

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 cinéma-

tique 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 !

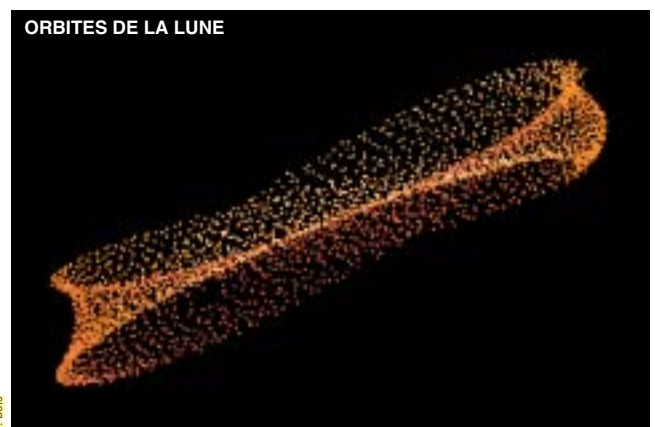
L'orbite keplerienne décrit correctement l'orbite moyenne d'une planète du Système solaire. Ceci n'est plus vrai dans le cas de la Lune. La présence du Soleil rompt en effet la simplicité keplerienne prévue pour le problème des deux corps : le mouvement orbital de la Lune relève du problème des trois 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

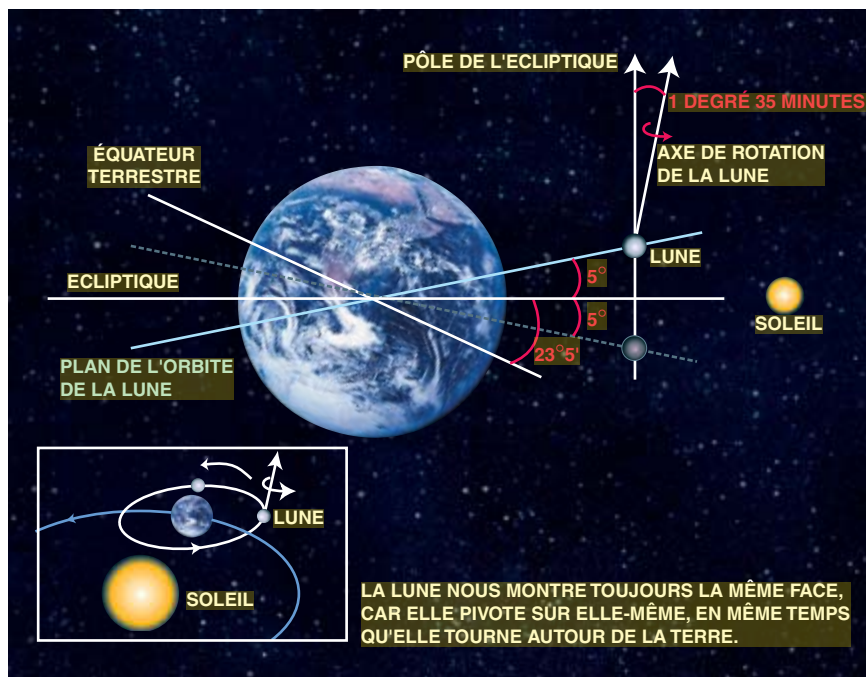
complexe (vue ici par la tranche). Les orbites de la Lune ne relèvent pas du problème des deux corps (la Terre et la Lune), mais des trois corps, en raison de la proximité du Soleil, dont la masse est plus de 330 000 fois plus élevée que celle de la Terre.

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