CARACTÈRE NON GALILEEN DU REFERENTIEL GEOCENTRIQUE

I- RAPPELS

I-1- Référentiel géocentrique

A- Définition d'un référentiel galiléen

Le principe d'inertie (ou 1ère loi de Newton) postule l'existence de référentiels dits galiléens par rapport auxquels le mouvement d'un point matériel isolé est un mouvement rectiligne uniforme. Si le point isolé est initialement au repos, il reste au repos.

Le référentiel de Copernic constitue le meilleur référentiel galiléen identifiable expérimentalement.
On peut associer à ce référentiel un repère cartésien $\left(C,\vec{e_x},\vec{e_y},\vec{e_z}\right)$:

- C est le centre de masse du système solaire.
- $\vec{e_x},\vec{e_y}$ et $\vec{e_z}$ définissent les directions de trois étoiles suffisamment éloignées pour être considérées comme fixes.

Remarque : Ce référentiel est aussi appelé référentiel de Képler ou référentiel héliocentrique.

Dès lors qu'un référentiel peut être considéré comme galiléen, tout référentiel animé d'un mouvement de translation rectiligne et uniforme par rapport à lui est lui-même galiléen.

B- Le référentiel géocentrique

On peut associer à ce référentiel un repère cartésien $\left(T,\vec{e_x},\vec{e_y},\vec{e_z}\right)$:

- T est le centre de masse de la Terre.
- $\vec{e_x},\vec{e_y}$ et $\vec{e_z}$ définissent les directions de trois étoiles suffisamment éloignées pour être considérées comme fixes (les mêmes que celles définies pour le référentiel de Copernic).

Dans ce référentiel, la Terre tourne autour d'un axe fixe.

Le référentiel géocentrique R_G est galiléen s'il est animé d'un mouvement de translation rectiligne et uniforme par rapport au référentiel de Copernic R_C.

On peut considérer que c'est le cas pour des durées de l'ordre de grandeur de la journée (ou des durées inférieures).

I-2- Force de gravitation et champ de gravitation

On considère un point matériel O de masse m_O et un point matériel M de masse m.

Il existe entre O et M une interaction attractive appelée interaction gravitationnelle : $\overrightarrow{F_{O/M}} = \dfrac{-Gmm_O}{r^2}\overrightarrow{u_r}$

G représente la constante de gravitation universelle : $G = 6{,}673.10^{-11}$ N.m^2.kg^{-2}.

On peut aussi noter $\overrightarrow{F_{O/M}} = m\overrightarrow{G_0(M)}$ avec $\overrightarrow{G_0(M)} = \dfrac{-Gm_O}{r^2}\overrightarrow{u_r}$ le champ de gravitation créé par la masse m_O au niveau du point M située à une distance r de O.

Le champ de gravitation $\overrightarrow{G_0}$ créé par la masse située en O existe en tout point M de l'espace, qu'il y ait un point matériel en M ou non. Si une masse m est située au point M, elle est alors soumise à la force de gravitation exercée sur elle par la masse m_0.

II- PRISE EN COMPTE DU CARACTÈRE NON GALILÉEN DU RÉFÉRENTIEL GÉOCENTRIQUE – PHÉNOMÈNE DES MARÉES OCÉANIQUES

II-1- Introduction

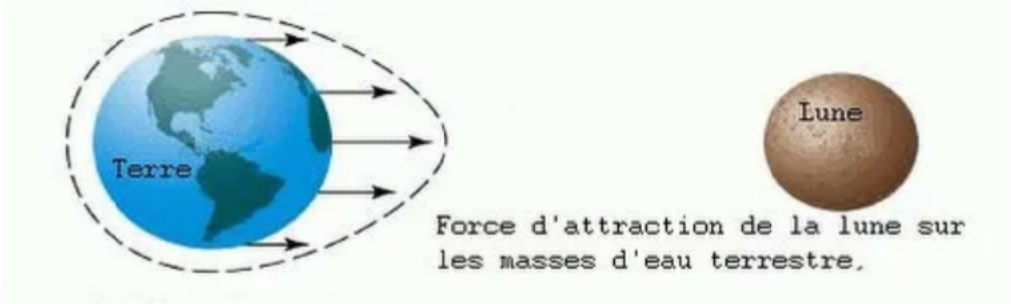
On suppose dans ce paragraphe que le référentiel géocentrique est galiléen. Nous allons voir que le phénomène des marées océaniques infirme cette hypothèse.

On considère un bourrelet océanique entourant la Terre.
La présence d'astres au « voisinage » de la Terre (Soleil, Lune) modifie la répartition des masses d'eau à sa surface.

On considère dans un premier temps l'action d'un seul astre assimilé à une masse ponctuelle placée en A et situé dans le plan de l'écliptique.
Une particule de fluide de l'océan de masse m située en M est soumise à deux forces dans le référentiel géocentrique galiléen :

- Force de gravitation exercée par la Terre : $\overrightarrow{F_{T/M}} = m\overrightarrow{G_T(M)}$
- Force de gravitation exercée par l'astre considéré : $\overrightarrow{F_{A/M}} = m\overrightarrow{G_A(M)}$

Le P.F.D. appliqué à M s'écrit donc : $m\left(\overrightarrow{a_M}\right)_{Rg} = m\overrightarrow{G_T(M)} + m\overrightarrow{G_A(M)}$



Avec cette modélisation, en un point donné de la Terre, la mer est haute une fois par jour.
Or dans la réalité, en un point donné de la Terre, la mer est haute deux fois par jour.

L'erreur peut venir du fait que nous ayons considéré que le référentiel géocentrique était galiléen alors que le phénomène est étudié à l'échelle de la journée.

II-2- Prise en compte du caractère non galiléen du référentiel géocentrique

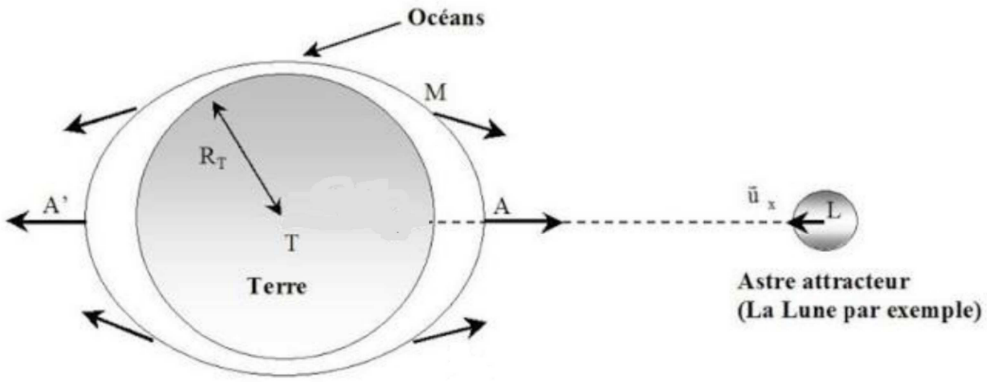
Une particule de fluide de l'océan de masse m située en M est soumise, dans le référentiel géocentrique non galiléen à deux forces supplémentaires :

- Force d'inertie de Coriolis : $\overrightarrow{F_{A/M}} = -2m\overrightarrow{\omega_{Rg/Rh}} \wedge \left(\overrightarrow{v_M}\right)_{Rg} = \vec{0}$ car le référentiel géocentrique Rg est en translation dans le référentiel héliocentrique Rh.
- Force d'inertie d'entraînement : $\overrightarrow{F_{T/M}} = -m\left(\overrightarrow{a_{MC}}\right)_{Rh} = -m\left(\overrightarrow{a_T}\right)_{Rh}$ car le référentiel géocentrique Rg est en translation dans le référentiel héliocentrique Rh.

Le P.F.D. appliqué à M s'écrit : $m\left(\overrightarrow{a_M}\right)_{Rg} = m\overrightarrow{G_T}(M) + m\sum\left(\overrightarrow{G_{Ai}}(M)\right) - m\left(\overrightarrow{a_T}\right)_{Rg}$
L'accélération de la Terre dans le référentiel héliocentrique peut être déterminée en effectuant un P.F.D. à la Terre dans ce référentiel : $m_T\left(\overrightarrow{a_T}\right)_{Rh} = m_T\sum\left(\overrightarrow{G_{Ai}}(T)\right)$

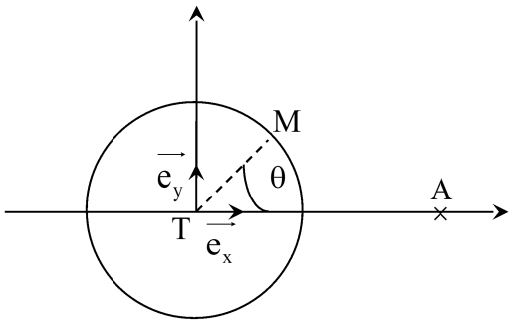
Le P.F.D. appliqué à la masse m d'eau s'écrit alors : $m\left(\overrightarrow{a_M}\right)_{Rg} = \underbrace{m\overrightarrow{G_T}(M)}_{\text{Attraction de la Terre}} + \underbrace{m\sum\left(\overrightarrow{G_{Ai}}(M) - \overrightarrow{G_{Ai}}(T)\right)}_{\text{Terme différentiel ou terme des marées dû à la prise en compte du caractère non galiléen du référentiel géocentrique}}$

Exemple avec la Lune pour l'astre A :



Avec cette modélisation, en un point donné de la Terre, la mer est haute deux fois par jour.

Calculons le terme différentiel relatif à un astre A dans la base cartésienne représentée sur le schéma ci-contre.
On veut exprimer ce terme en fonction de la position θ du point M représentant une masse d'eau élémentaire.
On considère TA > > R_T.



On obtient : $\boxed{\overrightarrow{\Delta G_A(M)} = \frac{Gm_A}{TA^3}\left(2R_T\cos\theta\vec{e}_x - R_T\sin\theta\vec{e}_y\right)}$

II-3- Explication du phénomène des marées océaniques

a- Comparaison des influences du Soleil et de la Lune

L'importance du terme des marées dépend de la masse m_A de l'astre et de sa distance TA par rapport à la Terre. On s'intéresse donc au Soleil (masse la plus importante du système solaire) et à la Lune (astre le plus proche de la Terre).

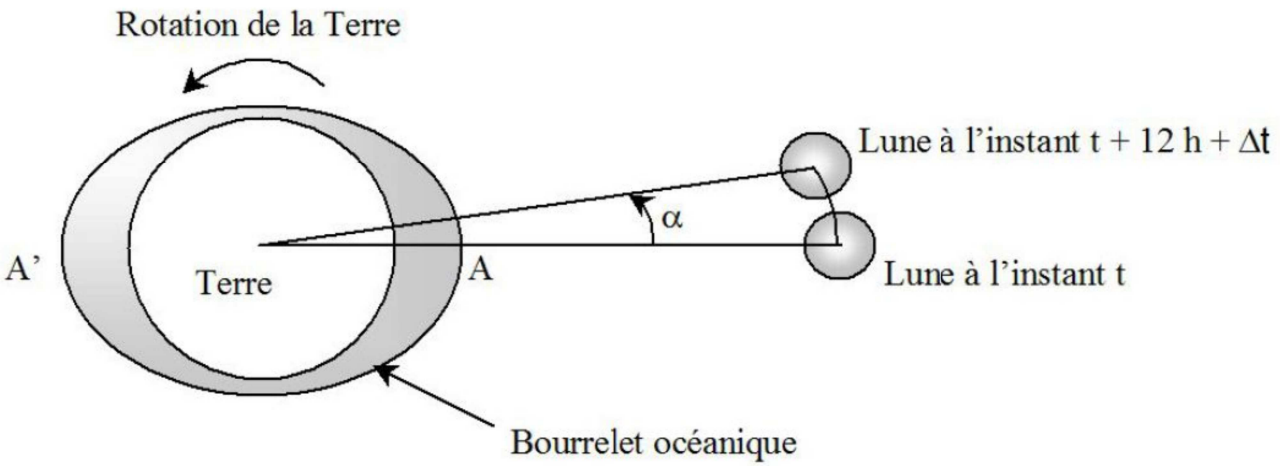
$$\frac{\left\|\overrightarrow{\Delta G_{Lune}(M)}\right\|}{\left\|\overrightarrow{\Delta G_{Soleil}(M)}\right\|} = \frac{m_L}{TL^3}\cdot\frac{TS^3}{m_S}$$

avec : $m_L = 7{,}4.10^{22}$ kg, $m_S = 2{,}0.10^{30}$ kg, TL de l'ordre 38.10^4 km, TS = 15.10^7 km.

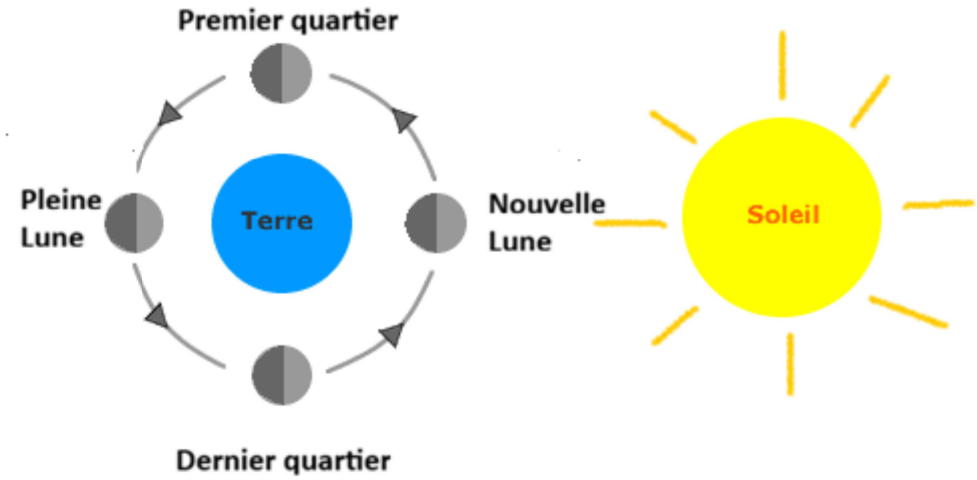
On constate donc que la Lune a un effet sur les marées deux fois plus important que le Soleil.

b- Influence de la Lune seule

On constate donc qu'en un point donné de la Terre, la mer est haute deux fois par jour, les marées hautes étant espacées de 12h.
On observe en réalité un décalage d'une cinquantaine de minutes entre deux marées hautes d'un jour à l'autre.
Cela est dû au fait que la Lune n'est pas immobile dans le référentiel géocentrique. Elle effectue dans ce référentiel une trajectoire circulaire autour de la terre de 27,3 jours dans le même sens que celui de la rotation de la Terre sur elle-même. Par conséquent, en une demi-journée, la Lune se déplace d'environ 6,5° dans le référentiel géocentrique.
Si en un point donné A de la Terre (face à la Lune) la mer est haute à 10h00, pour que la mer soit de nouveau haute, il faudra que la Terre effectue une demi-rotation additionnée de 6,5° pour que le point A considéré se retrouve de nouveau face à la Lune. Ces 6,5° sont parcourus en 26 minutes. La mer sera donc de nouveau haute aux environs de 22h30.



c- Influences conjuguées de la Lune et du Soleil



- A la pleine Lune et à la nouvelle Lune, les effets de la Lune et du Soleil s'additionnent ; on parle de marées de vives eaux.
- Aux premier et dernier quartier, leurs effets de retranchent ; on parle de mortes eaux.

Remarque : Les décalages observés entre ces prévisions théoriques et l'horaire des marées présenté ci-dessous sont principalement dus au fait que les orbites de la Terre, de la Lune et du Soleil ne sont pas coplanaires. Le plan de l'orbite lunaire est incliné d'environ 5° par rapport au plan de l'écliptique.

Grande marée - high tide

Mai - May

LUNE / MOON	JOUR / DAY		PLEINES MERS - HIGH TIDE				BASSES MERS - LOW TIDE	
			heure / hour	Coef	heure / hour	Coef	heure / hour	heure / hour
	1	J	07:59	89	20:13	82	01:57	14:15
	2	V	08:55	74	21:14	66	02:47	15:05
	3	S	10:24	58	23:03	51	03:41	16:02
◐	4	D	12:11	45	--:--	---	04:42	17:06
	5	L	00:37	42	13:26	40	05:52	18:19
	6	M	01:48	40	14:24	43	07:08	19:32
	7	M	02:45	46	15:09	50	08:16	20:35
	8	J	03:30	54	15:43	58	09:11	21:27
	9	V	04:02	62	16:09	65	09:56	22:10
	10	S	04:27	68	16:33	71	10:34	22:48
	11	D	04:51	73	16:58	75	11:08	23:22
○	12	L	05:17	76	17:26	76	11:40	23:55
	13	M	05:45	77	17:55	76	12:10	--:--
	14	M	06:13	76	18:25	74	00:28	12:42
	15	J	06:42	73	18:56	70	01:01	13:15
	16	V	07:13	68	19:32	65	01:36	13:50
	17	S	07:50	61	20:18	58	02:13	14:28
	18	D	08:38	54	21:20	50	02:55	15:12
	19	L	09:53	47	22:43	45	03:42	16:05
	20	M	11:37	44	--:--	---	04:38	17:09
◑	21	M	00:02	44	12:55	46	05:45	18:21
	22	J	01:11	49	13:57	54	06:57	19:30
	23	V	02:13	59	14:50	65	08:02	20:31
	24	S	03:09	71	15:38	77	09:01	21:28
	25	D	04:00	83	16:23	88	09:54	22:21
	26	L	04:47	92	17:06	94	10:44	23:13
●	27	M	06:20	96	17:50	97	11:33	--:--
	28	M	06:20	96	18:35	95	00:03	12:22
	29	J	07:07	92	19:22	89	00:53	13:10
	30	V	07:56	84	20:12	79	01:43	13:58
	31	S	08:49	74	21:08	69	02:33	14:49

Autres conséquences du phénomène des marées :

- La croûte terrestre se déforme elle aussi. Elle monte et descend de plusieurs dizaines de centimètres deux fois par jour. Ces déformations, minimes par rapport au rayon de la Terre (environ 6400 km) sont appelées marées terrestres.

- Des satellites en orbite autour d'une planète ou d'un astre très massif peuvent se briser sous l'effet des « forces de marée » s'ils se trouvent à une distance de l'astre inférieure à un distance limite appelée limite de Roche. La force de marée l'emporte alors sur les forces de gravitation internes.

- La dissipation d'énergie engendrée par le frottement des masses d'eau sur la croûte terrestre et par le moment de forces dû au terme différentiel des marées provoque le ralentissement de la rotation de la Terre sur elle-même (le jour augmente de 2 milliseconde par siècle) et l'éloignement de la Lune de la Terre (4cm par an).