucoup plus faible (au moins un ordre de grandeur). La Lune est en fait plus élastique qu'inélastique. Nous avons déduit de l'ensemble de ces libractions une amplitude de marée radiale du globe lunaire de quelques centimètres en direction de la Terre.

La Lune s'éloigne de la Terre !

Les phénomènes des marées ont des conséquences étonnantes. La Terre provoque un renflement de la Lune et, inversement, la Lune engendre aussi un renflement du globe terrestre au niveau de l'équateur dans la direction de la Lune et ce renflement est symétrique. En effet, la force exercée par la Lune est plus forte sur le côté qui fait face à la Lune (le plus proche) que sur la face opposée (la plus éloignée de la Lune). L'attraction subie par le centre de la Terre se situe entre ces deux extrêmes. En tout point du globe terrestre dans la direction de la Lune, la différence entre la force d'attraction lunaire qui s'exerce en ce



6. LA LUNE S'ÉLOIGNE DE LA TERRE. Elle crée un renflement du globe terrestre dans son ensemble au niveau de l'équateur en direction de la Lune. Or, la Terre tourne sur elle-même plus rapidement que la Lune ne tourne autour de la Terre. De ce fait et à cause de la viscosité terrestre, ce bourrelet de marées se réalise toujours un peu en avance sur la direction Terre-Lune (avec un angle de trois degrés). Cette avance accélère la Lune sur son orbite, et élargit donc son orbite : la Lune s'éloigne de la Terre à raison de un à trois mètres par siècle.

point et celle exercée au centre conduit à la déformation globale de la Terre : elle « se dilate » dans la direction de la Lune, c'est-à-dire qu'un bulbe apparaît de part et d'autre de la Terre (voir la figure 6).

Par ailleurs, le milieu terrestre est visqueux, ce qui introduit une inertie entre l'action et l'effet. La Terre tourne plus vite sur elle-même que la Lune autour de la Terre : par exemple, en six heures, la Terre fait un quart de tour sur elle-même, alors que la Lune ne se déplace sur son orbite que d'un angle faible vu de la Terre (voir la figure 6). Par conséquent, le bourrelet formé à l'équateur de la Terre se produit toujours un peu en avance sur la direction Terre-Lune.

Cette avance permanente se stabilise à 12 minutes de temps, soit un angle de trois degrés. Le bourrelet a

tendance à attirer en avance la Lune sur son orbite avec une accélération d'environ de 25 secondes par siècle. Son orbite s'élargit donc et la Lune s'éloigne de la Terre à raison de un à trois mètres par siècle carré.

Par conservation du moment angulaire général de la Lune, ce mécanisme d'éloignement s'accompagne d'un ralentissement de la Lune sur elle-même, et le synchronisme est conservé. Conséquence de l'éloignement de la Lune : la rotation de la Terre sur elle-même ralentit. Il en résulte un rallongement de la durée du jour. Nous n'assisterons pas aux conséquences ultimes de ces changements qui se déroulent au-dessus de nos têtes. Ces évolutions sont infimes et imperceptibles à l'échelle humaine. Et même si la Lune s'éloigne peu à peu, elle continue de nous montrer la même face.

Éric BOIS est responsable de l'équipe Dynamique non-linéaire à l'Observatoire astrophysique de Bordeaux.

É. BOIS et D. VOKROUHLICKY, *Relativistic Spin Effects in the Earth-Moon System*, in *Astron. and Astrophys.*, vol. 300, pp. 559-567, 1995.

É. BOIS, F. BOUDIN et A. JOURNET, *Secular Variation of the Moon's Rotation Rate*, in *Astron. and Astrophys.*, vol. 314, pp. 989-994, 1996.

X. NEWHALL et J. WILLIAMS, *Estima-*

tion of the Lunar Physical Librations, in *Celest. Mech.*, vol. 66, pp. 21-30, 1997.

É. BOIS et J.-F. Girard, *Impact of the quadrupole moment of the Sun on the Dynamics of the Earth-Moon System*, in *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, vol. 73, pp. 329-338, 1999.

É. BOIS, *Connaissance de la libration lunaire à l'ère de la télémétrie laser-Lune*, Comptes rendus de l'Académie des sciences (Paris), tome 1, série IV, pp. 809-823, Paris 2000.

