

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 libérations : les libérations relativistes.

Et pourtant, elle libre !

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

Les libérations apparentes contiennent deux familles, les libérations «diurnes» et les libérations «optiques». Les libérations optiques se divisent aussi en deux familles : les libérations optiques en longitude et les libérations optiques en latitude. Elles ont été observées au XVII^e siècle par l'astronome allemand Johannes Hevelius et par Galilée. Toutes ces libérations 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.

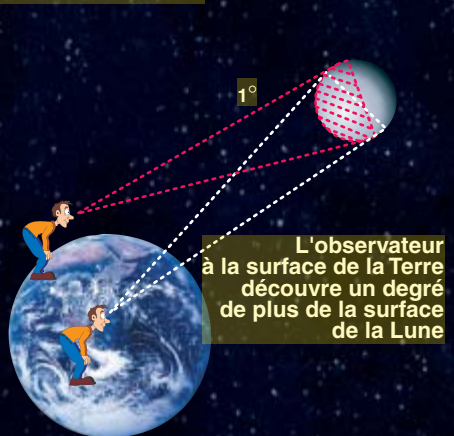
Les libérations apparentes, observées depuis la Terre, proviennent de la configuration géométrique de la Lune par rapport à la Terre. Toutefois, la Lune est soumise à des balancements qui lui sont propres. Newton eut le premier l'idée d'un mouvement de balancement réel de la Lune qui se superposerait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

a) Les libérations 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 libérations diurnes atteint un degré.

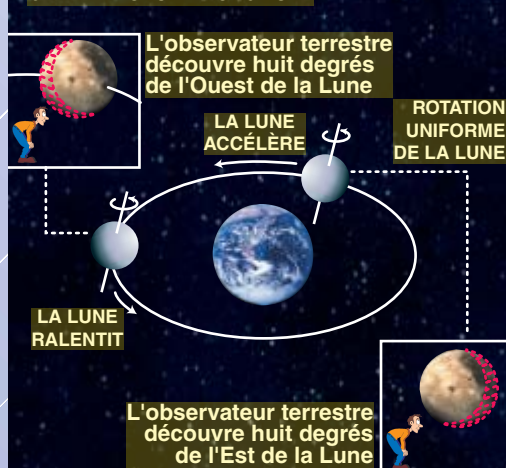
b) Dans les libérations en longitude, la face visible de la Lune semble se déplacer de huit degrés tantôt vers l'Est, tantôt vers l'Ouest. La raison est simple : la vitesse de révolution de la Lune varie entre le périégée (vitesse maximale) et l'apogée (vitesse minimale), alors que sa vitesse de rotation 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 libérations 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.

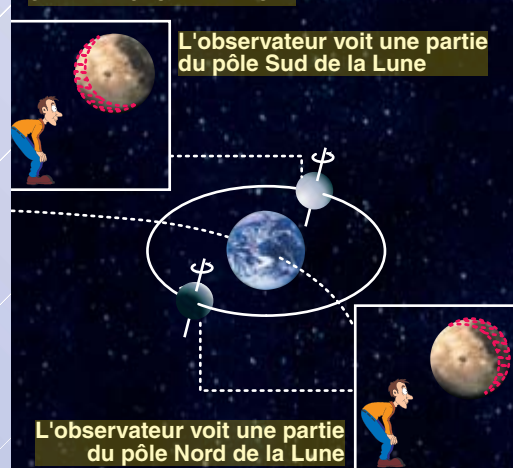
a. LIBÉRATIONS DIURNES

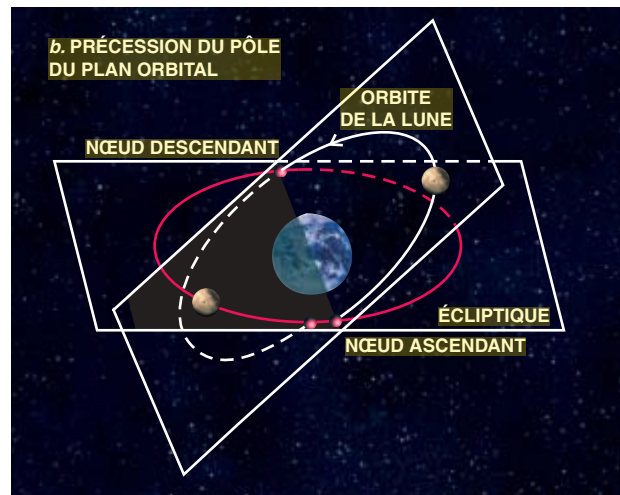
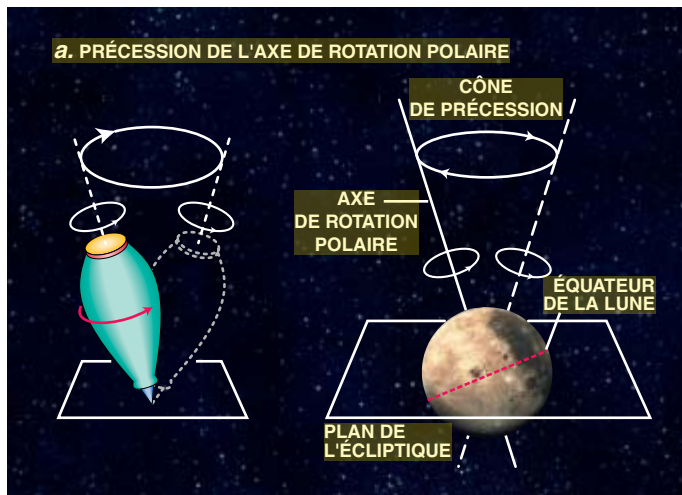


b. LIBÉRATIONS EN LONGITUDE



c. LIBÉRATIONS 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

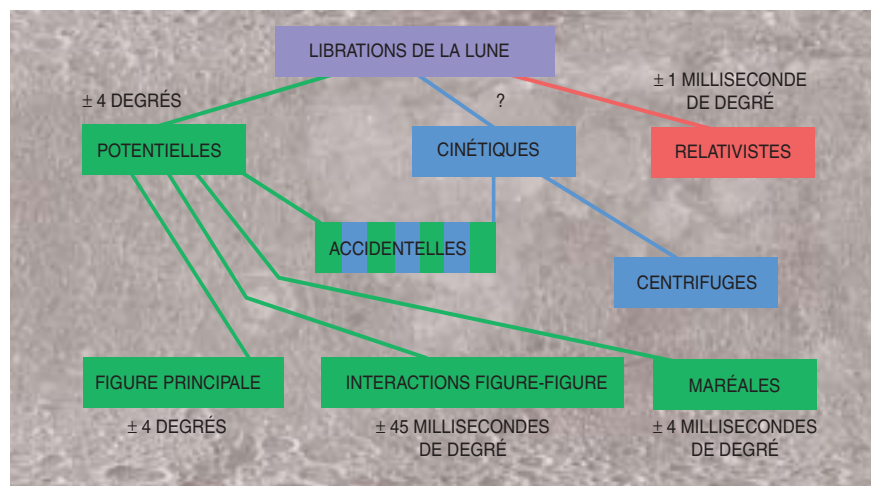
gravitationnel sur les libérations lunaires. Nous avons calculé les libérations produites par cet effet et déterminé celles qui sont compatibles avec les libérations connues. Nous avons ainsi réduit en retour la fourchette des valeurs possibles en estimant la borne supérieure à 3×10^{-6} .

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.