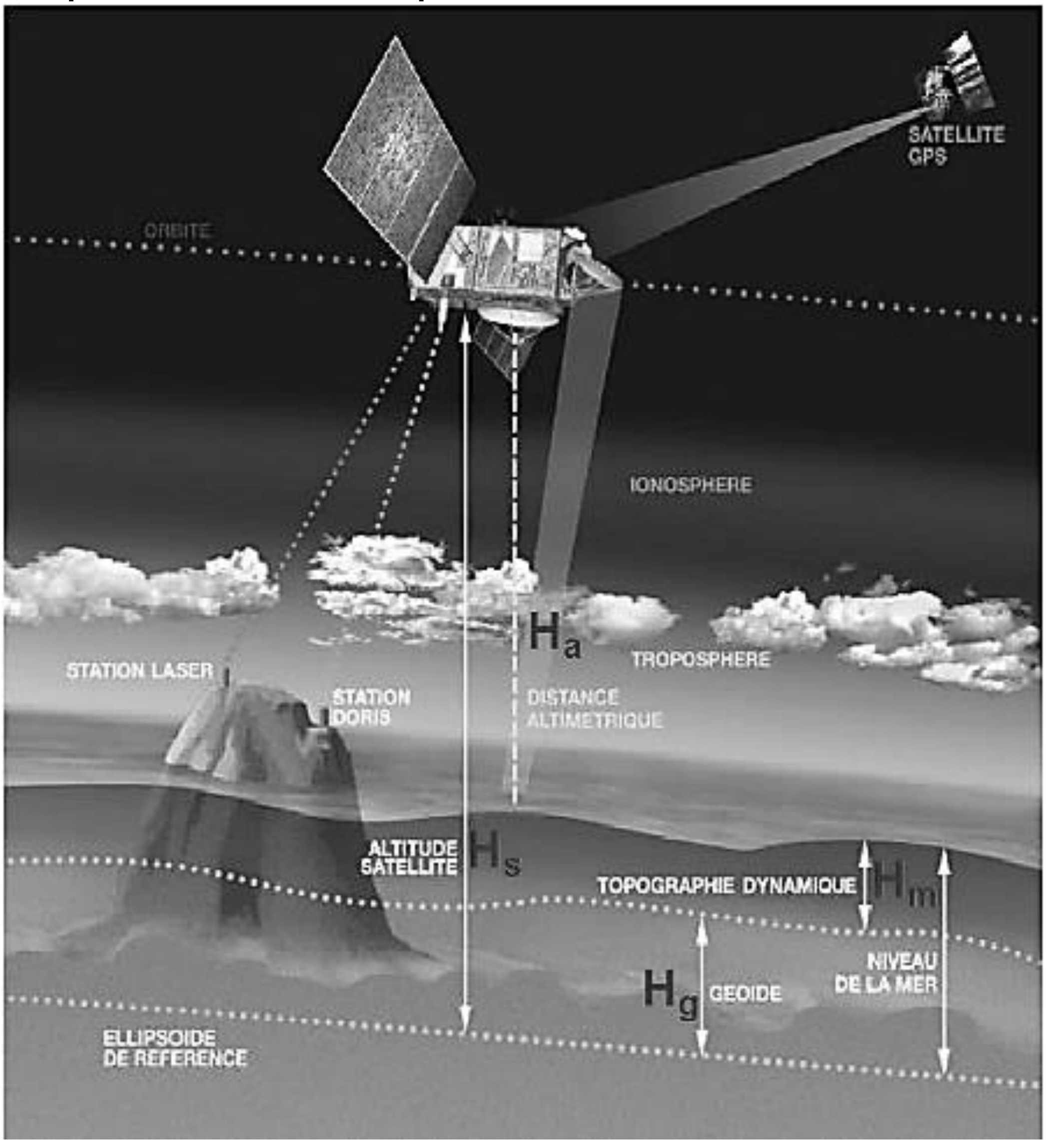
EXERCICE I. LES OCÉANS SOUS HAUTES SURVEILLANCES (6 points)

Les océanographes ne peuvent plus s'en passer. De quoi ? Des satellites Jason ! Ces satellites altimétriques initiés par le lancement de Topex-Poseidon en 1992 puis de Jason 1 en 2001 et Jason 2 en 2008 donnent une cartographie évolutive de la surface des océans avec une précision meilleure que 5 cm.
Jason 3 permettra d'assurer au moins jusqu'en 2020 la continuité de ces mesures, capitales dans le contexte du réchauffement climatique. En 2020 et 2026, deux autres satellites Jason le rejoindront sur la même orbite : Jason-CS-A/Sentinel-6A et Jason-CS-B/Sentinel-6B.

1. Principe de l'altimétrie radar par satellite



Un radar embarqué sur le satellite émet verticalement des ondes radio sous forme de brèves impulsions. On mesure alors le temps de retour de l'onde émise par le satellite après réflexion sur la surface de la mer.
L'écho de chaque impulsion est détecté et analysé à bord du satellite, ce qui conduit à une détermination précise de la distance « altimétrique », c'est-à-dire la distance H_a entre le satellite et le niveau de la mer.

1.1. Donner l'expression de la durée Δt d'un aller-retour du signal radar en fonction de la célérité c supposée constante des ondes envoyées par l'altimètre et de la distance H_a.

1.2. Les ondes émises et reçues par l'altimètre traversent un milieu qui n'est pas vide : certaines entités (atomes, molécules, ions...) présentes dans l'atmosphère peuvent ralentir la propagation des ondes et affecter les mesures. C'est le cas des électrons, très abondants vers 400 km d'altitude, de l'air sec et de la vapeur d'eau à plus basse altitude. Sur Jason, c'est le radiomètre AMR qui permet, à l'aide de mesures effectuées à trois fréquences, de connaître le délai induit par l'eau atmosphérique dans la propagation de l'onde radar de l'altimètre.

Soit Δt_1 la durée nécessaire à une onde radar de l'altimètre pour effectuer un aller-retour dans un nuage de type cumulonimbus de hauteur h = 2,0 km et d'indice moyen pour l'onde électromagnétique utilisée n_1 = 1,00032.
Soit Δt_2 la durée nécessaire à la même onde pour effectuer un aller-retour dans une colonne atmosphérique, dépourvue de nuage, de même hauteur h et d'indice moyen n_2 = 1,00029.
Les valeurs des indices n_1 et n_2 ont été obtenues à l'aide du radiomètre.

<u>Données</u>

L'indice d'un milieu transparent est défini par la relation $n = \frac{c}{v}$ avec :

- c : célérité des ondes électromagnétiques dans le vide, $c = 3{,}0.10^8$ m.s^{-1} ;
- v : célérité des ondes électromagnétiques radio dans le milieu d'indice n.

1.2.a. Montrer que le délai supplémentaire $\tau = \Delta t_1 - \Delta t_2$ induit par la traversée (aller et retour) d'un nuage vaut $\tau = \frac{2\,h}{c}(n_1 - n_2)$. Calculer τ.

1.2.b. Calculer la distance d en cm que l'onde électromagnétique radio parcourrait dans l'atmosphère dépourvue de nuage pendant cette même durée τ.
Conclure sur l'intérêt de l'utilisation du radiomètre.

2. Caractéristiques de l'orbite de Jason

« L'orbite du satellite Jason est choisie de façon à optimiser la répétition des mesures sur la plus grande partie possible de la surface du globe. L'altitude de 1336 km est assez élevée pour que le satellite ne soit plus sensible aux frottements dus au gaz atmosphérique résiduel, ni aux fluctuations de la gravité liées aux reliefs terrestres. La stabilité de l'orbite permet de situer avec précision la position du satellite, sa hauteur H_s et sa trace au sol en longitude et latitude. »
D'après « Les satellites Jason et la mesure du niveau des océans » Partenariat Eduscol- ENS Lyon

2.1. Représenter, sans souci d'échelle, sur la **figure 1 de l'*ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE*** la force, $\vec{F}_{T/S}$, modélisant l'interaction gravitationnelle exercée par la Terre sur le satellite supposé ponctuel et noté S (la répartition de masse de la Terre est supposée à symétrie sphérique).

2.2. Donner l'expression vectorielle de cette force en fonction de certaines données de l'énoncé et du vecteur unitaire $\vec{N}$ indiqué sur la figure 1 de l'annexe.

Données

- *Terre* *Masse : $M = 5,98 \times 10^{24}$ kg ; rayon : $R_T = 6,38 \times 10^3$ km*
  Période de rotation sur elle-même : T_T = 23h 56min 4s

- *Jason* *Masse : m = 510 kg ; altitude : H_s*
  Période de rotation autour de la Terre : T_J = 112 min

- *Constante gravitationnelle : G = 6,67×10-11 N.m^2 .kg^{-2}*

2.3. En considérant la seule action de la Terre, établir l'expression vectorielle de l'accélération $\vec{a}$ du satellite dans le référentiel géocentrique, supposé galiléen.

2.4. Montrer que, dans le cas d'un mouvement circulaire, dont on admettra sans démonstration qu'il est uniforme, la vitesse *V* du satellite a pour expression :

$$V = \sqrt{\frac{G\times M}{R_T+Hs}}$$

2.5. En déduire la valeur de la période de rotation T_S du satellite que l'on comparera à celle donnée dans l'énoncé.

3. Détermination précise de l'orbite

Une détermination très précise de la position du satellite en orbite est une des conditions essentielles de la qualité des données altimétriques. Le système DORIS (Détermination d'Orbites et Radio positionnement Intégré par Satellite), basé sur l'effet Doppler, contribue en partie à ce délicat exercice d'orbitographie.
Le système DORIS comporte environ 60 stations réparties uniformément sur tout le globe, chaque station se compose d'une balise émettrice, d'une antenne réceptrice et d'un jeu de capteurs météorologiques. Les balises émettent en continu des signaux de différentes fréquences dont l'une vaut f_0 = 401,250 MHz.

3.1. Compléter le **document 1 « principe de l'effet Doppler »** de l'***ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE*** en faisant l'analogie avec les ondes sonores.

3.2. La vitesse v d'un satellite est reliée à la fréquence f_0 de l'onde électromagnétique émise par la balise et à la fréquence de l'onde reçue par le satellite f_r par la relation

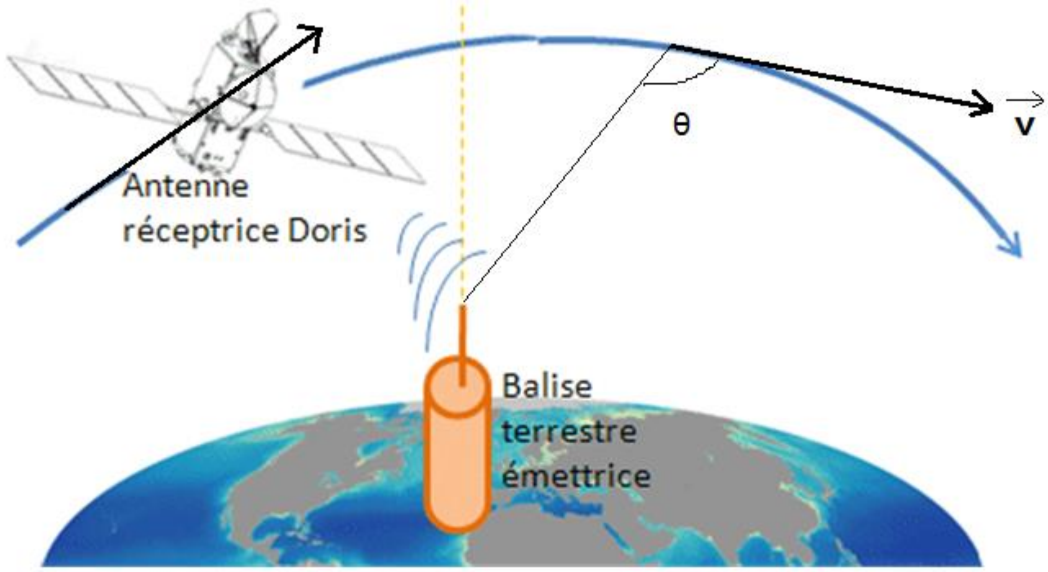
$$f_r = f_0 \left(1 + \frac{v \times \cos(\theta)}{c}\right)$$

avec :
- *c*, la célérité des ondes électromagnétiques
- θ, angle que fait le vecteur vitesse avec la direction balise satellite (voir **figure 2** ci-après).

3.2.a. Exprimer la vitesse v du satellite en fonction de la variation de fréquence
$\Delta f = f_r - f_0$, de f_0 , *c* et $\cos(\theta)$.

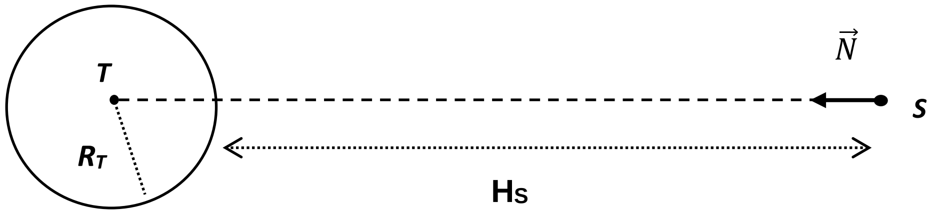
3.2.b. Calculer la valeur de la vitesse v du satellite en $km.s^{-1}$ pour une variation de fréquence $\Delta f =$ - 4,07 kHz et un angle θ = 115°.
Comparer cette valeur à celle que l'on peut calculer à l'aide de l'expression trouvée à la question **2.4.**

Figure 2



Annexe de l'exercice I

Figure 1



Document 1 « principe de l'effet Doppler »