



IPhO 2026 - Terminale

Sciences à l'École

Épreuve de présélection française



25 mars 2026

Durée de l'épreuve : 3 heures

Calculatrice autorisée

L'épreuve comporte quatre parties différentes et indépendantes les unes des autres, dont la nature et les temps de traitement conseillés sont donnés dans le tableau ci-dessous :

		Temps conseillé
PARTIE A	QCM	1 heure
PARTIE B	1 ^{er} exercice	30 minutes
PARTIE C	2 ^{ème} exercice	30 minutes
PARTIE D	Problème	1 heure

CONSIGNE pour la rédaction

*Les réponses sont à rédiger sur les feuilles d'énoncé, dans les emplacements prévus.
Si le candidat a besoin de feuilles supplémentaires, il utilisera les feuilles vierges fournies dont les en-têtes doivent être impérativement complétés.*

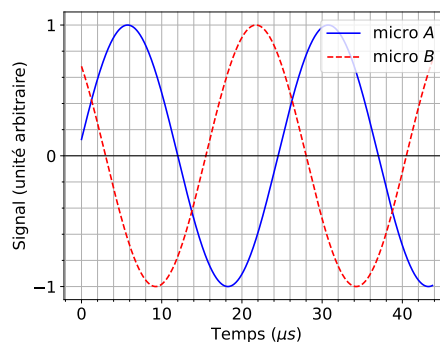
IMPORTANT

*Toutes les feuilles à rendre doivent comporter le nom, le prénom,
et le lycée du candidat.
Tout oubli pourra entraîner l'absence de correction de la feuille concernée.*

Données générales pour l'ensemble de l'épreuve

Nom	Symbole	Valeur
Célérité de la lumière dans le vide	c	299 792 458 m·s ⁻¹
Constante de Planck	h	6,626 × 10 ⁻³⁴ J·s
Charge élémentaire	e	1,602 × 10 ⁻¹⁹ C
Électron-volt	1 eV	1,602 × 10 ⁻¹⁹ J
Énergie d'ionisation de l'atome d'hydrogène dans son état fondamental	E_H	13,6 eV
Perméabilité magnétique du vide	μ_0	1,257 × 10 ⁻⁶ H·m ⁻¹
Permittivité diélectrique du vide	ϵ_0	8,854 × 10 ⁻¹² F·m ⁻¹
Constante gravitationnelle	G	6,675 × 10 ⁻¹¹ m ³ ·kg ⁻¹ ·s ⁻²
Accélération de la pesanteur à la surface de la Terre	g_0	9,81 m·s ⁻²
Température du point triple de l'eau	T_0	273,16 K ou 0,01 °C
Constante d'Avogadro	N_A	6,022 × 10 ²³ mol ⁻¹
Masse du proton	m_p	1,673 × 10 ⁻²⁷ kg
Masse du neutron	m_n	1,675 × 10 ⁻²⁷ kg
Masse de l'électron	m_e	9,109 × 10 ⁻³¹ kg
Constante de Boltzmann	k ou k_B	1,381 × 10 ⁻²³ J·K ⁻¹
Constante des gaz parfaits	R	8,314 J·K ⁻¹ ·mol ⁻¹
Distance Terre-Soleil	d_{TS}	1,499 × 10 ⁸ km
Masse du Soleil	M_S	1,989 × 10 ³⁰ kg
Rayon de la Terre	R_T	6,4 × 10 ³ km
Masse de la Terre	M_T	5,974 × 10 ²⁴ kg
Masse volumique de l'air	ρ_a	1,20 kg·m ⁻³ à $T = 20$ °C et $P = 1,0 \times 10^5$ Pa
Masse molaire moyenne de l'air	M	28,96 g·mol ⁻¹
Masse volumique de l'eau	ρ_e	1,00 × 10 ³ kg·m ⁻³

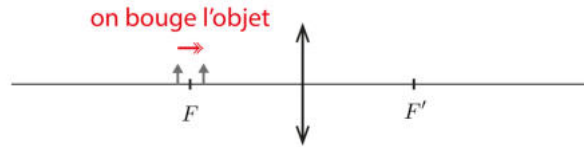
- Q4.** En mélangeant un volume d'eau froide sorti du réfrigérateur ($T_{\text{froide}} = 10\text{ °C}$) et un volume d'eau bouillante, on cherche à obtenir un verre de 200 mL d'eau à une température idéale pour infuser notre thé. Le mélange homogène est réalisé dans un thermos, dont on suppose qu'il est hermétique et calorifugé, et on néglige la capacité thermique du thermos. Quel volume d'eau bouillante faut-il utiliser pour que le thé vert qui sera mis dans le thermos soit infusé à une température de 70 °C ?
- (a) 133 mL; (c) 67 mL;
 (b) 100 mL; (d) 18 mL.
- Q5.** La pression absolue dans les pneus d'une voiture de course est 280 kPa un matin d'hiver, quand la température est 7 °C . Après quelques tours de la piste d'entraînement, la température des pneus monte à 47 °C . On suppose que le volume des pneus est constant et qu'il n'y a pas de fuite. Quelle est la pression absolue dans les pneus après l'entraînement ?
- (a) 245 kPa; (c) 320 kPa;
 (b) 280 kPa. (d) 1880 kPa;
- Q6.** On s'intéresse à un échantillon de bois, issu d'un sarcophage de momie égyptienne. L'activité du ^{14}C dans le sarcophage est estimée à $0,14\text{ Bq/g}$ alors que celle d'un bois vivant est de $0,23\text{ Bq/g}$. Le temps de demi-vie du ^{14}C est de $5,7 \times 10^3$ ans. Le bois de ce sarcophage a été coupé il y a combien d'années ?
- (a) $3,5 \times 10^3$ ans; (c) $6,2 \times 10^3$ ans;
 (b) $2,8 \times 10^3$ ans; (d) $4,1 \times 10^3$ ans.
- Q7.** On considère un faisceau laser de longueur d'onde $\lambda = 0,53\text{ }\mu\text{m}$, de puissance 1,0 kW, avec un diamètre angulaire de $5,0\text{ }\mu\text{rad}$. Ce faisceau pointe la Lune. La distance Terre-Lune est de $3,8 \times 10^8\text{ m}$. Quel est le nombre maximum de photons qui arrivent sur la Lune par seconde et par mètre carré ?
- (a) 10^{15} ; (c) 10^{10} ;
 (b) 10^{28} ; (d) 10^5 .
- Q8.** La même onde ultrasonore de longueur d'onde $3,75\text{ cm}$ est captée par deux microphones. Le microphone A est plus près de la source du son que le microphone B. On suppose que l'onde se propage sans atténuation.



Quelle distance entre les deux microphones est possible ?

- (a) 12 mm; (c) 38 mm;
 (b) 24 mm; (d) 0 m.

Q9. Lorsqu'on déplace un objet d'une position située légèrement en amont du foyer principal objet F d'une lentille convergente à une position située légèrement en aval (voir figure), l'image est _____ et _____, puis devient _____ et _____.



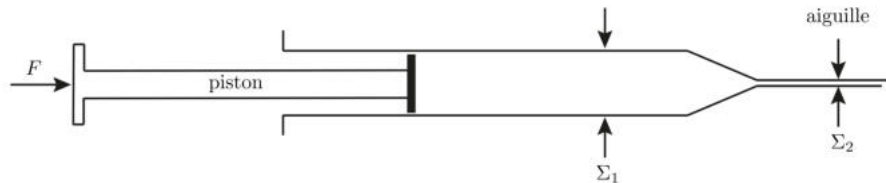
Identifier les caractéristiques qui complètes correctement cette phrase :

- | | |
|--|---|
| (a) agrandie ; renversée ; agrandie ; droite ; | (c) agrandie ; renversée ; réduite ; droite ; |
| (b) agrandie ; droite ; agrandie ; renversée ; | (d) réduite ; droite ; réduite ; renversée. |

Q10. Un boulet de canon en fer de diamètre 20 cm est retrouvé au fond de la mer Méditerranée. Quelle est l'estimation de la force nécessaire pour le soulever jusqu'à la surface de l'eau ? La masse volumique du fer est $7,5 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$.

- | | |
|-------------|-------------|
| (a) 40 N ; | (c) 310 N ; |
| (b) 270 N ; | (d) 2100 N. |

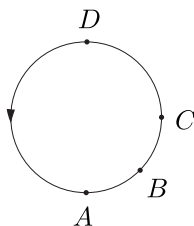
Q11. On remplit une seringue d'un fluide de masse volumique ρ , considéré comme un fluide parfait incompressible. On modélise cette seringue comme un cylindre de section transversale Σ_1 , qui se rétrécit progressivement en une aiguille de section transversale $\Sigma_2 \ll \Sigma_1$. La seringue est maintenue immobile et à l'horizontale par un opérateur extérieur.



Le piston est poussé lentement vers l'intérieur de la seringue par une force F horizontale, de sorte que le piston se déplace à une vitesse constante v . On considère que le jet d'eau qui sort de l'aiguille est horizontal. Dans un écoulement parfait, incompressible, stationnaire, d'un fluide homogène évoluant dans le champ de pesanteur, la quantité $P/\rho + v^2/2 + gz$ est une constante le long d'une ligne de courant (d'après le théorème de Bernoulli). Quelle expression de F est correcte ?

- | | |
|--|---|
| (a) $F = \frac{\rho \Sigma_1}{2} \left(\frac{\Sigma_1 v}{\Sigma_2} \right)^2 ;$ | (c) $F = \frac{\rho \Sigma_2}{2} v^2 ;$ |
| (b) $F = \frac{\rho \Sigma_1}{2} v^2 ;$ | (d) $F = \frac{\rho \Sigma_1}{2} v^2 \frac{\Sigma_1}{\Sigma_2} .$ |

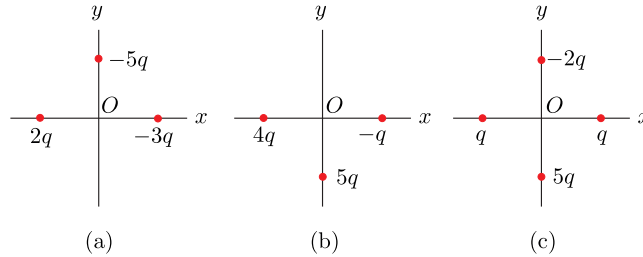
Q12. Un enfant court en cercle dans le sens anti-horaire, tel qu'illustré sur le schéma ci-dessous. Son grand-père est assis au point S et siffle une note.



En quel point de sa trajectoire l'enfant entend-il le son le plus aigu ?

- (a) A; (c) C;
 (b) B; (d) D.

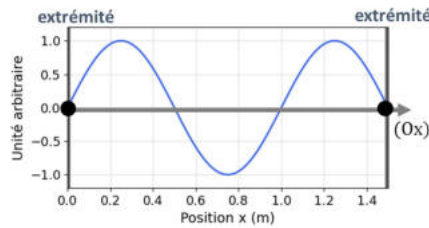
Q13. Les figures ci-dessous montrent 3 configurations possibles de particules chargées. Toutes les particules sont situées à la même distance de l'origine. La charge de chaque particule est un multiple d'une charge notée q .



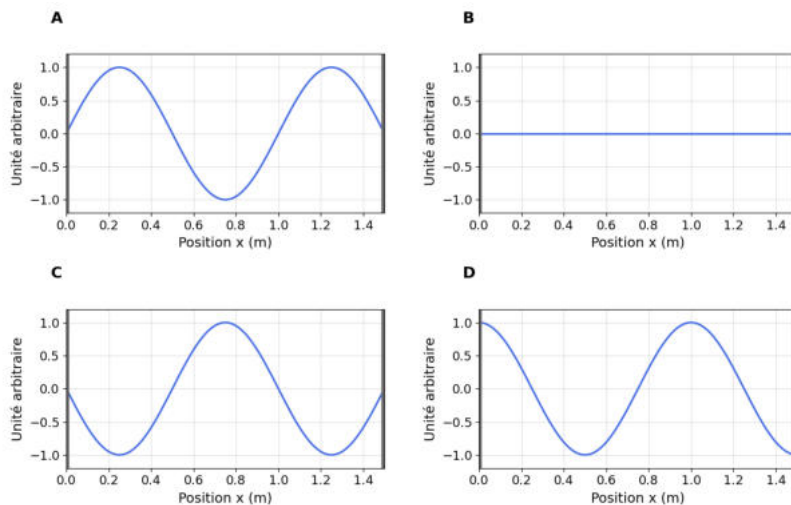
Dans quelles situations le module du champ électrique à l'origine O est-il le plus faible ?

- (a) Figure (a); (c) Figure (c);
 (b) Figure (b); (d) Le module du champ est identique dans toutes les configurations.

Q14. On photographie une onde stationnaire, le long d'une corde fixée à deux extrémités fixes, placées en $x = 0$ et $x = 1,5$ m. La corde vibre à la fréquence de 100 Hz. La figure suivante donne une représentation spatiale de la corde à l'instant t .



Quelle figure représente la corde à l'instant $t + 60$ ms ?

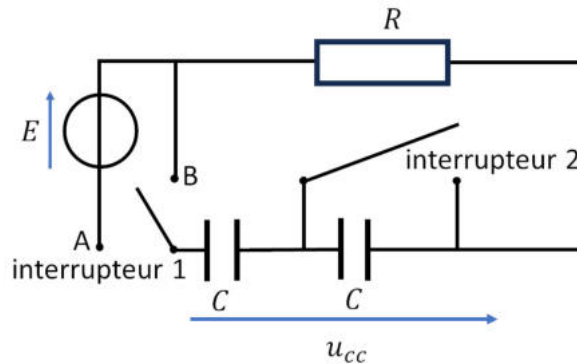


- (a) graphique A; (c) graphique C;
 (b) graphique B; (d) graphique D.

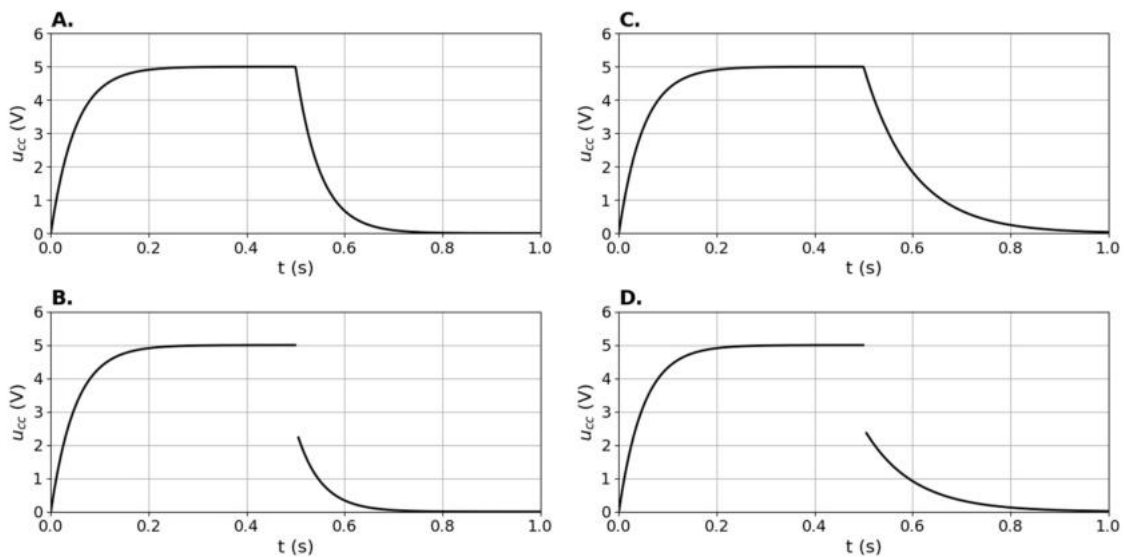
Q15. On considère un circuit électrique qui comprend un générateur de tension continue $E = 5 \text{ V}$, deux condensateurs identiques, une résistance et deux interrupteurs.

Initialement, l'interrupteur 2 est ouvert, l'interrupteur 1 est en position B et les deux condensateurs sont déchargés. À l'instant $t = 0$, on bascule l'interrupteur 1 en position A et l'interrupteur 2 reste ouvert. À l'instant $t = 0,5 \text{ s}$, on bascule l'interrupteur 1 en position B et l'interrupteur 2 est fermé.

L'association en série de deux condensateurs de capacité C est équivalente à un condensateur de capacité $C/2$.



Quel graphique ci-dessous correspond à l'évolution de la tension aux bornes des deux condensateurs, notée u_{CC} sur le schéma ?



- (a) graphique A;
- (b) graphique B;

- (c) graphique C;
- (d) graphique D.

Fin de la partie A



Partie A

QCM — document réponse

Durée conseillée : 1 heure.

Pour chaque question, **entourer** la réponse de son choix sur ce document.
Il n'y a qu'une réponse correcte par question.

Q1. (a) (b) (c) (d)

Q2. (a) (b) (c) (d)

Q3. (a) (b) (c) (d)

Q4. (a) (b) (c) (d)

Q5. (a) (b) (c) (d)

Q6. (a) (b) (c) (d)

Q7. (a) (b) (c) (d)

Q8. (a) (b) (c) (d)

Q9. (a) (b) (c) (d)

Q10. (a) (b) (c) (d)

Q11. (a) (b) (c) (d)

Q12. (a) (b) (c) (d)

Q13. (a) (b) (c) (d)

Q14. (a) (b) (c) (d)

Q15. (a) (b) (c) (d)

Fin de la partie A

Partie B

Exercice 1

Orage ! Ô désespoir !

Durée conseillée : 30 minutes.

Les éclairs sont parmi les phénomènes naturels les plus violents observables sur Terre. Ces phénomènes spectaculaires peuvent être approchés par des mécanismes simples : une charge lente du nuage, un claquage brutal de l'air, puis une décharge rapide de foudre dans un canal de plasma.

Un plasma est un gaz ionisé – composé d'ions et d'électrons libres – globalement neutre et de forte conductivité électrique.

Le nuage d'orage, l'air et le sol : analogie électrocinétique

Lors d'un orage, les mouvements internes du cumulonimbus (nuage d'orage) séparent progressivement les charges électriques et créent une différence de potentiel importante entre le nuage et le sol. On modélise cet ensemble comme les deux armatures d'un condensateur plan de capacité C (voir figure 1). On note $V(t)$ la tension à ses bornes. L'air situé entre le nuage et le sol, relativement isolant, est quant à lui assimilé à une résistance R .



FIGURE 1 – Identification du condensateur.
Source : NOAA

La face inférieure du nuage et le sol sont assimilés aux deux armatures d'un condensateur plan :

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

où $d = 1 \text{ km}$ est l'altitude du bas du nuage, $A = 10 \text{ km}^2$ sa superficie et $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ la permittivité diélectrique de l'air (supposée égale à celle du vide). La résistance de l'air situé entre le nuage et le sol est assimilée à

$$R = \frac{\rho d}{A}$$

avec $\rho \approx 10^{15} \Omega \cdot \text{m}$ la résistivité de l'air.

Q1. Vérifier l'homogénéité des expressions de la capacité C et de la résistance R . Déterminer les ordres de grandeur de C et R .

Les mouvements d'air et les collisions de particules de glace à l'intérieur du cumulonimbus entretiennent la séparation des charges électriques, résultant en une accumulation de charges négatives au niveau du bas du nuage et de charges positives en haut du nuage. On modélise ce phénomène par un courant constant d'intensité $I \approx 1 \text{ A}$ à l'intérieur du nuage. Le schéma équivalent de l'ensemble {nuage, air, sol} est représenté sur la figure 2.

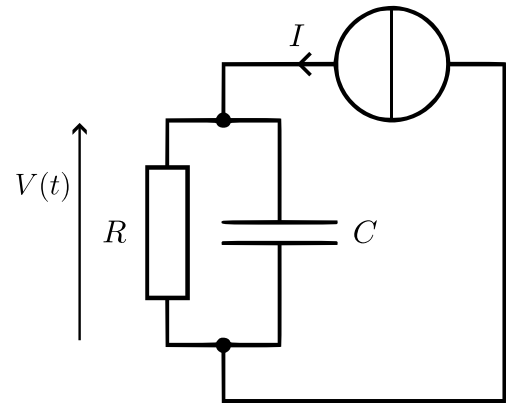


FIGURE 2 – Modèle RC du système composé du nuage, de l'air et du sol.

Q2. Déterminer l'équation différentielle sur la tension $V(t)$, puis sur $u(t) = RI - V(t)$, faisant intervenir les grandeurs R et C supposées constantes. La résoudre pour trouver l'expression de $V(t)$, en supposant qu'initialement le nuage est déchargé.

Formation des éclairs

Lorsque l'intensité du champ électrique, supposé uniforme dans le domaine entre le sol et le nuage, dépasse $E^* \approx 3 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$, l'air situé dans ce domaine s'ionise (passage à l'état de plasma), permettant le passage des charges. Il en résulte une chute brusque de la résistance de l'air entre le sol et le nuage.

Q3. Donner l'expression de la tension V^* nécessaire pour provoquer un éclair. Faire l'application numérique.

On suppose toujours le condensateur initialement déchargé.

Q4. Comparer les ordres de grandeur des tensions V^* et RI . En déduire que l'on peut simplifier l'équation différentielle sur $V(t)$ obtenue à la question 2. Établir un ordre de grandeur de la durée caractéristique τ_c au bout de laquelle l'éclair survient, en fonction des grandeurs C , V^* et I supposées constantes. Faire l'application numérique.



Lors du passage de l'éclair, la résistance R^* de l'air ionisé chute brusquement. La résistance linéique est alors de l'ordre de $0,1 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$.

Q5. Évaluer l'ordre de grandeur de la durée τ_e d'un éclair.

Q6. Comparer les deux temps caractéristiques calculés. En déduire que, si I est constant, la décharge des orages se comporte comme un oscillateur. Donner la période T de ces oscillations.

Oscillations du courant

Des mesures effectuées au sommet d'une tour météorologique en métal ont montré qu'à l'impact de l'éclair, le courant qui traverse la tour présente des oscillations à haute fréquence. Le signal expérimental d'une mesure de ces oscillations du courant de foudre est représenté sur la figure 3.

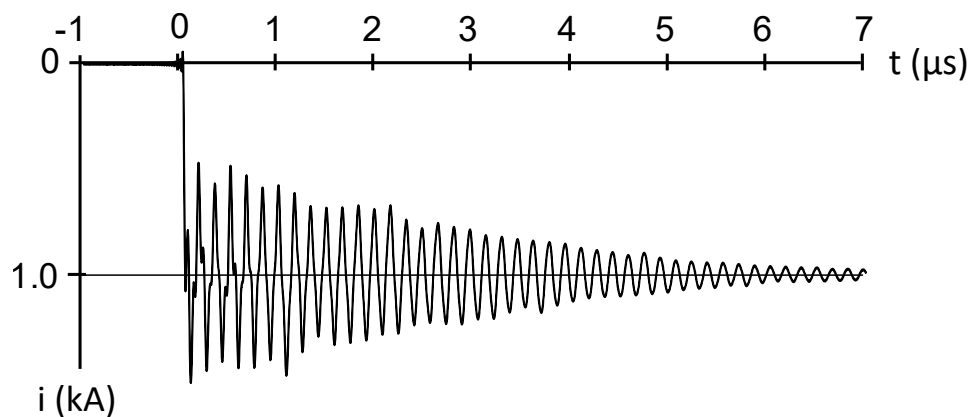


FIGURE 3 – Signal expérimental. Mesure du courant de foudre au sommet d'une tour.

Adapté de F. Heidler and K. Stimper, "On the origin of the lightning current oscillation measured at the Peissenberg Tower, Germany," 2016.

On cherche ici à déterminer l'origine physique de ces oscillations. On souhaite tout d'abord tester l'hypothèse suivant laquelle l'air sous le nuage présente également une inductance L (en série avec la résistance R^*), qui aurait

été négligée dans la modélisation précédente. Le modèle électrique utilisé serait alors un circuit R^*LC (voir figure 4). Dans ce cas, l'intensité $i(t)$ obéit alors à l'équation d'un oscillateur amorti de pulsation propre $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$. On suppose toujours R^* , L , C et I constants.

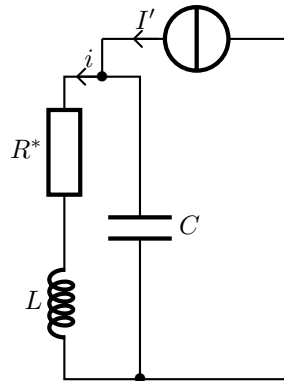


FIGURE 4 – Modèle R^*LC du système composé du nuage, de l'air et du sol.

Q7. Mesurer la fréquence du courant de foudre et en déduire un ordre de grandeur de l'inductance L .

Pour l'oscillateur faiblement amorti, le facteur de qualité $Q = \sqrt{L/C}/R^*$ est environ égal au nombre d'oscillations observables.

Q8. Proposer une première estimation du facteur de qualité Q basée sur le nombre d'oscillations du signal expérimental de la figure 3. En déduire l'ordre de grandeur de l'inductance L associée compte-tenu des ordres de grandeur déjà connus pour R^* et C . Conclure sur la validité du modèle proposé.

Pour aller plus loin : Rakov & Uman, "Lightning : Physics and Effects" (Cambridge University Press, 2003).

Fin de la partie B



Partie C

Exercice 2

Les trous noirs dans l'Univers

Durée conseillée : 30 minutes.

On désigne par le symbole M_S la masse du Soleil, avec $M_S = 2,00 \times 10^{30}$ kg. Le rayon de la Terre est noté R_T avec $R_T = 6,4 \times 10^3$ km. L'année-lumière (symbole : al) est une unité de distance telle que $1 \text{ al} = 9,46 \times 10^{15}$ m. Les constantes physiques utilisées dans cette partie sont fournies en début de sujet. **Cet exercice n'attend pas d'analyse dimensionnelle pour l'établissement des résultats demandés. Tout résultat fourni par l'énoncé peut être utilisé dans les questions suivantes. Toute réponse doit être justifiée.**

Les trous noirs sont des astres dont l'existence a d'abord été prédite par la théorie de la relativité générale d'EINSTEIN en 1915, avant d'être confirmée par des observations en 2019. Ces astres sont si denses qu'aucun corps ni même la lumière ne peut s'en extraire. Dans cet exercice, on fera référence à trois types de trous noirs :

- les trous noirs **primordiaux**, encore hypothétiques, sont de minuscules trous noirs dont la masse pourrait être aussi faible que 2×10^{-8} kg. Ils se seraient formés au moment du Big Bang ;
- les trous noirs **stellaires** sont le résultat de l'effondrement du cœur d'une étoile massive à la fin de sa vie. Leur masse est comprise entre $3 M_S$ et $15 M_S$;
- les trous noirs **supermassifs**, dont la masse est comprise entre $10^6 M_S$ et quelques $10^9 M_S$, se trouvent au centre de la plupart des galaxies.

Trou noir et mécanique classique

On considère un astre de symétrie sphérique, de masse totale M et de rayon R . On définit la vitesse de libération de cet astre, notée v_{lib} , comme étant la vitesse minimale qu'un corps placé à la surface de l'astre doit avoir pour « échapper » à l'attraction gravitationnelle de ce dernier, c'est-à-dire atteindre une vitesse nulle à une distance infinie de l'astre.

Q1. À l'aide d'une méthode énergétique, montrer que la vitesse de libération pour un tel astre est donnée par

$$v_{\text{lib}} = k_1 \sqrt{\frac{GM}{R}}$$

avec k_1 une constante numérique sans dimension de l'ordre de l'unité à exprimer.



Dans le cadre de la mécanique classique, on appelle rayon de SCHWARZSCHILD, noté R_{Sch} , le rayon d'un trou noir sphérique dont la lumière ne peut pas s'échapper, c'est-à-dire pour lequel $v_{\text{lib}} = c$.

Q2. Montrer que le rayon de SCHWARZSCHILD pour un trou noir de masse M vérifie

$$R_{\text{Sch}} = k_2 \frac{GM}{c^2}$$

avec c la vitesse de la lumière dans le vide et k_2 une constante numérique sans dimension de l'ordre de l'unité à exprimer. Donner l'ordre de grandeur du rayon R_{Sch} pour un trou noir stellaire.

Observation du trou noir M87*

En 2019, le projet EHT (pour « Event Horizon Telescope ») a permis la première observation d'un trou noir, appelé M87* et situé à une distance $L = 5,02 \times 10^7$ al de la Terre. L'instrument de ce projet est composé de la mise en réseau d'observatoires astronomiques répartis sur toute la surface de la Terre (voir figure 1). La résolution angulaire de cet instrument est équivalente à celle d'un télescope dont le diamètre serait la plus grande distance séparant deux antennes du réseau EHT. La résolution angulaire θ_{res} d'un télescope de diamètre D est

$$\theta_{\text{res}} = \frac{\lambda}{D}$$

avec λ la longueur d'onde du rayonnement observé.

À l'aide de cet instrument, les scientifiques ont pu observer le trou noir sous la forme d'une ombre circulaire se détachant sur un disque de gaz lumineux (figure 2). La lumière émise par le disque a une longueur d'onde $\lambda = 1,3$ mm. Des calculs de relativité générale permettent d'exprimer le rayon de l'ombre, noté R_{ombre} , en fonction de la masse M du trou noir :

$$R_{\text{ombre}} = \sqrt{27} \frac{GM}{c^2}$$



FIGURE 1 – Répartition des observatoires du réseau de l'EHT. Crédits : NRAO.

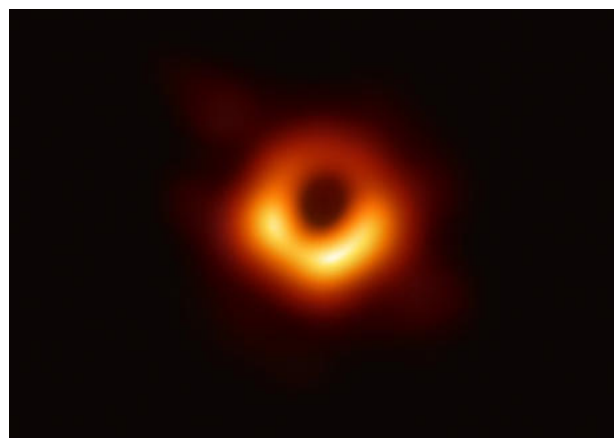
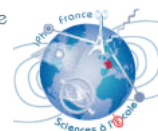


FIGURE 2 – Image du trou noir M87* par l'EHT. Crédits : EHT collaboration.



Q3. Citer un phénomène physique limitant la résolution de tout instrument d'observation en astronomie. En utilisant les figures 1 et 2, montrer que le trou noir $M87^*$ possède une masse minimale notée M_{\min} dont on donnera l'expression. Faire l'application numérique et exprimer le résultat en masses solaires M_{\odot} . Déterminer la catégorie de trous noirs à laquelle appartient $M87^*$.

Masse minimale d'un trou noir

On souhaite établir l'expression de la plus petite masse possible pour un trou noir, notée M_0 dans la suite. Pour ce faire, on exploite des résultats de mécanique quantique. On assimile le trou noir à une particule quantique de masse M_0 et d'énergie E .

Q4. Par analogie avec un photon, donner la relation entre l'énergie E de cette particule et sa longueur d'onde λ dans le cadre de la dualité onde-corpuscule. Définir également l'énergie de masse de la particule. En déduire λ_c , appelée longueur d'onde de COMPTON, désignant la longueur d'onde de la particule lorsque son énergie E se réduit à son énergie de masse.



Cette particule est confinée dans une boîte de largeur $L = R_{\text{Sch}}$ à une dimension. En notant x la position du trou noir dans la boîte avec l'origine $x = 0$ placée au centre de celle-ci, on admet que la particule est décrite par une fonction ψ , appelée « fonction d'onde », vérifiant :

$$\psi(x) = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_c} x\right)$$

avec A une constante. Le confinement de la particule se traduit par la condition $\psi(\pm L/2) = 0$.

Q5. Montrer que la plus petite masse possible pour le trou noir vérifie $M_0 = k_3 m_P$ avec k_3 une constante numérique sans dimension de l'ordre de l'unité à exprimer et m_P la masse de PLANCK donnée par

$$m_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 2,18 \times 10^{-8} \text{ kg}$$

Faire l'application numérique en donnant le résultat en kg. Déterminer la catégorie à laquelle appartiendrait un trou noir ayant cette masse.

Évolution de la masse d'un trou noir

Cette partie cherche à tester l'hypothèse selon laquelle les trous noirs supermassifs observés dans notre Univers actuel se sont formés à partir de trous noirs primordiaux de très faibles masses eux-mêmes formés au moment du Big Bang. On suppose que l'énergie d'un trou noir est égale à son énergie de masse. Plusieurs phénomènes peuvent modifier la masse d'un trou noir au cours du temps. On considère la combinaison de trois d'entre eux :

1. Un trou noir rayonne de l'énergie à la manière d'un corps noir, entraînant son évaporation progressive. On admet que la température T d'un trou noir de masse M est donnée par

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi k_B G M}$$

où k_B désigne la constante de BOLTZMANN. La loi de STEFAN-BOLTZMANN relie la puissance surfacique P_S rayonnée par un corps noir à sa température T selon :

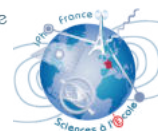
$$P_S = \sigma T^4$$

où $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ est la constante de STEFAN-BLOTZMANN.

2. Un trou noir voit sa masse augmenter par accrétion de la matière environnante. Pour un trou noir de masse M , le taux d'accrétion moyen \dot{M}_{acc} est donné par

$$\dot{M}_{\text{acc}} = \frac{M}{\tau} \quad \text{avec} \quad \tau = 4,5 \times 10^7 \text{ ans.}$$

3. Un trou noir peut voir sa masse augmenter en fusionnant avec d'autres trous noirs proches de lui. La quantité de masse récupérée par unité de temps via ce phénomène, notée \dot{M}_{fus} , s'estime selon



$$\dot{M}_{\text{fus}} = \Gamma M.$$

Le taux de fusion de trous noirs Γ est tel que $\Gamma \leq 1 \times 10^{-7} \text{ ans}^{-1}$.

Q6. À l'aide d'un bilan d'énergie, montrer que la variation de masse d'un trou noir due à l'évaporation, notée \dot{M}_{ray} , est de la forme $\dot{M}_{\text{ray}} = -\alpha/M^2$ avec α une constante. En étudiant les phénomènes proposés, montrer alors que la masse M d'un trou noir vérifie l'équation différentielle

$$\frac{dM}{dt} = \frac{-\alpha}{M^2} + \beta M$$

avec α et β deux constantes à exprimer. En déduire l'expression de la masse minimale que doit avoir un trou noir (en fonction de α et de β), afin de grossir avec le temps. On fournit $\alpha = 3,95 \times 10^{15} \text{ SI}$. Faire l'application numérique et proposer une conclusion sur l'hypothèse de cette partie, en commentant la modélisation.

Fin de la partie C

Partie D

Problème

Travelling contrarié

Durée conseillée : 1 heure.

Le *travelling contrarié* est un effet de cinéma qui combine un **zoom optique** et un **déplacement réel** de la caméra sur un rail, dans la direction opposée (figure 1). Concrètement, la caméra avance vers le sujet tout en dézoomant, ou recule tout en zoomant, de sorte que la taille apparente du personnage reste constante tandis que l'arrière-plan semble se comprimer ou s'étirer.



FIGURE 1 – Illustration d'une situation de travelling contrarié. Source : thedailyjaws.com

Ce jeu entre mouvement physique et focale modifie la perspective et provoque une sensation de vertige. Inventé par Alfred Hitchcock dans *Sueurs froides* (1958), il a été repris par Steven Spielberg dans *Les Dents de la mer* (1975), lorsque le chef Brody, assis sur la plage, comprend soudain qu'un baigneur vient d'être attaqué par un requin. C'est cette scène particulière, appelée « *Get out of the water* », qui est étudiée dans ce problème (figure 2). Pendant tout le travelling, la mise au point est faite sur la jeune femme placée juste derrière le capitaine Brody.



FIGURE 2 – Illustration du travelling contrarié. Les photos sont extraites de la scène *Get out of the water*

Les photos du tournage de cette scène sont données sur la figure 3.

FIGURE 3 – Configuration du tournage de la scène *Get out of the water*. Source : thedailyjaws.com

RELATIONS UTILES

Les relations de Descartes des lentilles minces permettent de déterminer la position de l'image et son grandissement, connaissant la position de l'objet. Les positions de l'objet et de l'image sont repérées par leurs distances algébriques au centre optique O de la lentille : \overline{OA} et $\overline{OA'}$.

⇒ Formule de conjugaison de Descartes

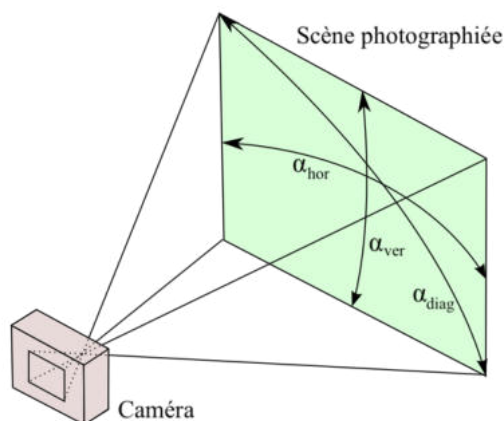
$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'}$$

⇒ Formule de grandissement de Descartes

$$\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$$

1 Angle de champ

L'angle de champ (ou champ angulaire) est l'angle α sous lequel la scène photographiée est capturée depuis le centre optique de l'objectif. Il correspond à l'angle formé, au niveau de l'objectif, par deux points de la scène situés aux limites de ce qui est visible sur la photographie. Les images de ces deux points se trouvent sur les bords du cliché (horizontalement, verticalement ou en diagonale; figure 4). Pour s'affranchir de la dépendance de l'angle de champ avec la distance de mise au point – dépendance relativement faible pour les objectifs de focale standard – il est usuellement défini pour une mise au point à l'infini.

FIGURE 4 – Angle de champ. Source : wikipedia.org

Dans cette partie, on s'intéresse à l'évolution de l'angle de champ au cours du travelling, responsable de l'effet de vertige mentionné en introduction. Pour cela, on modélise l'objectif de la caméra utilisée par Spielberg par l'association d'une simple lentille mince convergente \mathcal{L} , de distance focale f' , et d'un capteur photosensible, ici une pellicule \mathcal{P} de taille L . Le système optique étudié est schématisé sur la figure 5.

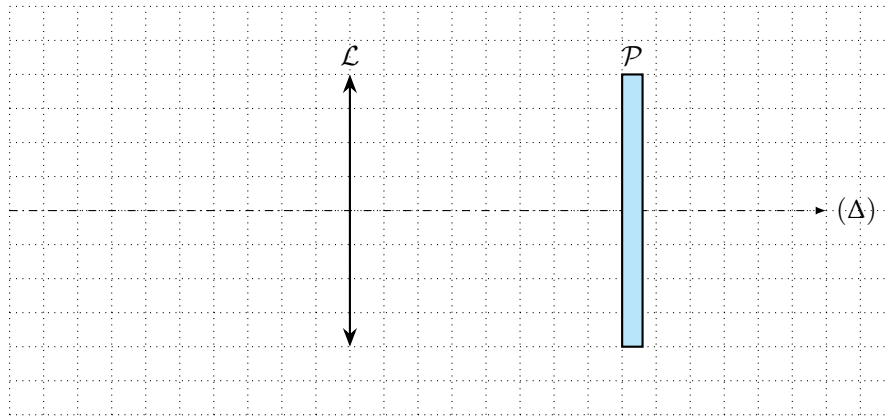


FIGURE 5 – Modèle simplifié de l'objectif de la caméra

Q1. Pour une mise au point à l'infini, préciser où se situe la pellicule \mathcal{P} par rapport à la lentille \mathcal{L} . Justifier.

Pour déterminer l'angle de champ, on considère un objet transverse AB situé à l'infini dont les points images conjugués A' et B' se forment sur les bords de la pellicule.

Q2. Sur la figure 5, représenter l'angle de champ α . Établir ensuite son expression en fonction de L et f' .

On étudie les deux photos ci-dessous, extraites de la scène *Get out of the water*.



Q3. Comparer le champ angulaire de ces photos. En déduire celle qui a été prise avec l'objectif de plus grande focale.



2 Étude des images de la scène *Get out of the water*

On modélise dans cette partie de façon plus fine la situation du travelling contrarié : l'objectif de la caméra, toujours assimilé à une simple lentille convergente \mathcal{L} de focale f' , est maintenant **mobile**. On rappelle que, par définition du travelling contrarié, la taille apparente du personnage sur lequel la mise au point est faite ne change pas : le grandissement γ est donc constant.

Q4. Sur un schéma, représenter l'objectif \mathcal{L} de la caméra, le personnage sur lequel la mise au point est faite, qu'on assimilera à un objet transverse AB , la pellicule \mathcal{P} ainsi que l'image $A'B'$ qui s'y forme. Le schéma doit représenter la situation de façon réaliste.

Q5. On note d la distance entre l'objet sur lequel la mise au point est faite et la lentille \mathcal{L} . Exprimer la focale f' en fonction de la distance d et du grandissement transversal γ uniquement.

Q6. En exploitant la photo ci-dessous et en détaillant votre démarche, estimer la valeur du grandissement transversal γ au cours du travelling.





DONNÉES UTILES

- ➔ Dimension du négatif sur la pellicule utilisée par Spielberg : $32,5 \text{ mm} \times 18,6 \text{ mm}$.
- ➔ Pendant tout le travelling, la mise au point est faite sur la jeune femme placée juste derrière le capitaine Brody.
- ➔ Largeur moyenne des épaules d'une femme adulte : $D = 35 \text{ cm}$.



En observant les photos du tournage (figure 3), on peut estimer les distances minimale et maximale d_{\min} et d_{\max} entre l'objectif de la caméra et le plan de mise au point au cours du travelling de la scène *Get out of the water* :

$$d_{\min} \approx 1 \text{ m} \quad \text{et} \quad d_{\max} \approx 6 \text{ m}$$

Q7. En déduire une estimation des focales minimale et maximale f'_{\min} et f'_{\max} de l'objectif de la caméra utilisée lors de cette scène.



3 Principe de fonctionnement d'un objectif à focale variable

La nécessité de faire varier la focale au cours du travelling a été mise en évidence. Il faut donc désormais affiner la modélisation de l'objectif de la caméra en étudiant le principe de fonctionnement d'un objectif à focale variable.

Les objectifs utilisés en prise de vue cinématographique sont des systèmes optiques très sophistiqués, constitués d'une vingtaine de lentilles. Dans cette partie, on modélise l'objectif de la caméra utilisée par Spielberg par un simple doublet de deux lentilles minces :

- celle du côté objet, appelée « lentille frontale », est convergente de distance focale $f'_1 = 100$ mm et de centre O_1 . Elle est fixe par rapport à la pellicule;
- celle du côté image, appelée « lentille arrière », est divergente de distance focale $f'_2 = -50$ mm et de centre O_2 . Elle est mobile par rapport à la pellicule.

Le système optique étudié est schématisé sur la figure 6 avec $e = \overline{O_1O_2} = 200$ mm.

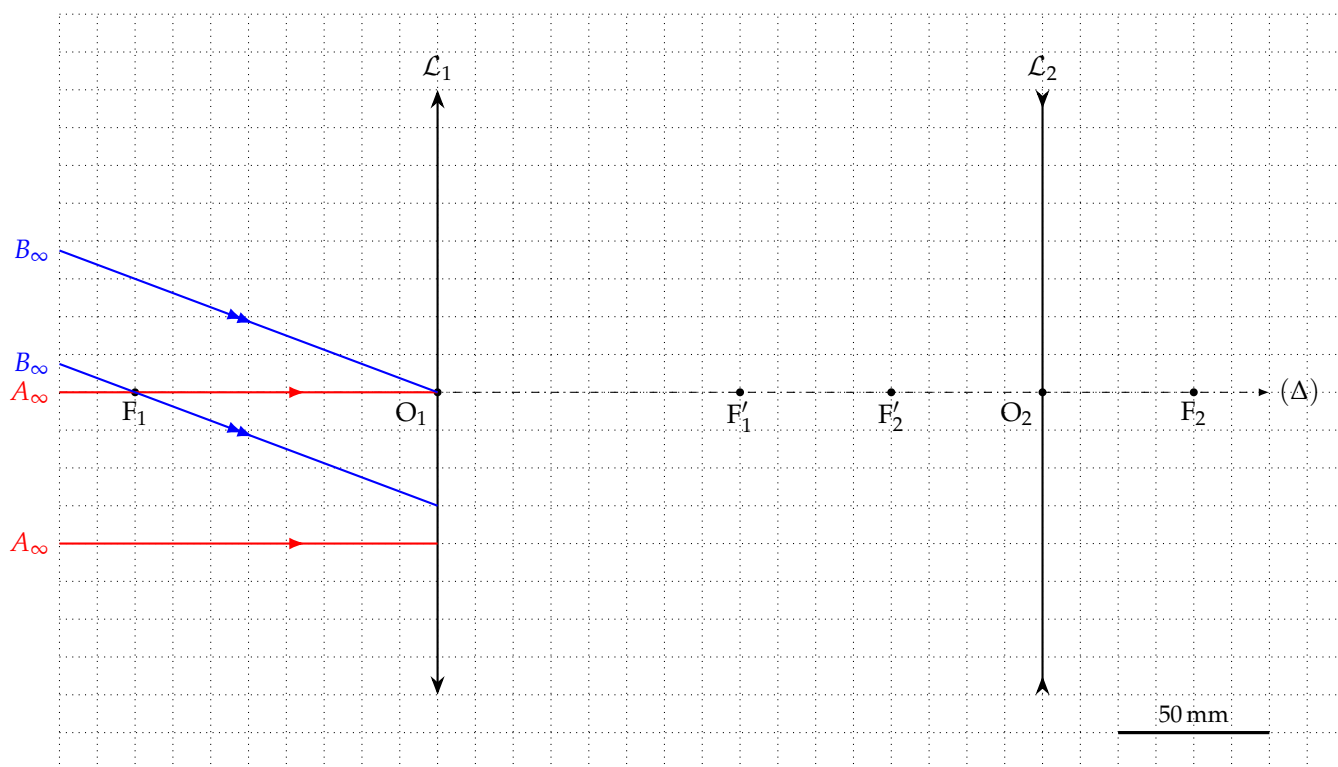


FIGURE 6 – Modèle à deux lentilles d'un objectif photographique

Le but de cette partie est de déterminer l'expression de la distance focale f' de l'objectif photographique. On confrontera ce résultat avec son encombrement lors du tournage de la scène *Get out of the water*.

On considère un objet transverse AB situé à l'infini, le point A étant situé sur l'axe optique et le point B hors de l'axe.

Q8. Sur la figure 6, compléter la marche des deux rayons lumineux issus du point B pour construire l'image A_1B_1 de l'objet AB par la lentille frontale, puis l'image $A'B'$ de A_1B_1 par la lentille arrière.

Le foyer principal image F' du doublet de lentilles est le point image conjugué d'un point objet situé à l'infini sur l'axe optique : ainsi, les points F' et A' sont confondus.

La distance focale image f' du doublet est la distance entre son foyer principal image et le plan principal image. On positionne ce plan en trouvant l'intersection entre le prolongement d'un rayon incident parallèle à l'axe optique arrivant sur le doublet et le prolongement du rayon correspondant émergent du doublet. On trace ensuite le plan perpendiculaire à l'axe optique qui contient ce point.



On note H' le point d'intersection entre le plan principal image et l'axe optique. La distance focale image du doublet est alors par définition $f' = \overline{H'F'}$.

Q9. Sur la figure 6, compléter la marche des rayons lumineux issus de A traversant les deux lentilles de l'objectif. En déduire la position du plan principal image et de H' .

Q10. En observant attentivement la construction géométrique des deux questions précédentes, expliquer pourquoi une modélisation complète d'un objectif à focale variable comporte au moins une lentille supplémentaire, appelée *lentille compensatrice parfocale*, indispensable pour permettre la formation de l'image sur la pellicule.

Q11. Identifier le point conjugué de l'image finale F' par la lentille arrière \mathcal{L}_2 . En déduire l'expression de la distance $\overline{O_2F'}$ en fonction de f'_1 , f'_2 et e .

Q12. Calculer $\overline{O_2F'}$. Comparer ce résultat à la mesure de cette même distance sur la figure 6.

Pour le tournage de la scène *Get out of the water*, la caméra était équipée d'un objectif *Angénieux 25-250mm High Precision* (Source : camescoop.com), qui est présenté sur la figure 7. Les distances focales minimale et maximale de cet objectif sont : $f'_{\min} = 25$ mm et $f'_{\max} = 250$ mm. Le diamètre de la lentille frontale est de 136 mm.



FIGURE 7 – Objectif ANGENIEUX 25–250mm HP. Source : rcservice.es

On admet que l'expression de $\overline{O_2F'}$ obtenue à la question 12 permet d'établir, à l'aide d'arguments géométriques, l'expression de la distance focale f' d'un doublet de deux lentilles *via* la relation

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{e}{f_1 f_2}.$$

Q13. Estimer l'encombrement de l'objectif Angénieux 25-250mm High Precision en calculant la valeur maximale de la distance inter-lentille e . Vérifier la vraisemblance des valeurs obtenues avec les photographies des figures 3 et 7.

4 Hypothèses sur le mouvement de *travelling*

Les photographies du tournage montrent que la caméra est déplacée sur un chariot conduit par des rails. *Attention, sur la figure 3, ces rails semblent inclinés par rapport à la plage; ils ne sont donc pas nécessairement horizontaux.*

La figure 8 représente l'évolution au cours du temps de la distance d entre la caméra et le sujet. Cette distance a été mesurée par un pointage image par image de la scène. On se propose d'exploiter ces données afin de caractériser le mouvement du chariot, puis d'en déduire la nature des forces qui s'exercent sur lui pendant la prise de vue. Les moyens techniques disponibles à l'époque ne permettent pas d'envisager une motorisation du chariot. Son mouvement résulte donc d'une action mécanique extérieure.

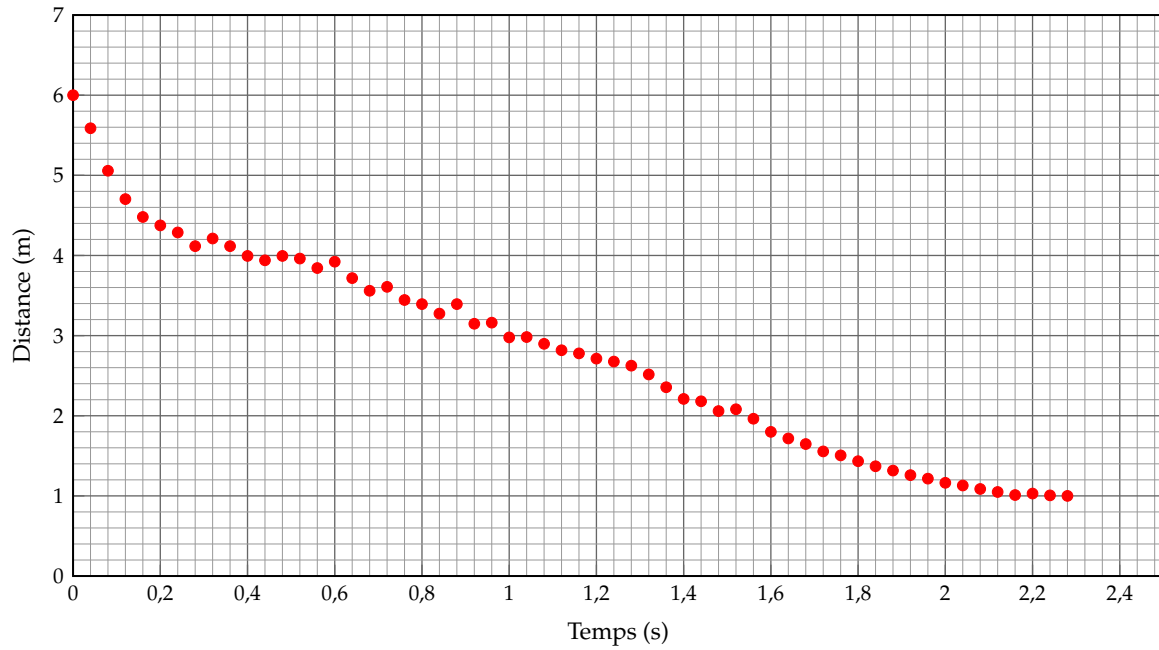


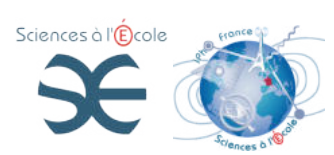
FIGURE 8 – Évolution temporelle de la distance sujet-caméra dans la scène *Get out of the water*.

Q 14. À partir de la figure 8, décrire le mouvement du chariot au cours de la scène, puis proposer une hypothèse vraisemblable sur les forces susceptibles d'agir sur lui et la discuter.

Nom :

Lycée :

Prénom :



Fin de la partie D