Les marées, comment ça marche?

On dit que c'est la Lune et, dans une moindre mesure, le Soleil qui sont responsables des marées terrestres parce qu'ils exercent une force gravitationnelle sur la Terre. Mais si c'est vrai, comment se fait-il qu'il n'y ait pas une bosse d'un côté et un creux de l'autre côté? La réponse à cette question n'est pas si simple qu'on pourrait le croire.

1- Un modèle simplifié

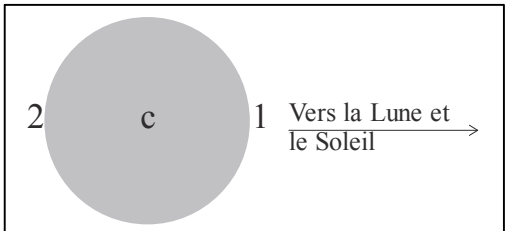

Figure 1

On suppose que la Terre est une sphère de densité uniforme et on ne tient pas compte de sa rotation. La Terre est en orbite autour du Soleil grâce à la force gravitationnelle exercée par ce dernier. En réalité, c'est plus complexe : c'est le système formé de la Terre et de la Lune qui est en orbite autour du Soleil. Le point du système qui se déplace sur une orbite elliptique selon les lois de Kepler est le *barycentre (centre de gravité)* du système.

La figure 1 montre la terre simplifiée. On suppose que cette terre agit comme une balle de caoutchouc : si on l'étire ou si on la comprime, une force élastique de sens contraire à la déformation apparaît. Dans la prochaine section, nous allons calculer les forces de gravité exercées sur une masse m tant par le Soleil que par la Lune aux trois points indiqués sur la figure. Nous calculerons aussi la force centripète exercée sur cette masse en raison du mouvement orbital de la Terre. Rappelons que nous ne tenons pas compte de la rotation de la Terre sur elle-même; ce n'est qu'à la section 5 que nous verrons l'effet de cette rotation sur les marées.

2- Deux forces réelles en présence et la résultante de ces deux forces

Commençons par le Soleil. La Terre tourne sur une orbite que l'on suppose ici circulaire. C'est la force de gravité du Soleil qui maintient la Terre sur cette orbite. Le tableau ci-dessous indique l'accélération centripète aux trois points de la figure 1 ainsi que l'accélération gravitationnelle vers le Soleil en m/s^2 pour la masse m de la figure 1. On notera qu'au point central c, les deux accélérations sont de même grandeur. La troisième colonne est la variation de l'accélération entre le point 2 et le point 1. Alors que l'accélération centripète est plus élevée au point 2 qu'au point 1, c'est le contraire pour l'accélération gravitationnelle.

	2	C	1	Δa
Accélération centripète	0,00593056	0,0059303	0,00593005	$5{,}0567 \times 10^{-7}$
Accélération gravitationnelle du Soleil	0,00592982	0,0059303	0,00593084	$-1{,}0113 \times 10^{-6}$
Accélération gravitationnelle de la Lune	0,00003211	0,00003319	0,00003432	$-2{,}2037 \times 10^{-6}$

La première ligne a été calculée en utilisant l'équation

$$a_c = \omega^2 R$$

où $R = D_{TS} + R_T$ D pour le point 2, $R = D_{TS}$ pour le point central C et $R = D_{TS} - R_T$ pour le point 1. La valeur de la vitesse angulaire de la Terre est donnée par :

$$\omega = \frac{2 \times \pi}{(365{,}25 \times 86\,400\ \text{s})} = 1{,}99102 \times 10^{-7}\ \text{rad/s}$$

Les valeurs utilisées pour les distances sont $D_{TS} = 1{,}4959787 \times 10^{11}$ m, $R_T = 6{,}378 \times 10^6$ m. On obtient la deuxième ligne pour les mêmes valeurs de R en utilisant la loi de la gravitation universelle de Newton :

$$F_G = ma_G = m\frac{GM_S}{R^2} \quad \Rightarrow \quad a_G = \frac{GM_S}{R^2}$$

où $M_S = 1{,}989 \times 10^{30}$ kg est la masse du Soleil. On obtient la troisième ligne de la même manière en utilisant la distance de la Terre à la Lune et la masse de la Lune soit $3{,}844 \times 10^8$ m et $7{,}349 \times 10^{22}$ kg.

On notera que la différence d'accélération gravitationnelle de la Lune est plus de deux fois plus grande que celle du Soleil à cause de sa proximité. De plus, si on additionne les valeurs de Δa_G de la Lune et du Soleil on obtient une valeur de $3{,}215 \times 10^{-6}$ m/s^2 ce qui est 63,6 fois plus grand que la différence en l'accélération centripète.

3- Que se passe-t-il aux pôles de la Terre

Ce qui se passe aux pôles nous aidera à mieux comprendre la situation à l'équateur.

On supposera que le Soleil et la Lune sont alignés (*nouvelle lune*) pour simplifier. Les deux forces réelles qui agissent sur la masse m sont la force gravitationnelle exercée par le Soleil et la Lune et la force élastique F_{el}. La force centripète F_c est la **résultante** de ces deux forces.

On peut décrire la force élastique F_{el} de la façon suivante : c'est la force exercée par la Terre sur la masse m. Selon la troisième loi de Newton, la masse m exerce une force égale et de sens contraire sur la Terre. Le résultat des deux forces F_{el} de la figure 2 est donc une ***compression*** de la Terre.

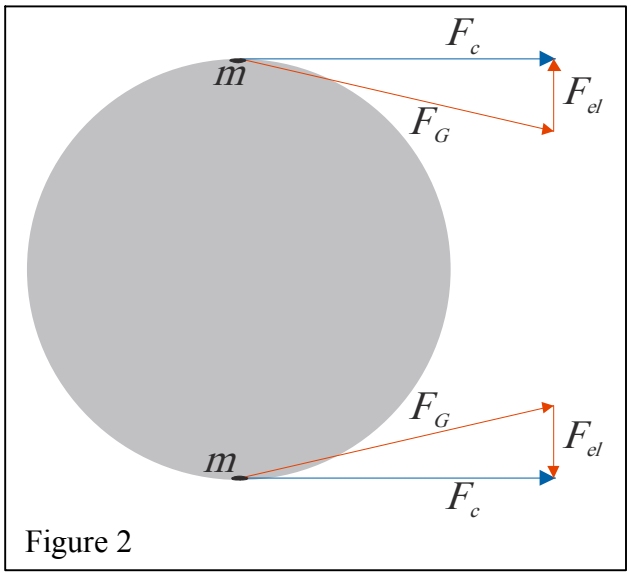

Figure 2

4- Et maintenant à l'équateur

Revenons aux chiffres du tableau. La différence de l'accélération centripète entre le point 1 et le point 2 est si petite par rapport à la différence de l'accélération gravitationnelle que nous la considérerons comme constante. Les deux vecteurs F_c représentant la force centripète à la figure 3 sont donc de même longueur. La force gravitationnelle au point 1 (à droite) est supérieure à la force centripète (*voir les chiffres du tableau*). Le vecteur F_G est donc plus long que le vecteur F_c. Comme la force centripète est la résultante de la force gravitationnelle et de la force élastique F_{el} cette dernière est dirigée vers le centre de la Terre.

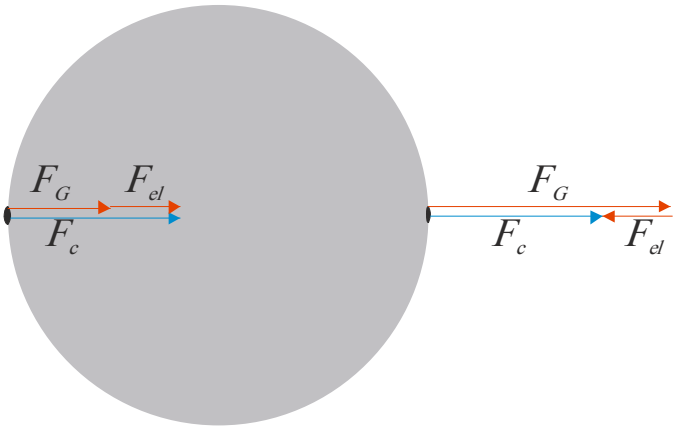

Figure 3

On obtient avec un raisonnement semblable une force élastique aussi dirigée vers le centre de la Terre de l'autre côté. Ces deux forces sont celles qu'exerce la Terre sur la masse m. La force exercée par la masse m sur la Terre est donc en sens inverse. La terre de notre modèle est donc étirée par ces deux forces. Remplacez le caoutchouc de notre modèle par les océans de notre planète et la force élastique par la propre force de gravité de la Terre et vous avez l'explication des deux marées quotidiennes. Notez que les croûtes continentales subissent aussi la force de marée, mais comme elles sont beaucoup plus rigides, on ne s'en rend pas compte.

5- Mais c'est bien plus complexe que cela

Lorsque le Soleil et la Lune ne sont pas alignés, les schémas vectoriels se compliquent un peu, mais ce n'est rien en comparaison de la complexité introduite par la rotation de la Terre sur elle-même. On pourrait conclure des schémas précédents que les deux « bosses » océaniques sont dirigées vers la Lune et le Soleil lorsque c'est la nouvelle lune, mais ce n'est pas le cas.

En réalité, la rotation de la Terre cause un désalignement des marées comme le montre la figure 4. Nous n'entrerons pas dans les détails concernant ce problème complexe.

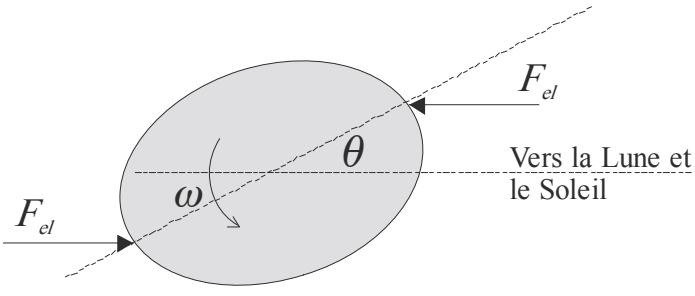

Figure 4