L'Attracteur
La revue de physique

série 2, numéro 1 — novembre 2015

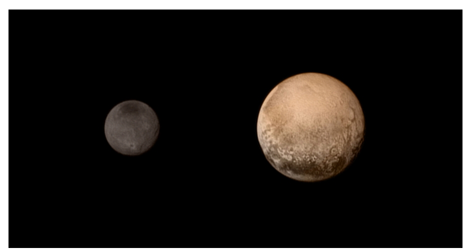
Nouvelles de l'UdeS

⧫ **L'Attracteur** est une publication du département de physique de l'Université de Sherbrooke, destinée principalement aux professeurs de physique des collèges et des écoles secondaires. Nous espérons que les quelques moments nécessaires à sa lecture aideront les enseignants à mieux faire apprécier la physique à leurs étudiants.

⧫ Le département de physique de l'Université de Sherbrooke se voit accorder une subvention de $ 33,5 millions sur sept ans afin de lancer une initiative intitulée *De la science quantique aux technologies quantiques*. Cette subvention provient du programme *Apogée* du gouvernement canadien ; seuls cinq subventions ont été accordées lors du concours inaugural, toutes disciplines confondues, à travers le Canada.

⧫ La Fondation canadienne pour l'innovation (FCI), le gouvernement du Québec et d'autres partenaires, dont l'Université de Sherbrooke, annoncent leur contribution financière à un projet novateur de près de $ 8 millions intitulé *Nouvelle initiative pour l'avancement de la science et des technologies quantiques de l'information* (New Initiative for Quantum Information Science and Technology - NIQUIST).

Nouvelles scientifiques

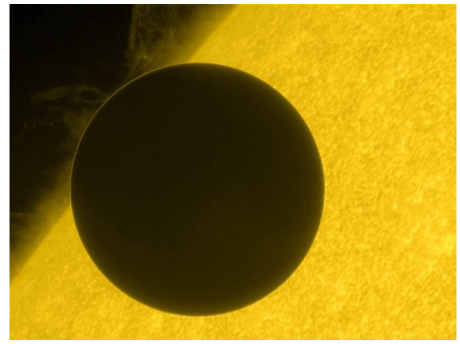


⧫ La sonde *New Horizons*, lancée en 2006, nous a fait découvrir la planète naine Pluton et ses satellites au cours de l'été 2015. Parmi les curiosités qu'elle nous a révélées, signalons des glaciers d'azote, de méthane et de monoxyde de carbone. Fait intéressant, Pluton et son principal satellite Charon (la photographie ci-dessous a été prise par New Horizons ; Charon est au premier plan) sont en rotation synchrone, c'est-à-dire que la période de révolution des deux objets l'un autour de l'autre est la même que la période de rotation de chacun des deux objets, de sorte que Charon apparaît toujours au même endroit dans le ciel de Pluton. C'est la situation décrite dans l'article principal de ce numéro.

⧫ Un groupe de recherche au Laboratoire européen pour la physique des particules (CERN) a annoncé la découverte d'une nouvelle particule formée de quarks, le **pentaquark**, formée de cinq quarks, ou plus précisément de quatre quarks et d'un antiquark (2 quarks u, 1 quark d, 1 quark c et un antiquark $\bar{c}$). Rappelons que les particules qui interagissent fortement (les *hadrons*) étaient jusqu'ici soit formées de trois quarks (ce sont les *baryons*, comme le proton et le neutron), soit formées d'un quark et d'un antiquark (ce sont les *mésons*). Le pentaquark est en fait une particule formée d'un baryon et d'un méson ; il n'est pas clair encore si le baryon et le méson sont liés de manière faible, ou si tous les quarks de cet ensemble sont fortement intégrés. La théorie des interactions fortes stipule que les quarks ne peuvent exister à l'état isolé, mais seulement en groupes de trois quarks, ou en paires quark-antiquark.

Saviez-vous que...

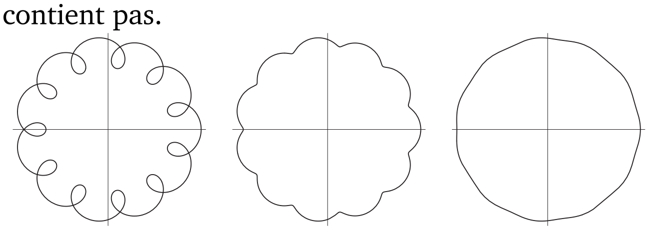
Les malheurs de Le Gentil Le dernier passage de Vénus sur le disque solaire date de 2012. Ce passage ne se produit qu'à des intervalles de 113 et 130 ans et était important dans les siècles passés : le passage définit un événement se produisant à un moment précis. Il suffit de l'observer de deux endroits très éloignés pour en déduire la distance terre-Soleil par la méthode des parallaxes.



C'est ce qu'a tenté l'astronome français Guillaume Le Gentil, en se rendant aux Indes pour observer ce passage en 1761. Le voyage d'aller dure un an. Une fois arrivé près de la colonie française de Pondichéry, il constate qu'elle est occupée par les Anglais, en guerre contre la France à ce moment, et il ne peut observer le passage de Vénus qu'à bord d'un navire, ce qui ne lui sert à rien en raison du roulis. Le voyage étant si long, il décide d'attendre le passage de 1769 en Asie, huit ans plus tard, plutôt que de retourner en France. Il profite de l'intervalle pour voyager dans l'océan Indien et l'océan Pacifique. Il espère observer le transit du 3 juin 1761 depuis Manille (Philippines), mais les autorités espagnoles le soupçonnent d'être un espion français et il doit se résoudre à retourner à Pondichéry afin d'y observer le second passage. Mais un nuage isolé gâche tout, après des jours de temps clair. Après un épisode de dépression, il entreprend le mouvementé voyage de retour : son premier navire se perd dans une tempête ; il est recueilli par un navire espagnol et n'arrive en France qu'en 1771. Aucune de ses lettres n'étant parvenue en Europe, on l'avait déclaré légalement mort et ses héritiers s'étaient partagé ses biens, qu'il ne put retrouver malgré un procès. Ah ! les avocats...

Le tord-méninges

La Lune tourne autour de la terre et la terre autour du Soleil, approximativement en suivant une trajectoire circulaire. Quelle doit être alors le type de trajectoire suivi par la lune, vu d'un observateur au repos par rapport au Soleil ? Lequel des trois choix ci-dessous correspond le mieux à la réalité et pourquoi ? Notez que l'orbite (B) comporte des portions concaves, alors que l'orbite (C) n'en contient pas.



(A) (B) (C)

(solution à la fin)

Démonstrations

♦ Les simulations numériques de problèmes physiques sont de plus en plus abordables. En plus de nombreux programmes exécutables en ligne (applets javas ou mini-programmes), il est aussi relativement facile de les écrire soi-même. Le langage Python est particulièrement adapté à cette tâche et est un outil de plus en plus utilisé dans le monde scientifique. L'Attracteur mettra à votre disposition des petits programmes pouvant être utilisés avec les distributions standard de Python sur les PC[a] ou les macs.[b]
Dans ce numéro, nous offrons un court programme simulant l'effet de la résistance de l'air en balistique. Cet effet ne peut pas être calculé analytiquement, sauf dans le cas d'un mouvement en ligne droite.

♦ Dans cette vidéo, on montre, au ralenti, le mouvement d'un slinky suspendu sur toute sa longueur et soudainement relâché. Ce qui est frappant, c'est bien sûr l'immobilité de la partie inférieure du slinky, qui ne bouge pas tant que sa partie supérieure ne l'atteint pas. Ceci est parfaitement normal, puisque le bilan des forces sur chacune des parties du slinky ne change pas tant que l'étirement est le même, et celui-ci ne change que dans le sillage d'une onde longitudinale qui se propage vers le bas à vitesse finie. Ce qu'on peut aussi remarquer dans quelques-unes de ces vidéos, c'est que le slinky possède aussi un mouvement de torsion par rapport à son axe, et que l'onde de torsion se propage plus rapidement que l'onde longitudinale.

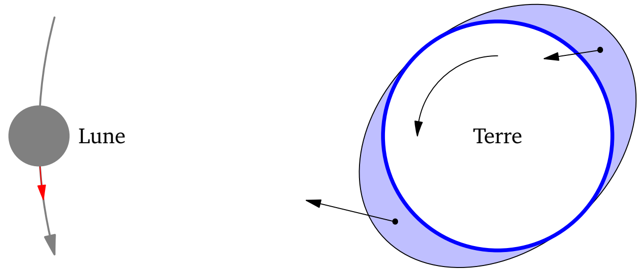
a. http://continuum.io/downloads
b. https://www.enthought.com/products/canopy/

Article de fond
À la recherche du temps perdu

Une seconde a été ajoutée à la journée du 30 juin dernier. Cet ajout est la conséquence d'une variation de la période de rotation τ de la terre sur elle-même. Dans ce court article, nous allons explorer la cause de cette augmentation à l'aide de raisonnements qui peuvent faire l'objet de problèmes abordables au niveau collégial.

Des traces géologiques montrent que la durée du jour terrestre n'était que de 21,9 heures il y a environ 600 millions d'années.

L'effet des marées Les marées sont causées par le différentiel de l'attraction lunaire (et solaire) entre les faces opposées de la terre et entraînent l'apparition d'un «bourrelet» sur les océans (indiqué en bleu pâle sur la figure). Cependant, celui-ci n'est pas aligné parfaitement avec la lune, mais fait un certain angle avec elle. Outre l'effet du soleil, cet angle est causé par la rotation de la terre sur elle-même, dans le sens indiqué. L'effet gravitationnel du bourrelet sur la lune, illustré grossièrement par les flèches sur la figure, est d'augmenter le moment cinétique de la lune (le couple de forces produit par le bourrelet résulte en une accélération indiquée par la flèche rouge). En contrepartie, la Lune agit sur le bourrelet et diminue le moment cinétique de la terre d'autant.



La dynamique des marées est certes très complexe : le bourrelet n'existe qu'en moyenne, car les continents empêchent sa formation telle qu'illustrée. Le bourrelet «moyen» n'a qu'une amplitude de 3,2 cm. Il est en fait très difficile de calculer le taux de ralentissement causé par ce bourrelet. Par contre, dans un avenir lointain, le jour terrestre, à force d'augmenter, sera devenu égal au mois lunaire. Un problème abordable au niveau collégial est le calcul de ces conditions finales, ce qui peut se faire en mettant à profit la loi de conservation du moment cinétique. Nous simplifions le problème en supposant que l'orbite lunaire est circulaire et que la densité de la Terre est homogène. Introduisons d'abord quelques symboles :

$M = 5.97 \times 10^{24}\text{kg}$	masse de la terre
$m = 7.35 \times 10^{22}\text{kg}$	masse de la lune
τ	période de rotation de la terre, actuellement τ_0
$\omega = 2\pi/\tau$	vitesse angulaire associée, actuellement ω_0
T	période de révolution de la lune, actuellement $T_0 = 27,32\tau_0$
Ω	vitesse angulaire associée $2\pi/T$
r	rayon de l'orbite lunaire, actuellement $r_0 = 384\,399$ km
$I = \frac{2}{5}MR_e^2$	moment d'inertie de la terre (R_e : rayon équatorial = 6 378 km)

Le moment cinétique total terre-lune est conservé, car les forces de marées n'agissent pas à l'extérieur de ce système.

Le moment cinétique total du système terre-Lune est à tout moment la somme des contributions suivantes :

$$L = I\omega + mr^2\Omega \qquad (1)$$

et sa valeur est facilement calculable à partir des valeurs actuelles données ci-dessus. Nous avons négligé ici le moment d'inertie de la Lune par rapport à son centre, petit par rapport au moment d'inertie mr^2 associé au mouvement de son centre de masse. Dans les conditions finales, $\omega = \Omega$ et le moment cinétique total (terre + lune) est inchangé. Donc $L = \omega(I + mr^2)$. Cette équation nous permet en principe de déterminer ω, mais il nous manque la valeur de r. Celle-ci provient de la troisième loi de Kepler pour une orbite circulaire : $r^3 = GM/\omega^2$, valable en tout temps. En substituant cette expression de r dans l'équation précédente pour L, on trouve

$$\left(\frac{L}{m\omega} - \frac{I}{m}\right)^{3/2} = \frac{GM}{\omega^2} \ , \qquad (2)$$

où toutes les valeurs sont connues sauf ω. Cette équation peut-être résolue numériquement (par exemple graphiquement). La solution est $\omega = 1,37 \times 10^{-6}$rad/s, soit un jour équivalent à 53 jours actuels. Donc non seulement la terre ralentit, mais la lune aussi ! Cependant, le moment cinétique de la lune augmente, car elle s'éloigne : le rayon de son orbite serait plus grand d'environ 50%.

Calcul du taux de ralentissement On peut mesurer précisément la distance terre-lune moyenne au moyen de lasers et des miroirs installés sur la lune en 1969 et 1972. On observe effectivement une augmentation de r sur la période 1970-2012, de 38mm par année. En reportant ces valeurs sur un taux de décroissance du moment cinétique terrestre, on trouve que le taux de ralentissement causé par les marées est de 1,7 ms/siècle. Ce calcul est aussi une excellente application du calcul différentiel accessible au niveau collégial, que nous allons maintenant expliquer. Le problème est de calculer la dérivée par rapport au temps $\dot{\omega}$ de la fréquence angulaire ω, à partir de la dérivée $\dot{r}$ du rayon, sachant que cela entraîne aussi une variation $\dot{\Omega}$ de la vitesse angulaire de la lune. La conservation du moment cinétique nous indique que la dérivée dL/dt doit être nulle. Selon l'éq. (1), on trouve donc

La durée du jour augmente de 2,3 ms par siècle.

$$\frac{dL}{dt} = I\dot{\omega} + mr^2\dot{\Omega} + 2mr\Omega\dot{r} = 0 \ . \tag{3}$$

D'autre part, les dérivées $\dot{\Omega}$ et $\dot{r}$ sont contraintes par la troisième loi de Kepler :

$$0 = \frac{d}{dt}(r^3\Omega^2) = 3r^2\Omega^2\dot{r} + 2r^3\dot{\Omega} \quad \Longrightarrow \quad \dot{\Omega} = -\frac{3\Omega}{2r}\dot{r} \ . \tag{4}$$

En éliminant de la sorte $\dot{\Omega}$ au profit de $\dot{r}$ dans l'éq. (3), on trouve $\dot{\omega} = mr\Omega\dot{r}/2I$. En substituant $\dot{r} = 0,038\text{m/an} = 1,2 \times 10^{-9}\text{m/s}$ dans cette formule, on trouve $\dot{\omega} = 4,6 \times 10^{-22}\text{rad/s}^2$, ce qui équivaut à une dérivée $\dot{\tau} = 1.7 \times 10^{-5}\text{s/an}$, ou encore 1,7 ms de changement de période par siècle. Des calculs plus sophistiqués, qui tiennent compte de la complexité de l'orbite lunaire, donnent 2,3 ms/siècle.

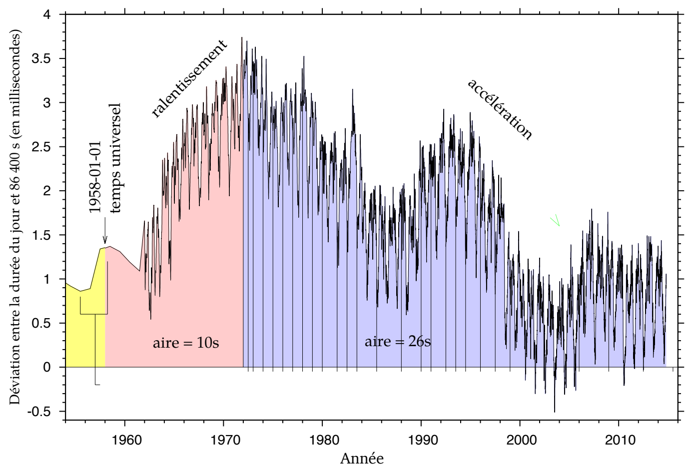
Avant que la durée du mois et du jour ne se rejoignent, le soleil aura le temps, dans quelques milliards d'années, de vaporiser les océans (donc d'éliminer les marées) et même d'engouffrer la terre.

Or, la vitesse angulaire est la dérivée d'un angle : $\omega = \dot{\theta}$, où θ est l'angle que fait, par exemple, le méridien de Greenwich avec une direction fixe dans l'espace. Supposons que cet angle est nul à 0h00 le 1er janvier 1900. Si ω n'est pas exactement $2\pi/86\,400$, alors θ ne revient pas à zéro au bout d'une période $\tau_0 = 86,400\text{s}$ et éventuellement une seconde intercalaire doit être ajoutée pour que θ revienne à zéro (modulo 2π). La valeur de $\dot{\omega}$ trouvée ci-dessus correpsond à une dérivée seconde constante $\ddot{\theta}$, et donc $\theta(t) = \omega(0)t + \frac{1}{2}\dot{\omega}(0)t^2$. Il faut ajouter une seconde intercalaire quand le deuxième terme de cette expression devient $2\pi/86\,400$, c'est-à-dire à $t = 5,6 \times 10^8\text{s}$, soit 17,7 années. Il faut ajouter 2 secondes intercalaires au double de cette période, et ainsi de suite, pour un total de 32 secondes après un siècle.

La fonte des calottes polaires Une autre cause de variation de la période τ réside dans la déformation de la terre, entraînant un changement de son moment d'inertie, donc une variation de la période de rotation, par conservation du moment cinétique. Les raisons précises sont variées : fonte des glaces, lent rebond de la croûte terrestre suite à la dernière ère glaciaire, changements dans la dynamique interne du manteau et du noyau, etc. Un exercice abordable au niveau collégial est un calcul approximatif du changement de la période de rotation de la terre causée par la fonte éventuelle totale des calottes polaires. Il faut pour cela connaître la masse de glace impliquée. Le volume de glace près des deux pôles est d'environ 30 millions de km^3. Cette masse de glace contribue peu au moment d'inertie I de la terre, car elle est située trop près de l'axe de rotation. Mais si cette masse M_g fondait, elle se répartirait de manière uniforme sur une mince coquille de rayon R (le rayon moyen de la terre). Le moment d'inertie d'une telle coquille serait $I_c = \frac{2}{3}M_g R^2$. La densité de la glace étant de 0.92 kg/ℓ, on calcule sans peine que cela représenterait une augmentation relative du moment cinétique terrestre d'environ 8×10^{-6}, et donc une augmentation semblable de la période. Il s'agit d'une augmentation unique, équivalente à l'effet des marées intégré sur plus de 40,000 ans.

La seconde SI et la durée du jour Dans le but de rendre la définition de la seconde indépendante des aléas de la dynamique terrestre, elle a été redéfinie en 1967 en fonction de propriétés atomiques : elle est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux hyperfins $F = 3$ et $F = 4$ de l'état fondamental $6S_{1/2}$ de l'atome ^{133}Cs. Or cette définition n'était qu'une consolidation d'une définition plus ancienne basée sur la durée de l'année 1900 et la seconde ainsi définie était déjà un peu trop courte en comparaison de la 86 400^{e} partie du jour solaire moyen de 1967.

> *Même sans ralentissement futur, nous sommes condamnés à ajouter des secondes intercalaires régulièrement, car la durée actuelle du jour est >86 400s.*



Appelons $\Delta\tau$ la différence entre la durée exacte du jour et $\tau_s = 86\,400$s. Si $\Delta\tau > 0$, alors une seconde intercalaire doit être ajoutée de temps en temps afin que midi à Greenwich garde son sens astronomique. La figure ci-dessus montre cette déviation $\Delta\tau$ en fonction des années. [1] On constate que la durée du jour a augmenté dans les années 1960 et qu'elle diminue en moyenne depuis 1972, année où on a commencé à ajouter des secondes intercalaires. Ce qui compte dans l'ajout de ces dernières n'est pas tant le taux actuel d'augmentation ou de diminution de la période de rotation de la terre, mais plutôt le retard accumulé, correspondant à l'aire sous la courbe. Ainsi, le retard accumulé depuis 1972 (aire en bleu sur la figure) correspond à 26 secondes, soit le nombre de secondes ajoutées depuis 1972 (incluant la dernière). Il est important de comprendre que même si le jour terrestre demeurait constant à partir de maintenant, la définition SI de la seconde nous forcerait à ajouter périodiquement des secondes intercalaires jusqu'à la fin des temps, car $\Delta\tau > 0$ maintenant.

1. Voir `http://www.ucolick.org/~sla/leapsecs/dutc.html`

Une carrière en physique

Diplômé du baccalauréat en physique (1984), puis d'une maîtrise en physique (1987) à l'Université de Sherbrooke, **Pierre Breton** a ensuite poursuivi ses études doctorales en génie électrique à l'Université McGill dans le domaine de la vision artificielle et de la robotique.

Déjà, pendant ses études, il acquiert une solide expérience en recherche par sa participation à divers projets universitaires et par la production de dizaines de publications et de communications scientifiques. Rapidement, il entame aussi sa carrière de consultant, en commençant par plusieurs projets relatifs au traitement informatique de bases de données, réalisant même un logiciel permettant de créer des stimuli visuels stéréoscopiques dynamiques pour des expériences cliniques à l'Institut de neurologie de Montréal. Il va sans dire qu'il était dès lors fin prêt pour les diverses responsabilités qu'il occupera par la suite.

Entrepreneur, investisseur et consultant, Pierre Breton a acquis ses connaissances et son expérience d'affaires en relevant des défis toujours plus complexes, notamment en aidant des PME à démarrer, à se redresser ou à prospérer.

Travailleur autonome, il remplit actuellement les fonctions de secrétaire-trésorier du Groupe Uman Pharma, spécialisé dans les médicaments génériques contre le cancer. Il partage également ses compétences pour le FIER Carrefour-Capital, un Fonds d'intervention économique régional qui contribue à la réalisation de projets novateurs dans les Laurentides.

Solution au tord-méninges

Le choix C est correct. Pour s'en convaincre, il suffirait de connaître exactement la distance terre-Lune (0,38 Mkm) et la distance terre-Soleil (149,6 Mkm) ainsi que la période de révolution lunaire (27,32 j) en comparaison de la longueur de l'année (365,25 j). Pour s'en convaincre, il suffit d'utiliser la formule de gravitation universelle de Newton et de calculer le rapport de la force gravitationnelle exercée par la terre sur la Lune à la force exercée par le Soleil sur la Lune. On trouve 0,455 : la Lune est plus attirée par le Soleil que par la terre (elle ne quitte pas l'orbite terrestre parce que la terre aussi est attirée vers le soleil, avec une accélération comparable). Donc, l'accélération nette de la Lune, dans le référentiel du Soleil, est grosso modo dirigée vers le centre du système solaire et jamais vers l'extérieur, car le vecteur accélération d'une trajectoire courbe est dirigé vers le centre de courbure de cette trajectoire. Par conséquent, l'orbite lunaire est nécessairement convexe. Si elle possédait des portions concaves, comme sur les choix A et B, cela signifierait que la force nette appliquée sur la Lune est parfois dirigée vers l'extérieur (i.e. vers la terre), ce qui est numériquement impossible.

L'Attracteur

Département de physique
2500, boul. de l'Université,
Sherbrooke (Québec)
J1K 2R1

physique@usherbrooke.ca
comité éditorial :
Y Grosdidier ● D Sénéchal
AM Tremblay ● G Vachon
A Reymbaut

Retrouvez-nous sur Facebook

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE