

**À lire avec soin avant de commencer :**

Les résultats doivent toujours être exprimés sous forme littérale avant d'en donner une application numérique (si elle est demandée) : aucun calcul semi-numérique n'est admis.  
 On demande d'encadrer les résultats littéraux et de souligner les résultats numériques pour les mettre en évidence.  
 De manière générale, il sera tenu compte dans la notation des qualités de présentation et de rédaction de la copie.  
Toutes les affirmations doivent notamment être justifiées avec précision.  
 La manipulation des unités dans les applications numériques est imposée.

## I – D'APRÈS AGRÉGATION EXTERNE PHYSIQUE 2023 (2,5 PTS)

**Preliminaire**

Dans tout le problème, les milieux considérés – qu'ils soient traversés par la lumière ou par une onde d'une autre nature – sont supposés linéaires, isotropes, transparents et non dispersifs. Leur indice de réfraction, ou indice optique, au point  $M$  est noté indifféremment  $n(M)$  ou  $n(\vec{r})$ .

**Q1.** Expliquer la signification de l'hypothèse de milieu *transparent* , puis rappeler la définition de l'indice optique  $n$  d'un tel milieu.

On cherche dans cette partie une explication du phénomène suivant, mirage optique spectaculaire :

 **The weirdest mirage you'll ever see: a ship floating high in the air**



• <https://theguardian.com/science/2021...tical-illusion>

**Walker 'stunned' to see ship hovering high above sea off Cornwall**

**Figure 1**

# I. Propagation d'une onde dans un milieu inhomogène

## I.A - Marche d'un rayon lumineux à travers un milieu stratifié

Dans le cadre du modèle géométrique de la lumière, la trajectoire suivie par l'énergie lumineuse est représentée par une courbe géométrique  $\mathcal{C}$  appelée rayon lumineux. On propose ici de construire géométriquement la marche d'un rayon lumineux au sein d'un milieu inhomogène stratifié, constitué de plusieurs couches homogènes, horizontales, de même épaisseur et contiguës (cf. FIGURE 2). Chaque couche horizontale est repérée par un entier  $i$  ( $i \in \mathbb{N}^*$ ) et caractérisée par son indice optique  $n_i$  supposé uniforme. On note  $\alpha_i$  l'angle que forme le rayon lumineux  $\mathcal{C}$  avec l'horizontale au sein de la  $i$ -ième strate.



FIGURE 2 – Schéma-modèle du milieu stratifié étudié.

**Q2.** Énoncer les lois de la réfraction qui permettent de construire la marche d'un rayon lumineux au sein du milieu stratifié. En déduire une relation entre les couples  $(n_1, \alpha_1)$  et  $(n_i, \alpha_i)$ .

**Q3.** Préciser les conditions dans lesquelles il est possible d'observer un phénomène de réflexion totale à l'interface entre deux strates successives.

**Q4.** Reproduire sur la copie la Figure 2, puis représenter la marche d'un rayon lumineux partant du point  $A_1$  qui représente la position réelle du bateau : on se placera donc dans la situation du mirage optique.

On précisera notamment sur la copie :

- si la suite des indices  $\{n_i\}$  est croissante ou décroissante ;
- la position de l'observateur (son œil) sur la figure reproduite.

On rédigera une explication finale claire, utilisant la notion d'image.

II – EXTRAIT ENAC PILOTES 2023 (7 PTS)

**Attention** : Même si cette épreuve est un QCM, toutes les réponses devront être justifiées sur la copie avec rigueur pour être validées : la preuve fournie doit idéalement aboutir à l'un des résultats donnés - au minimum, on pourra rédiger une preuve qui exclut sans ambiguïté trois parmi les quatre résultats donnés.

Partie 2 : Réglage d'un appareil photographique

Dans une version simplifiée, un appareil photographique est modélisé par une lentille (l'objectif) mince convergente  $\mathcal{L}$ , de vergence  $V = 10 \delta$ , à la distance de laquelle se trouve un écran (l'élément photosensible).

Les distances sont algébriques, le sens positif étant celui de la lumière incidente. Dans tout l'exercice, on admet que les conditions de Gauss sont satisfaites.

7. À quelle distance de la lentille doit se trouver l'écran si on veut photographier des objets très éloignés ?  
 A) 10 cm                      B) 1 cm                      C) 1 mm                      D) On ne peut rien dire *a priori*
8. Après avoir effectué la mise au point à l'infini, on souhaite photographier un objet  $A_o$ , supposé ponctuel, situé sur l'axe optique à 4,10 m de la lentille. Dans quel sens, et de quelle distance, faut-il déplacer l'écran afin de réaliser la mise au point ?  
 A) Il faut déplacer l'écran de 2,5 mm en le rapprochant de l'objectif.  
 B) Il faut déplacer l'écran de 2,5 mm en l'éloignant de l'objectif.  
 C) Il ne faut pas déplacer l'écran.  
 D) Il faut déplacer l'écran de 4 mm en l'éloignant de l'objectif.
9. La construction de l'appareil impose une distance maximale entre la lentille et l'écran de 10,5 cm. À quelle distance minimale  $d_m$  de la lentille doit se trouver  $A_o$  pour que celle-ci en donne une image nette  $A_i$  sur l'écran ?  
 A)  $d_m = 1$  m                      B)  $d_m = 10$  cm                      C)  $d_m = 2,1$  m                      D)  $d_m = 21$  cm
10. Pour caractériser la profondeur de champ de cet appareil, on tolère que l'image sur l'écran ne soit pas ponctuelle, mais forme une tache de diamètre  $D_t$  (Fig. 2). La tolérance recherchée ici s'obtient en considérant les objets  $A_o$  et  $A'_o$ , situés sur l'axe optique, dont les images conjuguées, respectivement  $A_i$  et  $A'_i$ , fixent la valeur de  $D_t$  (Fig. 2). Sur cette figure, et parmi les propositions ci-dessous,  $D_o$  désigne le diamètre de la lentille et  $e$  la distance maximale à laquelle on peut éloigner l'écran au-delà du foyer image de la lentille.

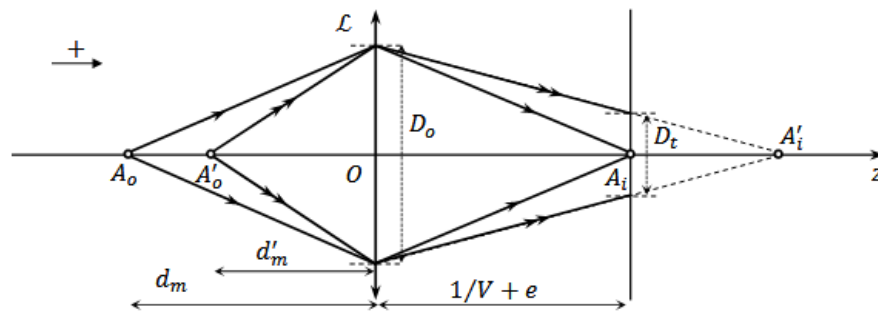


Fig. 2 - Modélisation d'un appareil photographique

Quelle est, en fonction de  $D_o$ ,  $D_t$ ,  $V$  et  $e$  l'expression de la distance  $\overline{A_i A'_i}$  ?

- A)  $\overline{A_i A'_i} = D_t \frac{1/V+e}{D_o-D_t}$       B)  $\overline{A_i A'_i} = D_t \frac{1/V-e}{D_o-D_t}$       C)  $\overline{A_i A'_i} = -D_t \frac{1/V+e}{D_o-D_t}$       D)  $\overline{A_i A'_i} = D_t \frac{1/V-e}{D_o+D_t}$

11. En déduire l'expression de  $d'_m$ .

- A)  $d'_m = \frac{D_o(e+1/V)}{D_t+D_oVe}$       B)  $d'_m = \frac{D_o(e+1/V)}{D_t-D_oVe}$       C)  $d'_m = \frac{D_t(e+1/V)}{D_t+D_oVe}$       D)  $d'_m = \frac{D_t(e+1/V)}{D_o+D_tVe}$

12. Comment varie  $d'_m$  si on modifie  $D_o$  ?

- A)  $d'_m$  diminue si  $D_o$  diminue.      C)  $d'_m$  augmente si  $D_o$  diminue.  
 B)  $d'_m$  diminue si  $D_o$  augmente.      D) On ne peut rien dire *a priori*.

### III – OPTIMISATION DE L'ENCOMBREMENT D'UN APPAREIL PHOTOGRAPHIQUE (8 PTS)

On désire photographier la Lune en prenant une photographie de grande dimension : on souhaite dans tout le problème que la dimension de l'image de la Lune sur le détecteur soit  $h = |A'B'| = A'B' = 15 \text{ mm}$ .

L'image occupera ainsi une bonne partie du détecteur de dimension 24mm x 36mm. Dans ce problème, la dimension des pixels constituant le détecteur est négligée.

La Lune a un diamètre  $D_L = 3440 \text{ km}$  et se trouve à la distance  $D_{TL} = 367000 \text{ km}$  de la Terre : on peut donc légitimement la supposer à l'infini du point de vue de l'optique.

L'objet à l'infini correspondant  $AB$  est tel que  $A$ , sur l'axe optique, correspond au bas du disque lunaire, et  $B$  au haut du disque :



#### A/ Modélisation de l'objectif par une lentille mince unique L1

En s'appuyant sur un schéma de principe et en justifiant les affirmations :

1. Calculer (littéral d'abord) en radian et en degré l'angle orienté  $\alpha$  entre l'axe optique et les rayons émis par le point  $B_\infty$ .
2. Calculer la focale de la lentille  $f'_1$  de l'objectif. Conclure sur l'encombrement (distance lentille détecteur) de l'appareil photographique.
3. En réalité, pour obtenir une image de la Lune centrée dans le détecteur, le point  $A$  sur l'axe optique est le centre de la Lune, et l'objet est symétrique par rapport à l'axe optique : on peut le noter  $B_1B_2$ , où  $B_1$  est le haut du disque lunaire.

Exprimer rigoureusement l'angle orienté  $\beta$  entre les rayons émis par  $B_{2,\infty}$  et ceux émis par  $B_{1,\infty}$ , en fonction de  $D_L$  et  $D_{TL}$ . Quelle est la relation entre  $\alpha$  et  $\beta$  dans les conditions de Gauss ?

#### B/ Optimisation par ajout d'une lentille L3 : constructions graphiques

On souhaite, tout en gardant identique la dimension de l'image, ramener l'encombrement à la valeur encore élevée mais bien plus raisonnable  $L = 50 \text{ cm}$ .

Pour ce faire, on place derrière la première lentille une deuxième lentille L3 de focale  $f'_3$ , à une distance notée  $e$  de celle-ci.

Par ailleurs, on doit changer (sans la déplacer) la première lentille pour avoir le comportement souhaité : on la nomme L2, de focale  $f'_2$ .

Le schéma optique, que l'on devra compléter, est sur **l'annexe à rendre avec la copie**. C'est un schéma de principe, les échelles de distance ne sont pas du tout respectées : on ne pourra donc pas obtenir une valeur correcte des focales utilisées par de simples mesures sur le graphique une fois la construction terminée.

On note  $A_i B_i$  l'image de la Lune par la première lentille.

Dans toutes les constructions, **on respectera avec soin les conventions de l'optique**. Toutes les justifications demandées devront être fournies **sur la copie**.

1. Écrire le diagramme de conjugaison.
2. Compléter le rayon fléché une fois et en déduire en justifiant la nature de la lentille L3. Compléter son symbole sur le schéma.
3. Expliquer pourquoi le rayon fléché deux fois, passant par le centre optique de la lentille L3, n'est pas dévié par la lentille. On ne cherchera pas à construire l'incident correspondant (sur L2).
4. Construire l'image intermédiaire  $A_i B_i$  à l'aide des rayons donnés et/ou construits.
5. Construire la partie du rayon fléché trois fois située entre les deux lentilles (rayon incident sur L3) et en déduire par construction un point caractéristique de L3, qu'on nommera sur la copie.
6. Placer le foyer principal image de la première lentille, avec une notation correcte pour ce point. Justifier.

On voit que  $L$ ,  $h$  et  $\alpha$  étant fixés, les focales des lentilles dépendent de la distance  $e$ , que l'on peut choisir librement entre 0 et  $L$ .

### C/ Optimisation par ajout d'une lentille L3 : calculs

On s'appuie maintenant sur la construction finalisée pour déterminer, par le calcul, les caractéristiques des deux lentilles qu'il faut utiliser pour atteindre le but recherché.

1. En s'appuyant sur le diagramme de conjugaison écrit à la question B/1., donner la définition du grandissement  $\gamma_3$  de la conjugaison faite par la lentille L3.  
Donner son expression, ainsi que la relation de conjugaison, dites de Descartes, donc en fonction de distances algébriques par rapport au centre optique  $O_3$ .
2. Démontrer que la focale  $f'_2$  vérifie l'équation suivante :  $\alpha f'_2 = -\frac{f'_2 - e}{L - e} h$ , où  $\alpha$  est l'angle, très petit, a été défini à la partie A.
3. Déduire de cette expression  $f'_2$  en fonction des autres données.
4. Obtenir, après l'avoir définie, l'expression de la vergence  $V_3$  de la lentille L3, en fonction de  $f'_2$ ,  $L$  et  $e$ .
5. Applications numériques pour  $e = \frac{L}{2}$  : calculer avec des unités pertinentes  $f'_2$ ,  $V_3$ , et la focale  $f'_3$ .

### IV – BASES DE L'ÉLECTRICITÉ : APPLICATION DU COURS (3,5 PTS)

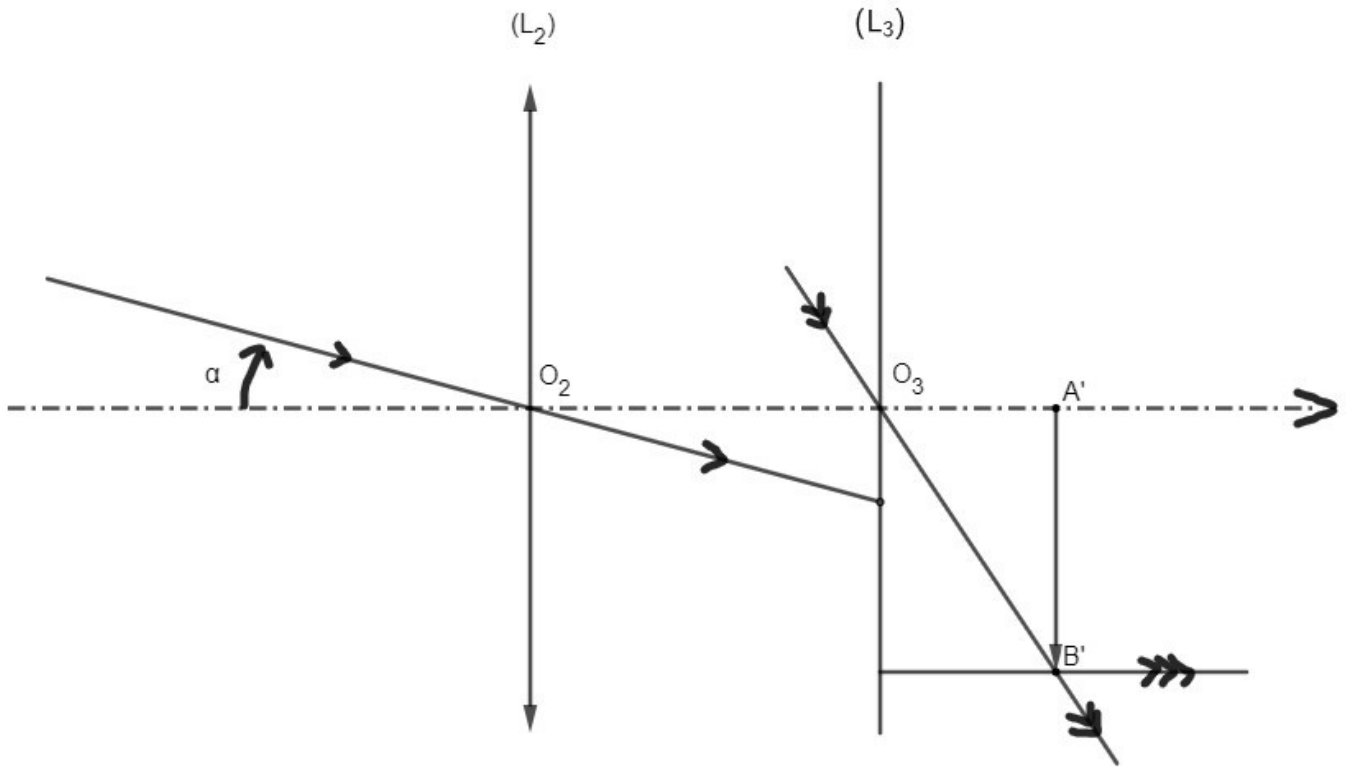
Dans le circuit schématisé en **annexe**, les dipôles représentés par des cercles sont des générateurs, tous les autres dipôles sont des récepteurs.

1. Après avoir énoncé la forme générale de la loi des nœuds, l'appliquer au circuit en annexe.
2. Compléter le circuit de l'annexe pour flécher toutes les tensions en accord avec les conventions de l'électricité. On les nommera avec un indice entier  $k$  :  $U_k$ , où  $k \geq 1$ .
3. Obtenir, en rédigeant avec soin et en complétant éventuellement l'annexe, toutes les relations **indépendantes** existant entre les différentes tensions.
4. Démontrer l'expression générale de la puissance  $P$  reçue par un dipôle en fonction de l'intensité  $i$  qui le traverse et de la tension  $u$  à ses bornes.

**FIN**

ANNEXE À RENDRE AVEC LA COPIE      **NOM, PRÉNOM :**

**Partie III-B :**



**Partie IV :**

