EXERCICE I : La télémétrie LASER (7 points)

« Déterminer le champ de gravité de la Terre, mesurer le niveau des océans et des glaciers, suivre la tectonique des plaques, étalonner les instruments spatiaux, étudier la Lune et les planètes, et même tester la physique fondamentale, toutes ces tâches nécessitent des mesures précises de distance, qui se font par télémétrie laser (…)

En pratique, on mesure le temps de vol d'une impulsion lumineuse entre une station au sol et une cible placée sur le satellite dont on veut déterminer la distance. La station est constituée d'un laser pulsé, d'un dispositif de détection et de datation, et d'un télescope.
Le laser émet des impulsions lumineuses très brèves (20 picosecondes), d'une puissance instantanée fantastique. La plupart d'entre eux émettent une impulsion tous les dixièmes de seconde, soit une cadence de tir de 10 hertz, mais certaines atteignent des cadences de tir de quelques kilohertz.

La date de départ de l'impulsion est déterminée avec précision. La cible, équipée d'un réflecteur, renvoie le faisceau en direction de la station, laquelle détecte et date le faisceau de retour. La distance est déduite des différences entre les dates de départ et de retour des impulsions émises par la station et réfléchies par la cible. »

D'après Pour la Science, dossier n°53, octobre-décembre 2006, Arpenter l'espace à l'aide de lasers, Étienne SAMAIN ingénieur CNRS, Observatoire de la Côte d'Azur.

L'exercice aborde quelques problématiques en lien avec le travail réalisé par les ingénieurs et chercheurs de l'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA), situé sur le plateau de Calern, près de Grasse dans les Alpes-Maritimes.

Les documents utiles à la résolution sont rassemblés ci-dessous :

Document 1

*Le laser utilisé à l'OCA est un laser à Nd :YAG, constitué de cristaux de **G**renat artificiels d'**Y**ttrium et d'**A**luminium ($Y_3^{3+}Al_5^{3+}O_{12}^{2-}$) dopés par des ions **N**éo**d**yme. L'inversion de population, réalisée par pompage optique, concerne ces derniers ions.*

Ce laser émet une radiation lumineuse de longueur d'onde 1064 nm. Mais un dispositif permet de doubler la fréquence, de sorte qu'il émet à la sortie du télescope, une radiation de longueur d'onde λ = 532 nm dans le vide. La fréquence ν d'une radiation lumineuse et sa longueur d'onde λ étant liées par la relation $c = \lambda \cdot \nu$ où c, est la célérité de la lumière.

Un tir laser émet une centaine d'impulsions pendant une dizaine de secondes, chacune durant 20 ps. Chaque impulsion émet une énergie E = 200 mJ.

Document 2

À l'aide d'une horloge d'une très grande précision (Δt = 1ps ; 1 ps = 10^{-12} s), la durée d'un aller-retour d'une impulsion émise par le laser, peut être enregistrée et la distance Terre-Lune $d_{T\text{-}L}$ est alors calculée automatiquement.

Cinq réflecteurs, dont la surface réfléchissante est de l'ordre de s = 0,5 m^2, ont été déposés, en différents points de la surface de la Lune, par les missions américaines (Apollo) et russes (Lunokhod) entre 1969 et 1973.

Le tableau de mesures suivant, résume les données obtenues pour chaque impulsion reçue lors de tirs effectués entre le 27 et le 30 novembre 2002.

La célérité de la lumière utilisée pour le traitement des données, est celle dans le vide : c = 299 792 458 $m.s^{-1}$.

Date	Heure en h:min:ns	Durée aller-retour en 10^{-13} s	Distance Terre-Lune $d_{T\text{-}L}$ en km
27/11/2002	04:43:406393142	24648468652614	369471,25017
27/11/2002	04:54:289976746	24644665715165	369414,24557
27/11/2002	05:10:458205105	24640099593537	369345,80113
27/11/2002	05:22:292939394	24637681983003	369309,56206
27/11/2002	05:41:648936000	24635344034116	369274,51708
27/11/2002	05:50:391634635	24634858791318	369267,24348
27/11/2002	06:01:311809190	24634892052296	369267,74205
28/11/2002	04:54:343574407	24406472646587	365843,82129
29/11/2002	03:34:435933600	24286275303864	364042,10845
29/11/2002	04:43:255837213	24216009976909	362988,85770
29/11/2002	05:03:362399138	24199488939775	362741,21358
29/11/2002	05:59:835258680	24164440511979	?
29/11/2002	06:10:435854710	24159439560814	362140,88849
30/11/2002	04:23:300384145	24096826051427	361202,33560
30/11/2002	04:41:140039925	24077636963451	360914,69841
30/11/2002	04:57:401860390	24061517343433	360673,07138
30/11/2002	06:20:598907318	23994576785410	359669,65766
30/11/2002	06:35:333161641	23986483783787	359548,34662
30/11/2002	06:49:141460898	23979897636289	359449,62275

Origine : tableau de l'Observatoire de Côte d'Azur, https://www.oca.eu

Document 3

Tout faisceau lumineux diverge. À son départ, le faisceau laser a un diamètre D de deux mètres (…). La diffraction provoque donc une faible divergence, de un millionième de radian, soit un élargissement du faisceau de l'ordre du micromètre par mètre parcouru. Mais comme la distance Terre-Lune mesure la bagatelle d'environ 400 000 kilomètres, l'effet à l'arrivée est important.

La diffraction se produisant de la même façon pour le faisceau retour, on ne détecte qu'une infime partie de cette lumière réfléchie : environ 2×10^{-18} millijoule par impulsion envoyée.

D'après Pour la Science, dossier n°53, octobre-décembre 2006, La lumière, c'est combien de photons ?
Jean-Michel COURTY et Nicolas TREPS, Université Pierre et Marie Curie, Paris.

À l'aide de vos connaissances et des documents fournis, rédiger des réponses argumentées aux situations suivantes.

1. À propos du laser.

1.1. Montrer en utilisant la relation $c = \lambda \cdot \nu$ que doubler la fréquence permet de diviser par deux la longueur d'onde émise initialement par le laser.

1.2.

1.2.1. Indiquer une propriété particulière du laser pulsé.

1.2.2. Justifier l'affirmation d'Étienne SAMAIN : le laser émet des impulsions de puissance instantanée fantastique.

Données : La puissance p d'une impulsion est reliée à l'énergie E émise pendant la durée Δt d'une impulsion : $p = \dfrac{E}{\Delta t}$

1.3. Estimer le nombre de photons émis à chaque impulsion en direction de la Lune.
L'utilisation des valeurs numériques des grandeurs mises en jeu pour ce calcul n'est pas nécessaire ; une estimation à l'aide des ordres de grandeur de celles-ci sera privilégiée.

Données : L'énergie d'un photon est donnée par la relation :

$$e = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

où λ est la longueur d'onde de la radiation, c la célérité de la lumière dans le vide et *h la constante de Planck* ($h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J.s).

1.4.

1.4.1. À partir des informations fournies dans **le document 3**, calculer le rayon de la tache lumineuse obtenue sur la Lune. Il est conseillé de schématiser la situation.

1.4.2. Commenter les propos de Jean-Michel COURTY et Nicolas TREPS, quand ils écrivent que même si le faisceau émis possède une faible divergence, l'effet sur la Lune est important, en comparant le diamètre de la tache obtenue sur la Lune au diamètre initial D du faisceau laser.

2. À propos de la mesure de la distance Terre-Lune.

2.1.

2.1.1. Par quel calcul sont obtenues les distances Terre-Lune de la dernière colonne du tableau ? Expliciter celui manquant dans le tableau de mesures, puis calculer sa valeur, en se contentant de la précision de la calculatrice.

2.1.2. D'après le nombre de chiffres significatifs fournis par l'OCA dans ses fichiers de données, avec quelle précision la distance Terre-Lune est-elle mesurée actuellement ?

2.1.3. À votre avis, quel type d'horloge peut permettre d'atteindre une telle précision sur les durées de parcours des impulsions ?

2.2. Proposer deux hypothèses à considérer pour tenter d'expliquer les écarts observés sur la mesure de la distance Terre-Lune.