C

L E   S Y S T E M E   S O L A I R E   C O N S I D E R E   C O M M E

U N E   "M A C H I N E"   R E G I E   P A R   L A   G R A V I T A T I O N

Les lois de Képler

Les orbites planétaires

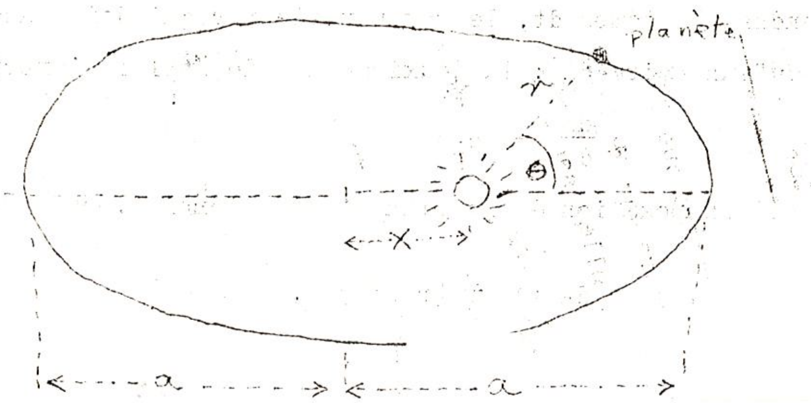
Mesure de masses et distances dans le système solaire

Phénomènes dus à la dimension finie des planètes

LES LOIS DE KEPLER

L'observations montre que les planètes gravitent autour du Soleil. Les lois principales du mouvement des planètes ont été trouvées empiriquement par Képler au 17e siècle : elles sont au nombre de trois et on les appelle "lois de Képler" :

1) L'orbite de chaque planète est une ellipse, dont un foyer est le Soleil.



Nous exprimons quantitativement cette loi de la manière suivante :

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \theta}$$

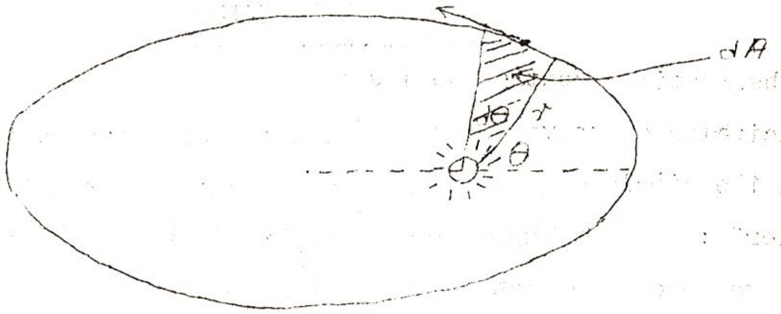
où

$$e = \frac{X}{a} < 1.$$

L'excentricité e détermine l'"écart" entre l'ellipse et un cercle. A l'exception de Mars, Mercure et Pluton, on observe que e $<$ 0,05 ; pour Mars, Mercure et Pluton, on trouve 0,09 , 0,2 et 0,2 respectivement.

Par conséquent, à une bonne approximation, nous pouvons considérer que les orbites sont <u>circulaires</u> dans la plupart des cas ; remarquons pourtant que Képler a été obligé d'abandonner l'idée classique d'orbites circulaires précisément à cause de l'excentricité de l'orbite de Mars !

2)



Pendnat le temps dt, le rayon vecteur r qui joint une planète au Soleil "balaye" une aire dA ; la deuxième loi de Képler s'exprime par

$$\frac{dA}{dt} = cte$$

quelle que soit la position de la planète sur l'orbite, ou encore :

$$dA \simeq \frac{r}{2}(r\,d\theta) ,$$

Soit :

$$\frac{dA}{dt} = \frac{r^2}{2}\left(\frac{d\theta}{dt}\right)$$

d'où

$$r^2\left(\frac{d\theta}{dt}\right) = cte.$$

Pour une orbite elliptique, r varie au cours du temps ; par conséquent $d\theta/dt$ varie aussi, et la vitesse orbitale du corps varie d'une façon périodique.

QUESTION C1 :	Quelle est la position d'un corps sur son orbite lorsque sa vitesse orbitale est d'une part maximale ? d'autre part minimale ? Quel est l'effet de l'ellipticité de l'orbite terrestre sur le mouvement apparent du Soleil sur l'écliptique ?

3) La période orbitale P d'une planète quelconque et la valeur moyenne de sa distance au Soleil sont liées par l'équation

$$\frac{P^2}{a^3} = cte.$$

Dans l'approximation des orbites circulaires, a est tout simplement le rayon de l'orbite. La constante est la même pour toutes les planètes.

UNE VERSION SIMPLIFIEE DU SYSTEME SOLAIRE.

Képler avait constaté que sa 3e loi s'appliquait aux quatre satellites de Jupiter connus à l'époque, la constante étant différente de celle relative aux planètes.

On montre plus généralement que les 3 lois peuvent être déduites à partir des lois de la mécanique et de la loi de la gravitation de Newton.

Dans une première approximation, on ignore les interactions des diverses planètes ; on suppose que les orbites sont déterminées uniquement par l'attraction du Soleil. De plus, on considère que les corps sont sphériques et infiniment rigides : on peut ainsi remplacer chaque corps du système solaire par une masse ponctuelle.

Considérons un corps de masse m_1 en orbite circulaire de rayon a (vitesse orbitale v_1), autour d'un corps de masse m_2 ($m_2 \gg m_1$). On peut considérer que le corps mobile est soumis à deux forces : la force d'attraction gravitationnelle et la force centrifuge ; l'orbite est stable si ces deux forces sont égales.

Force d'attraction $= G \dfrac{m_1 m_2}{a^2}$

Force centrifuge $= \dfrac{m_1 v_1^2}{a}$

Donc :

$$\frac{m_1 v_1^2}{a} = G \frac{m_1 m_2}{a^2}$$

On a aussi :

$$\text{Période de révolution} = P = \frac{2\pi a}{v_1}$$

d'où

$$\frac{P^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G m_2} = \text{Cte.}$$

C'est la troisième loi de Képler.

Le cas où m_1 n'est pas négligeable par rapport à m_2 à été résolu dans "l'Introduction à l'Astrophysique", p. 35.

La deuxième loi exprime tout simplement la loi de conservation du mouvement angulaire J ; le moment angulaire est défini par :

$$J = m\, r^2 \left(\frac{d\theta}{dt}\right),$$

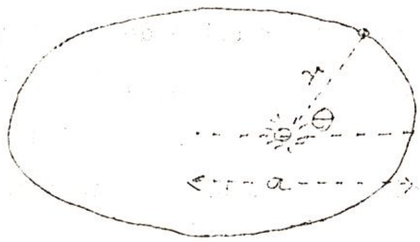
Il est conservé pour un système isolé.

Donc :

$$r^2 \left(\frac{d\theta}{dt}\right) = \text{cte.}$$

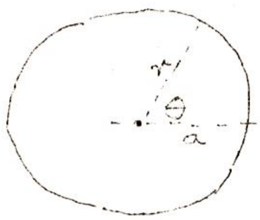
La première loi n'est qu'un cas particulier ; en effet, on montre que l'orbite d'un corps attiré par un autre selon une force en $1/r^2$ est une des quatre courbes suivantes :

cercle ou ellipse



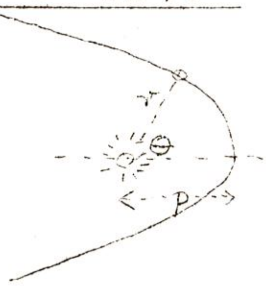
$0 < e < 1$

$$r = \frac{a(1-e^2)}{1+e\cos\theta}$$



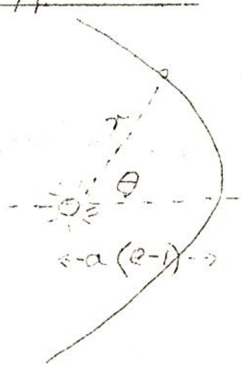
$e = 0$

parabole



$$r = \frac{2p}{1+\cos\theta}$$

hyperbole



$e > 1$ $\quad r = \dfrac{a(e^2-1)}{1+e\cos\theta}$

La courbe "choisie" par une masse mobile dépend de son énergie totale.

L'énergie totale E d'un corps de masse m_1 sous l'influence gravitationnelle d'un corps de masse m_2 est la somme de son énergie cinétique et de son énergie postentielle (voir "l'Introduction à l'Astrophysique", p. 34) :

$$E = \underbrace{\frac{m_1 v^2}{2}}_{\text{énergie cinétique}} - \underbrace{\frac{m_1 m_2 G}{r}}_{\text{énergie potentielle}}$$

Cette énergie peut être positive ou négative, mais pour un système isolé, elle est conservée.

Considérons le cas d'un corps qui se sépare d'un autre avec $E < 0$. On a alors :

$$\frac{m_1 v^2}{2} - \frac{m_1 m_2 G}{r} < 0.$$

Le long de la trajectoire de la masse m_1, v et r varient ; comme E est conservée, v décroit quand r croît. Comme $E < 0$, v devient nul pour une valeur finie de r. Le corps "s'arrête" en un point donné et revient vers le corps central : le mouvement est cyclique. Plus généralement, toute orbite fermée est caractérisée par une valeur négative de son énergie totale.

Considérons maintenant le cas $E > 0$. On a alors :

$$\frac{m_1 v^2}{2} - \frac{m_1 m_2 G}{r} > 0.$$

Comme avant, $v^2 \propto \frac{1}{r}$ + cte. Pourtant, on voit que même pour r infini, $v > 0$: le corps mobile peut "aller" jusqu'à l'infini", et ne revient jamais à son point de départ. Le mouvement est donc ouvert : plus généralement, une orbite parabolique ou hyperbolique est caractérisée par une valeur positive de l'énergie totale.

Quand $E = 0$, le corps arrive à l'infini avec une vitesse nulle : c'est le cas limite pour qu'un corps puisse s'évader de l'influence gravitationnelle d'un autre. La vitesse d'évasion v_{ev} est donc exprimée par :

$$\frac{m_1 v_{ev}^2}{2} = \frac{m_1 m_2 G}{r}$$

d'où

$$v_{ev} = \left(\frac{2 m_2 G}{r}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Remarquons que la vitesse d'évasion ne dépend pas du corps mobile : la même quantité intervient dans un problème de sondes interplanétaires ou dans un problème de perte d'une atmosphère planétaire.

Les orbites de toutes les planètes autour du Soleil et de tous les satellites autour de leurs planètes sont presque circulaires. Certains planétoïdes et de nombreuses comètes ont des orbites très elliptiques. Il suffit d'une petite perturbation pour "éjecter" du Système solaire une comète possédant une orbite presque parabolique (mais encore elliptique). Les cas extrêmes (e proche de 1) sont donc faiblement liés au Soleil.

Quelques comètes, après un ou plusieurs passages au voisinage du Soleil, n'ont plus jamais été revues. Une interprétation simple est que leur passage au voisinage des planètes a perturbé leur orbite elliptique initiale et que maintenant elles s'évadent du système solaire sur une orbite hyperbolique.

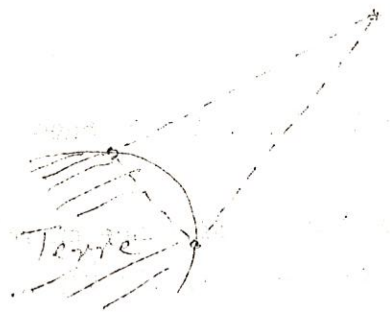
QUESTION C2 :	Pourriez-vous envisager une ou deux autres explications simples ?

Remarquons que la sonde américaine Pioneer 10, actuellement en route pour Saturne, suit une trajectoire hyperbolique ; elle sortira donc du système solaire.

QUESTION C3 :	Une sonde est lancée de la surface de la Terre à la vitesse d'évasion terrestre. Cette vitesse suffira-t-elle pour sortir du système solaire ? Vous pouvez négliger les effets des corps autres que le Soleil.

LA MESURE DES DISTANCES DANS LE SYSTEME SOLAIRE

DISTANCES DE LA LUNE ET DES PLANETES PROCHES

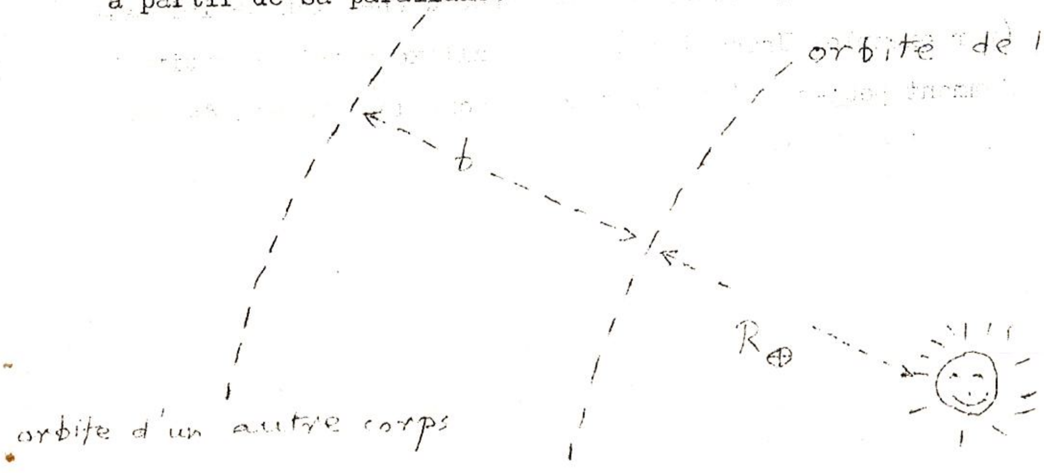


La distance d'un objet proche de la Terre a initialement été déterminée par une méthode classique de triangulation : si l'on repère simultanément la direction de l'objet observé de deux points très éloignés, on calcule directement sa distance à la Terre. Cette méthode s'adapte très bien à la lune, assez bien à Vénus, à Mars et au planétoïde Eros.; elle est trop imprécise pour des objets lointains.

Une méthode récente consiste à utiliser un laser pour déterminer la distance de la Lune et un radar pour celle de Vénus, Mercure et Mars. La mesure de l'intervalle de temps séparant l'émission d'un signal (laser ou radar) et la réception du signal réfléchi permet une détermination beacoup plus précise des distances. Remarquons, pourtant, que les distances mesurées par cette méthode dépendent de la valeur de la vitesse de la lumière : une erreur systématique changerait l'échelle des distances dans le système solaire.

LA DISTANCE DU SOLEIL : L'UNITE ASTRONOMIQUE

Le Soleil est déjà trop loin pour qu'on puisse déterminer sa distance à partir de sa parallaxe.



Considérons l'orbite de la Terre autour du Soleil et celle d'un autre corps planétaire c dont la distance à l'orbite terrestre est connue (égale à b).

Soit $T_{\oplus}$ la période de la Terre autour du Soleil, $M_{\oplus}$ la masse de la Terre et T,M la période et la masse du corps C.

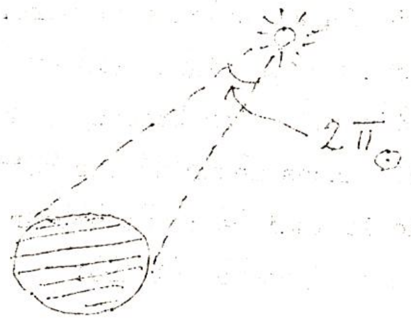
D'après la 3e loi de Képler :

$$\frac{R_{\oplus}^{3}}{T_{\oplus}^{2}} = \frac{(R_{\oplus} + b)^3}{T^2}$$

$T, T_{\oplus}$ et b étant mesurables, on peut calculer $R_{\oplus}$, la distance Terre-Soleil.

Pour appliquer cette méthode, il faut connaître la distance entre l'orbite terrestre et celle d'un autre corps planétaire -on utilise Vénus, Mars, ou (de préférence) le planétoïde Eros. Le lancement des sondes interplanétaires nous a fourni d'autres corps gravitant autour du Soleil et dont les distances à la Terre sont connues avec précision.

La parallaxe solaire $\pi_{\odot}$ est souvent utilisée : elle est, par définition, l'angle sous lequel on verrait le rayon de la Terre depuis le Soleil. Sa valeur est 8,8".



La distance moyenne du Soleil est une grandeur essentielle à la mesure des distances des étoiles proches ; on l'appelle l'unité astronomique (u.a) et sa valeur est environ $1,5 \times 10^8$ km.

QUESTION C5 :	Comment peut-on mesurer la distance d'une planète lointaine (par exemple, Uranus) dont la parallaxe est trop petite ? Comment peut-on déterminer les rayons des orbites de ses satellites ?

LA DETERMINATION DES MASSES DANS LE SYSTEME SOLAIRE

CONSTANTE DE LA GRAVITATION :

L force F s'exerçant entre deux masses m_1 et m_2 séparées par la distance r est exprimée par

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

La valeur de G n'est pas connue a priori -il faut la déterminer par des expériences de laboratoire. En pratique, on mesure indirectement la force s'exerçant entre 2 masses connues, séparées par une distance connue. On trouve ainsi que :

$$G \approx 6,7 \times 10^{-8} \text{ dyne cm}^2 \text{ g}^{-2}$$

LA MASSE DE LA TERRE :

Considérons une petite masse m en chûte libre à la surface de la Terre (masse $M_\oplus$, rayon $R_\oplus$).

Dans "l'Introduction à l'Astrophysique", p. 33, on montre que l'accélération $g_\oplus$ due à l'attraction de la Terre est :

$$g_\oplus = \frac{GM_\oplus}{R_\oplus^2}$$

L'accélération $g_\oplus$ peut être mesurée soit directement à partir des corps en chute libre, soit indirectement à partir d'expériences avec les pendules (quelle est la période d'un pendule ?) On trouve ainsi que :

$$g_\oplus = 981,4 \text{ cms}^{-1}$$

Le rayon $R_\oplus$ est connu à partir de mesures géodésiques ; donc, on trouve que la masse de la Terre est :

$$M_\oplus = 5,98 \times 10^{27} \text{ g}$$

et que sa densité moyenne est :

$$\bar{\rho}_\oplus \approx 5,5 \text{ g cm}^{-3}$$

MASSE DU SOLEIL :

La période de révolution P et le rayon moyen de l'orbite d'un corps de Masse M_1 gravitant autour d'un corps de masse M_2 obéissent à la 3e loi de Képler :

$$\frac{r^3}{P^2} = \frac{G(M_1 + M_2)}{4\pi^2}$$

Dans le cas de la Terre,

$$r = r_{\oplus} \ , \ P = P_{\oplus} \ , \ M_1 = M_{\oplus} \ , \ M_2 = M_{\odot} .$$

Toutes ces grandeurs, ainsi que la valeur de G, sont connues. On calcule alors la valeur de $M_2 = M_{\odot}$:

$$M_{\odot} = 1{,}99 \times 10^{33} \text{ g}$$

On remarque que la masse de la Terre est négligeable par rapport à la masse du Soleil ; ceci justifie a posteriori la méthode utilisée pour trouver la valeur de l'unité astronomique.

Le diamètre angulaire du disque solaire est de 32' ; par conséquent :

$$\text{le rayon du soleil} = 6{,}96 \times 10^{10} \text{ cm.}$$

La densité du Soleil est alors :

$$\bar{\rho}_{\odot} = 1{,}41 \text{ g cm}^{-3}.$$

MASSES DES PLANETES ET DES SATELLITES :

La masse d'une planète ayant au moins un satellite est calculée de façon analogue : on mesure la période de rotation du satellite autour de la planète et le diamètre de son orbite.

Dans les cas où il n'y a pas de satellite (Mercure, Vénus, Pluton), le problème est beaucoup plus difficile. Le système solaire "simplifié" que nous avons considéré jusqu'alors n'est qu'une première approximation : en deuxième approximation, les mouvements d'une planète sont perturbés par l'attraction gravitationnelle de toutes les autres.

En raison de ces perturbations on observe un écart à la 3e loi de Képler. La valeur de l'écart est fonction de la masse de la planète considérée. L'observation de cet écart permet de déduire la masse de la planète. Les masses ainsi trouvées sont beaucoup moins précises que celles déterminées directement à partir d'un satellite.

Ces écarts n'étaient heureusement pas encore observables à l'époque de Képler. S'il les avait connus, il aurait eu beaucoup de peine "à aller droit au but" et à trouver les lois qui portent son nom !

Un problème analogue se pose pour les satellites des planètes. L'orbite d'un satellite est perturbée essentiellement par le Soleil et par les autres satellites de la planète : en tenant compte de ces perturbations, on peut déduire la masse d'un satellite. Hormis le cas de la Lune, ces perturbations sont extrêmement petites ; par conséquent, les masses des satellites sont en général très mal connues. Les satellites artificiels mis en orbite autour de la Lune ont permis de réaliser les meilleures déterminations de sa masse ; les masses de Phoebos et Deimos sont connues à partir des perturbations qu'ils ont introduites dans le mouvement de Mariner IX en orbite autour de Mars.

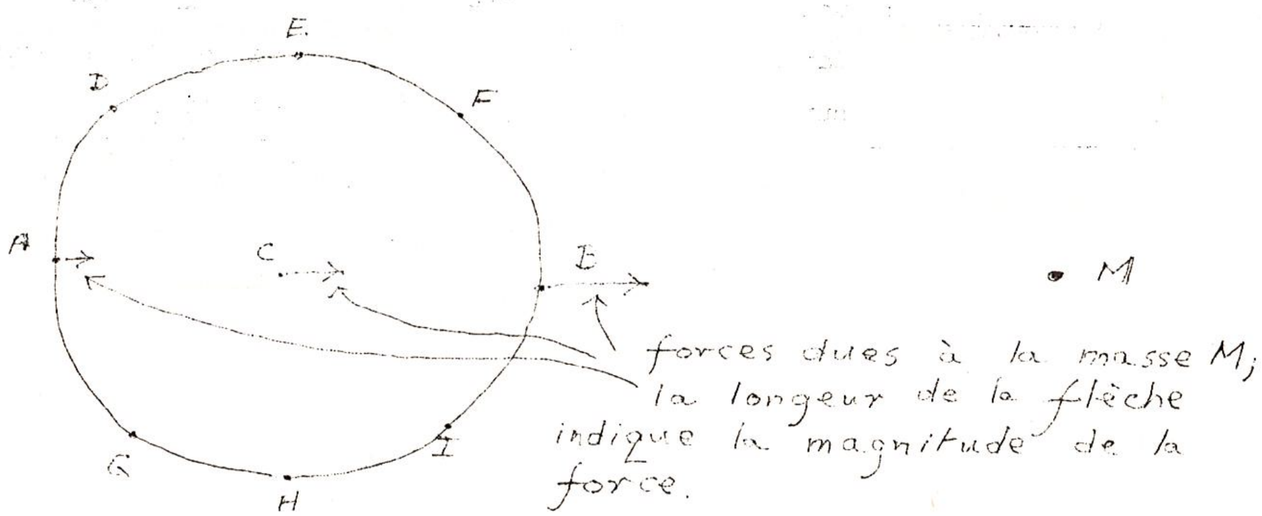
QUESTION C6 :	Considérons le satellite Titan, dont la distance à Saturne est d'environ 10^{11} cm. Comparer les forces exercées sur Titan par Saturne, Jupiter et le Soleil.

QUELQUES PHENOMENES GRAVITATIONNELS DUS AU FAIT QUE LES PLANETES NE SONT PAS DES MASSES PONCTUELLES

A une bonne approximation, le mouvement d'une planète peut être calculé en négligeant ses dimensions et sa forme.

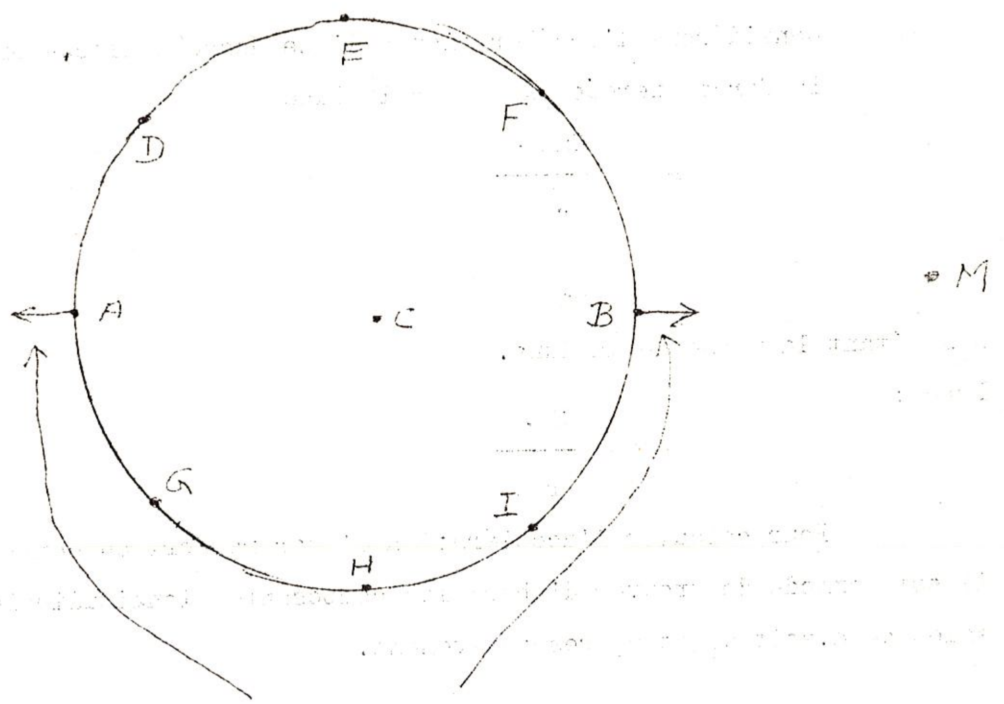
Toutefois les planètes ne sont ni ponctuelles ni parfaitement sphériques, ni infiniment rigides. En général, la force gravitationnelle sur un corps donné du système solaire n'est pas uniforme (pourquoi ?). Les forces exercées sur les différentes parties du corps ne sont donc pas égales et on doit en tenir compte dans l'étude du mouvement.

NOTIONS INTUITIVES DE GRADIENT D'UNE FORCE



Considérons un ensemble de points à une distance r d'une masse ponctuelle M. La force gravitationnelle due à M varie en $1/r^2$; donc la force d'attraction exercée sur une petite masse m située en B est supérieure à la force exercée en C, qui est elle-même supérieure à la force exercée en A. Par conséquent, aux trois endroits A, B, C, les accélérations a_A, a_B, a_C vérifient l'inégalité $a_A < a_C < a_B$; <u>par rapport au centre de la sphère</u>, les accélérations sont respectivement $a_A - a_C$, 0, $a_B - a_C$.

La direction de l'accélération relative indique la direction du mouvement de la masse m par rapport au centre C. En B, l'accélération relative est positive, elle est donc <u>dirigée vers la masse M</u> ; en A l'accélération relative est négative, elle est donc dirigée <u>dans le sens opposé</u>.

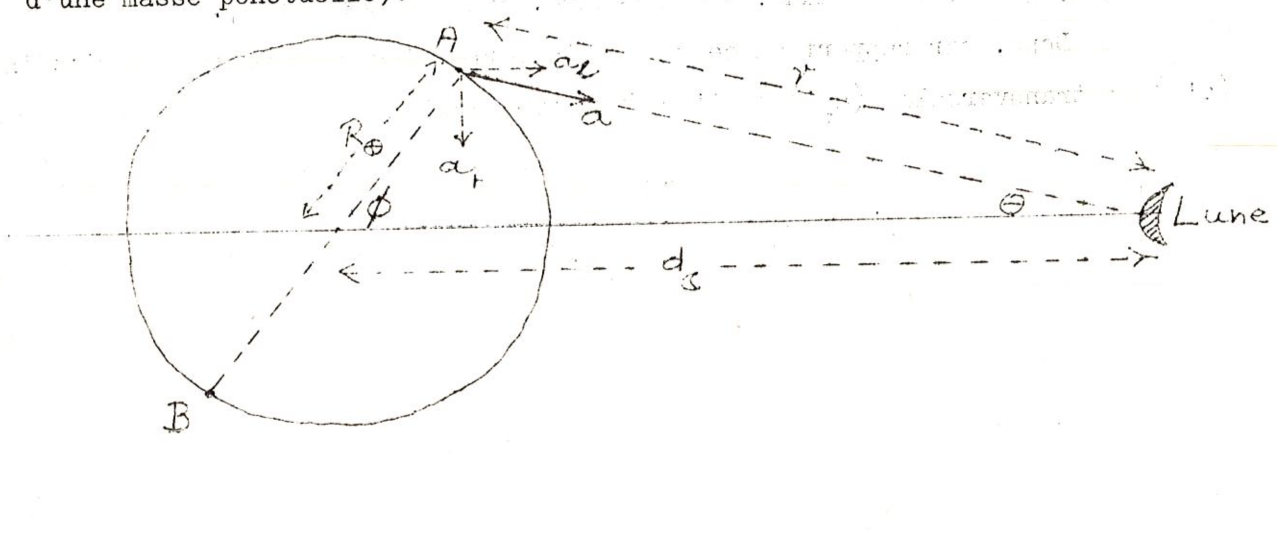


accélérations par rapport au centre C dues à l'attraction non uniforme de M ; c'est-à-dire les directions du mouvement par rapport au centre d'un corps non rigide remplissant initialement la sphère.

QUESTION C7 :	Considérer les autres points D, E, F, G, H, I du diagramme ; indiquer la direction de l'accélération par rapport au centre.

EFFET DE MAREES :

Supposons que la Terre est une sphère parfaitement rigide recouverte d'une couche uniforme d'eau et soumise à la seule attraction de la Lune. Ce modèle est bien entendu une "idéalisation" -(il est pourtant déjà loin de celui d'une masse ponctuelle).



Considérons l'accélération a d'une masse m placée en A.

La force exercée sur m par la Lune

$$= \frac{GmM_{☾}}{r^2}$$

$$= ma$$

$M_{☾}$ étant la masse de la lune.

Donc :

$$a = \frac{GM_{☾}}{r^2}$$

Pour calculer l'accélération a' par rapport au centre de la Terre, il est commode de trouver d'abord les composantes longitudinales et transversales de a, soit a_l et a_t respectivement.

$$a_l = a \cos \theta$$

$$= \frac{a(d_{☾} - R_{\oplus} \cos \phi)}{r}$$

$$= \frac{GM_{☾} (d_{☾} - R_{\oplus} \cos \phi)}{r^3}$$

$$a_t = a \sin \theta$$

$$= \frac{GM_{☾} R_{\oplus} \sin \phi}{r^3}$$

Or, l'accélération du centre de la Terre est $\frac{GM_{☾}}{d_{☾}^2}$ (pourquoi ?)

Elle est dirigée vers la Lune, c'est-à-dire, dans le sens de a_l.

Donc, par rapport au centre de la Terre, les composantes longitudinales (a'_l) et transversales (a_t') de l'accélération sont :

$$a_t' = a_t = \frac{GM_{☾} R_{\oplus} \sin \phi}{r^3}$$

$$a_1' = a_1 - \frac{GM_☾}{d_☾^{\,2}}$$

$$= GM_☾ \left[\frac{d_☾}{r^3} - \frac{R_⊕}{r^3} \cos\phi - \frac{1}{d_☾^{\,2}} \right]$$

Or, $R_⊕ \lll d_☾$

Donc $r \simeq d_☾$

et :

$$a_t' = \frac{GM_☾ \; R_⊕ \sin\phi}{d_☾^{\,3}}$$

$$a_1' = - \frac{GM_☾ \; R_⊕ \cos\phi}{d_☾^{\,3}}$$

d'où

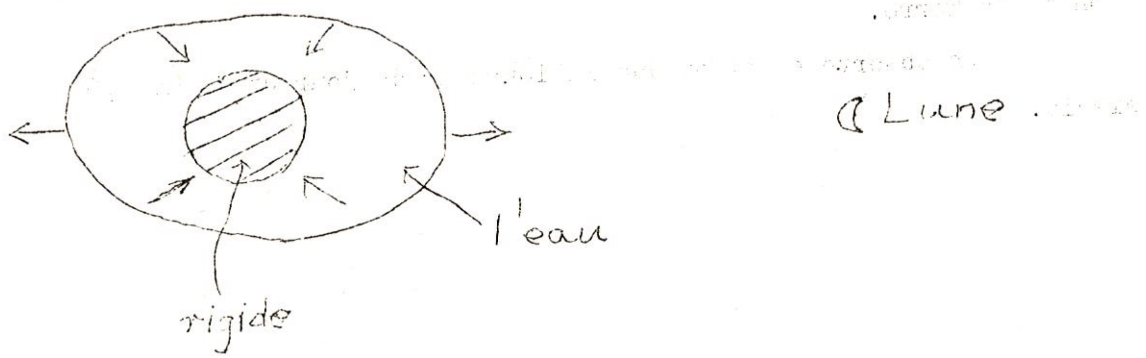
$$a' = \left[a_t'^{\,2} + a_1'^{\,2} \right]^{1/2}$$

$$\simeq \frac{GM_☾ \; R_⊕}{d_☾^{\,3}}$$

QUESTION C8 : Expliquer le signe de a'_1. Quel est le signe de a'_1 en B ?

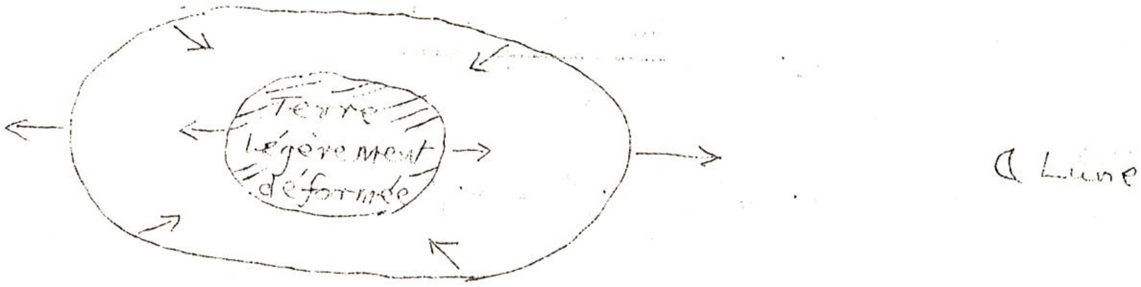
Ces résultats confirment les résultats qualitatifs obtenus précédemment.

Par conséquent, la couche d'eau est déformée par la présence de la Lune de la manière suivante :



C'est l'explication du phénomène des marées.

En première approximation, on conclut que la marée est haute à l'endroit de la Terre le plus proche de la Lune <u>et</u> à l'endroit diamétralement opposé. On observe que l'amplitude des marées est environ 70% plus faible que la valeur théorique. Pour expliquer la différence, on est amené à admettre que la Terre elle-même n'est pas infiniment rigide : elle se déforme sous l'influence de la Lune. La déformation de la couche d'eau par rapport à la surface de la Terre est donc réduite.



QUELQUES CONSEQUENCES DE L'EFFET DES MAREES :

La lune tourne autour de la Terre avec une période d'environ 29,5 jours. Le "bourrelet" produit par son attraction devrait suivre la Lune à la même vitesse angulaire. Par ailleurs, la Terre tourne sur son axe à une autre vitesse angulaire. Comme la surface terrestre n'est pas lisse, le "bourrelet" est soumis à un "frottement" (en particulier contre les bords des continents). Par conséquent, il y a une perte d'énergie accompagnée d'un ralentissement de la rotation de la Terre.

On observe en effet que la longueur du jour croît de 0,002 s par siècle.

Le ralentissement de la rotation de la Terre entraîne une perte de son moment angulaire. Or, le moment angulaire total du système "isolé" Terre-Lune doit rester constant. Le moment angulaire de la Lune doit donc croître. La lune est liée à la Terre :

$$\frac{M_{☾} v_{☾}^2}{r_{☾}} = \frac{G M_{☾} M_{⊕}}{r_{☾}^2}$$

La vitesse angulaire de la Lune : $\dot{\theta}_{☾} = v_{☾}/r_{☾}$.

Donc, le moment angulaire de la Lune :

$$J_{☾} = M_{☾} r_{☾}^2 \dot{\theta}_{☾}$$

$$= M_{☾} r_{☾}^2 \frac{v_{☾}}{r_{☾}}$$

d'où :

$$J_{☾} v_{☾} = G M_{☾} M_{⊕}$$

Par conséquent, à mesure que $J_{☾}$, croît $v_{☾}$ décroît, et $r_{☾}$ croît : la Lune s'éloigne de la Terre (environ 10 mètres par siècle) et le mois lunaire devient plus long.

Ces phénomènes sont dus à la différence entre la vitesse angulaire de rotation de la Terre et la vitesse angulaire de révolution de la Lune. Ils continuent donc jusqu'à ce que la différence disparaisse ; en effet, dans un avenir lointain, on peut atteindre une situation stable quand la longueur du jour sera égale à la longueur du mois lunaire.

Une situation analogue s'est produite dans le cas de la lune. De même que la Lune engendre des marées sur la Terre, la Terre engendre des marées sur la Lune ; il est bien évident qu'il ne s'agit pas d'une couche d'eau, mais d'une déformation de la Lune dans son ensemble. Ces marées sont $M_{⊕} R_{☾} / M_{☾} R_{⊕} \approx 20$ fois plus puissantes que sur la Terre (d'où vient ce calcul ?).

Supposons que, dans le passé, la Lune tournait sur son axe plus rapidement qu'elle ne tournait autour de la Terre. L'effet de marée produit une perte d'énergie. Il ne s'agit pas cette fois-ci d'un frottement d'un liquide contre un solide. (Expliquer l'origine de cette perte d'énergie). La Lune perd de l'énergie jusqu'à ce que la période de rotation autour de son axe soit égale à la période de révolution. Ce processus a dû avoir lieu dans le passé ; à l'heure actuelle, on voit toujours le même hémisphère lunaire, les deux périodes sont égales.

On retrouve des phénomènes analogues dans d'autres systèmes de satellites. Par exemple, la période de rotation de Phobos, satellite de Mars, est égale à sa période de révolution autour de la planète.

Ce processus est très lent. Si à l'heure actuelle la période d'un satellite est "synchronisée" avec sa période de révolution, le satellite a probablement été dans le voisinage de la planète depuis très longtemps (par exemple, les deux ont été formées en même temps). On note qu'un manque de synchronisation n'implique pas le contraire !

QUESTION C9 : Nous avons considéré l'évolution de l'orbite de la Lune dans le cas où sa période de rotation autour de la Terre est supérieure à la période de rotation de la Terre autour de son axe. Analyser l'évolution dans l'hypothèse où la Terre tournait plus lentement que la Lune dans le passé.

RESUME

Le mouvement des corps dans le système solaire est régi par la gravitation. En première approximation, c'est-à-dire en négligeant l'attraction de tout corps autre que le Soleil et en négligeant la dimension et la forme de chaque corps, les mouvements obéissent aux lois de Képler. Ceci nous permet "d'arpenter" le système solaire et de "peser" la plupart des planètes.

En deuxième approximation, les orbites s'écartent de ces lois simples et il faut tenir compte des interactions mutuelles des corps, de leurs dimensions, de leur forme, de leurs propriétés mécaniques etc... Ceci nous permet de "peser" certains satellites et les planètes sans satellites ; on peut de plus en déduire quelques renseignements sur la structure interne des planètes.