

# Épreuve de Physique - 22 Septembre 2025

Durée : 3h

Consignes :

- L'usage de la calculatrice est interdit.
- Un résultat d'application numérique **ne doit pas** contenir d'opérations ou de fonctions (fraction, racine, logarithme, etc.) et **sera compté comme faux** s'il en contient.
- Les expressions littérales seront encadrées, et les applications numériques soulignées. **Une application numérique sans unité sera considérée fausse.**
- Les trois parties sont indépendantes.
- Si vous constatez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, indiquez le sur votre copie. Vérifiez tout de même que l'erreur ne provient pas de vous (homogénéité, ordre de grandeur, etc.).

## 1 Mise au point d'un appareil photographique numérique (APN)

On modélise l'objectif d'un APN par une lentille mince convergente dans les conditions de Gauss et son capteur par un écran. Les phénomènes reliés à la taille des pixels ou du diaphragmes ne sont pas pris en compte.

La lentille, de distance focale image  $f'$ , est placée à une distance variable  $d$  de l'écran comprise entre  $d_{min}$  et  $d_{max}$ . Ces extrémums sont distants de  $\Delta d = 3$  cm. L'objet visé est à la distance  $D$  quelconque et l'image est nette (rigoureusement) sur l'écran.

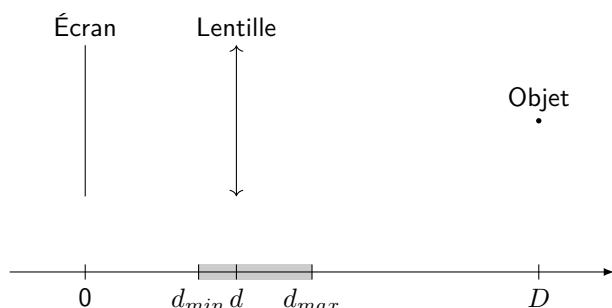


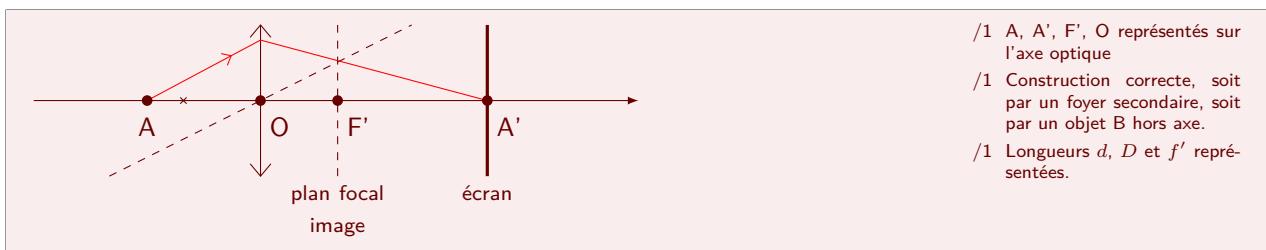
FIGURE 1 – Schéma simplifié d'un APN visant un objet.

1. Décrire ce que sont les conditions de Gauss.

Les rayons lumineux sont paraxiaux, c'est à dire peu inclinés et peu éloignés de l'axe optique

/1 peu inclinés  
/1 peu éloignés ("paraxiaux" suffit à récupérer 2 points)

2. Faire un schéma optique sur votre copie de la situation représentée par la figure 1. Faire figurer sur l'axe optique un point objet noté A, le centre optique et le foyer image F' puis construire l'image A' de A sur l'écran. Placer les longueurs  $d$ ,  $D$  et  $f'$  sur le schéma.



3. À partir de la formule de conjugaison de Descartes donnée en annexe, donner une expression reliant  $d$ ,  $D$  et  $f'$ .

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{D-d} = \frac{1}{f'}$$

/1 distance  $\overline{OA'} = D - d$   
 /1 distance et algébrisation  
 $\overline{OA} = -d$

4. L'objet ne peut être physiquement avant la lentille, ce qui se traduit par  $D > d$ . Justifier le fait que  $d$  diminue lorsque  $D$  augmente en utilisant le résultat précédent.

Quand  $D$  augmente, sachant que  $D - d > 0$ ,  $\frac{1}{D-d}$  diminue (fonction inverse). Comme la somme  $\frac{1}{d} + \frac{1}{D-d}$  est fixe,  $\frac{1}{d}$  augmente, c'est à dire  $d$  diminue.

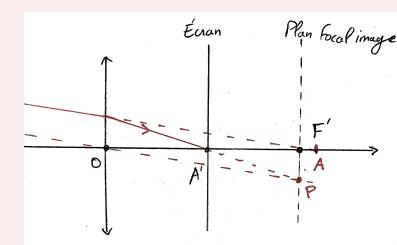
/1 fonction inverse et somme fixe

5. Quelle est la limite de  $d$  lorsque  $D$  tend vers l'infini ?

$$\lim_{D \rightarrow \infty} d = f'$$

/1 résultat

6. Par un tracé, retrouver la position d'un point objet A à partir de son image réelle A' située sur l'axe optique à une distance du centre optique plus petite que la distance focale  $f'$ . Commenter ainsi l'absence d'intérêt du cas  $d < f'$  pour l'APN.



/1 A' entre F' et O.  
 /1 A trouvé par construction du côté image (foyer secondaire ou objet hors axe)  
 /1 L'objet est virtuel, sans intérêt puisque ce cas ne se rencontre pas en photographie (les objets sont physiquement devant l'appareil photographique).

On souhaite que l'APN puisse faire la mise au point sur un objet à l'infini mais aussi, en déplaçant la lentille dans la zone autorisée, sur un objet le plus proche possible de l'écran.

7. En déduire que pour remplir ce cahier des charges, la zone de déplacement de la lentille est bornée par  $d_{min} = f'$ .

On sait que  $D$  diminue quand  $d$  augmente, on a alors  $D = D_{min}$  pour  $d = d_{max}$ . Au contraire lorsque  $d$  s'approche de  $f'$ ,  $D$  tend vers l'infini.

/1 zone inutilisée si  $d < f'$   
 /1 utilisation des réponses précédentes.

On sait aussi que pour les valeurs de  $d$  inférieures à  $f'$ , d'après la question 6, seul un objet virtuel peut donner une image nette sur l'écran : si  $d_{min} < f'$ , la zone entre  $d_{min}$  et  $f'$  n'est pas exploitable par l'APN (les objets visés en photographie sont réels). L'amplitude de déplacement inutilisée  $f' - d_{min}$  impacte la distance  $d_{max}$  car  $d_{max} = d_{min} + \Delta d = \underbrace{\Delta d}_{\text{fixe}} + \underbrace{f' - (f' - d_{min})}_{>0 \text{ si } f' > d}$ .

Plus ce déplacement inutilisé est grand, plus  $d_{max}$  est faible, plus la distance minimale de visée  $D_{min}$  sera grande. On a intérêt donc de choisir  $f' - d_{min}$  le plus petit pour avoir  $D_{min}$  le plus petit tout en ayant la possibilité de viser à l'infini soit  $d = f'$  possible. On en déduit  $d_{min} = f'$

8. Exprimer  $D_{min}$ , la distance minimale de mise au point possible uniquement en fonction de  $d_{max}$  et  $f'$  puis uniquement en fonction de  $\Delta d$  et  $f'$ .

En reprenant le résultatat de la question 3,  $\frac{1}{D_{min} - d_{max}} + \frac{1}{d_{max}} = \frac{1}{f'}$ , soit  
en isolant  $D_{min}$  :  $D_{min} = d_{max} + \frac{d_{max}f'}{d_{max} - f'}$ . Comme  $d_{max} = d_{min} + \Delta d$   
et que  $d_{min} = f'$ , on a  $D_{min} = \Delta d + f' + \frac{(\Delta d + f')f'}{\Delta d}$

- /1 Utilisation de la formule de conjugaison en comprenant que si  $d = d_{max}$  alors  $D = D_{min}$
- /1 Utilisation du résultat de la question précédente et de la définition de  $\Delta d$

On considère le réglage obtenu comme celui d'un APN dans des conditions classiques.

Il est possible de faire de la "macrophotographie" avec un objectif classique d'APN en rajoutant une bague d'adaptation entre l'objectif et l'appareil. Cette bague ne comporte aucune optique mais permet tout de même de prendre des objets proches et petits. Cette bague éloigne l'objectif du capteur d'une distance notée  $L$ , la longueur de la bague. Pour le modèle utilisé jusqu'ici, cela revient à décaler la zone de déplacement possible de  $L$ .

9. Est-il possible de faire la mise au point sur un sujet à l'infini avec cette bague dans les conditions de réglage classique d'un APN ? Déterminer les nouvelles expressions  $D'_{max}$  et  $D'_{min}$  de  $D$  en fonction de  $f'$ ,  $\Delta d$  et  $L$ .

La distance minimale de la lentille à l'écran  $d'_{min}$  devient  $d_{min} + L$ , ce qui impacte la distance maximale de mise au point :  $\frac{1}{D'_{max} - d'_{min}} + \frac{1}{d'_{min}} = \frac{1}{f'}$ ,  
soit  $D'_{max} = f' + L + \frac{(f' + L)f'}{L}$ . La distance maximale n'est plus l'infini  
(cas obtenu si  $L$  tend vers 0 ce qui correspond à la situation sans bague).  
Un raisonnement similaire conduit à trouver  

$$D'_{min} = \Delta d + f' + L + \frac{(\Delta d + f' + L)f'}{\Delta d + L}$$

- /1 Expression de la distance maximale de mise au point.
- /1 La distance maximale n'est plus l'infini justifiée par l'expression.
- /1 Expression de la distance minimale de mise au point.

10. La distance de mise au point minimale pour un "objectif de 50 mm" (comprendre lentille de distance focale image = 50 mm) est de 45 cm. En déduire la longueur  $\Delta d$  et la comparer à la valeur fournie par l'énoncé. Commenter l'origine de cet écart en critiquant la modélisation de l'objectif utilisé. On utilisera pour les calculs le fait que  $\sqrt{1+a} \simeq 1 + \frac{a}{2}$  quand  $a$  est très petit devant 1.

Sans la bague, on prend l'expression  $D_{min} = \Delta d + f' + \frac{(\Delta d + f')f'}{\Delta d}$ .  
En multipliant par  $\Delta d$ , on obtient une équation du second ordre en  $\Delta d$  :  $\Delta d^2 + (2f' - D_{min})\Delta d + f'^2 = 0$ . La solution positive ( $\Delta d$  est défini positif) est, si le discriminant est positif,  $\Delta d = \frac{D_{min}}{2} - f' + \frac{D_{min}}{2} \sqrt{1 - \frac{4f'}{D_{min}}}$ . Or  $4f'/D_{min} = 20/45$  est petit<sup>a</sup> devant 1, soit  

$$\Delta d \simeq \frac{D_{min}}{2} - f' + \frac{D_{min}}{2} \left(1 - \frac{2f'}{D_{min}}\right) = D_{min} - 3f'$$
.  
A.N :  $\Delta d \simeq 30 \text{ cm}$

- /1 Équation du second ordre
- /1 Solutions
- /1 Solution positive uniquement
- /1 Utilisation correcte du développement limité
- /1 AN

11. Donner l'expression des grossissements maximaux  $\gamma_{max}$  et  $\gamma'_{max}$  respectivement sans et avec une bague en fonction de  $f'$ ,  $\Delta d$  et  $L$ .

En utilisant la formule du grossissement,  $\gamma_{max} = \frac{d_{max}}{D_{min} - d_{max}} = \frac{\Delta d}{f'}$  et  

$$\gamma'_{max} = \frac{d'_{max}}{D'_{min} - d'_{max}} = \frac{\Delta d + L}{f'}$$

- /1 avec
- /1 sans

12. En plaçant une bague, on obtient l'image d'un objet trois fois plus grande que sans bague. Déterminer la longueur de la bague en prenant  $\Delta d = 3 \text{ cm}$

$\gamma'_{max}/\gamma_{max} = 3$  d'après l'énoncé. En utilisant les expressions,  $L = 2\Delta d$  soit  $L = 6$  cm. C'est une longueur de bague que l'on peut trouver dans le commerce.

/1 Rapports des grossissements en lien avec la donnée de l'énoncé.

/1 AN

/1 Commentaire quelconque, "taille raisonnable" suffit.

## 2 Analyse dimensionnelle

Dans un fluide, une bille de diamètre  $d$  animée d'une vitesse  $v$  est soumise à une force de frottement  $F$  donnée par  $F = 3\pi\eta dv$ , où  $\eta$  est la viscosité du fluide.

13. Quelle est la dimension de  $\eta$  ?

On utilise la formule  $F = 3\pi\eta dv$  :  $\dim(\eta) = \dim(F)/(\dim(3\pi)\dim(dv))$ . On sait que  $\dim(F) = M \cdot L \cdot T^{-2}$  (en utilisant l'expression du poids par exemple qui est bien une force :  $P = mg$ ,  $m$  une masse et  $g$  une accélération), que  $3\pi$  est adimensionné, que  $\dim(dv) = L^2 \cdot T^{-1}$ . D'où le résultat :  $\dim(\eta) = M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}$ .

/1 Idée d'utiliser la formule faisant apparaître  $\eta$  et utilisation des dimensions (pas des unités).

/1 Résultat

14. Lorsque la bille est lâchée sans vitesse initiale à l'instant  $t = 0$ , sa vitesse s'écrit pour  $t > 0$  :  $a(1 - \exp(-t/b))$  où  $a$  et  $b$  sont deux grandeurs qui dépendent des caractéristiques du fluide. Quelles sont les dimensions de  $a$  et  $b$  ?

Comme l'expression représente une vitesse et que la parenthèse  $(1 - \exp(-t/b))$  est adimensionnée,  $a$  est donc homogène à une vitesse :  $\dim(a) = L \cdot T^{-1}$ . La fonction exponentielle prend des arguments adimensionnés donc  $\dim(t/b) = 1$  soit  $\dim(b) = T$

/1 dim de  $a$

/1 dim de  $b$

15. Proposez par analyse dimensionnelle une expression homogène à  $b$ . Les grandeurs intervenant dans ce paramètre sont la masse de la bille  $m$ , son diamètre  $d$  et la viscosité du fluide  $\eta$ .

Nous cherchons une grandeur homogène à un temps avec  $m$ ,  $d$  et  $\eta$ . En remarquant que  $m/\eta$  fait disparaître la dimension de masse et laisse comme dimension  $L \cdot T$ ,  $\frac{m}{d\eta}$  est homogène à un temps (donc à  $b$ ).

/1 Résultat. La méthode pour y parvenir peut être "à la main" comme proposé ou par une équation aux dimensions.

Remarque : l'expression exacte de  $b$  est  $\frac{m}{3\pi d\eta}$ , il est impossible de prédire ce facteur  $1/3\pi$  (adimensionné) par analyse dimensionnelle, il faut nécessairement appliquer le principe fondamental de la dynamique ou un théorème qui en est issu pour le voir apparaître.

16. Si  $\rho$  désigne la masse volumique du fluide, trouver les exposants  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  tel que  $\rho^\alpha v^\beta \eta^\gamma d^\delta$  soit sans dimension (parmi les différents choix possibles on prendra  $\alpha = 1$ ). Cette grandeur sans dimension est appelée le nombre de Reynolds, permettant de caractériser le régime d'écoulement du fluide autour de la bille. Donner son expression.

Le produit  $\rho^\alpha v^\beta \eta^\gamma d^\delta$  est adimensionné, soit  $\dim(\rho^\alpha v^\beta \eta^\gamma d^\delta) = 1$ . On réécrit cette égalité en utilisant les dimensions de  $\rho$ ,  $v$ ,  $d$  et  $\eta$  :  $(M \cdot L^{-3})^\alpha (L \cdot T^{-1})^\beta (M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1})^\gamma (L)^\delta = 1$ . En groupant les exposants :  $M^{\alpha+\gamma} L^{-3\alpha+\beta-\gamma+\delta} T^{-\beta-\gamma} = 1$  ce qui permet d'écrire le système d'équation suivant, en ajoutant la condition proposée  $\alpha = 1$  :

$$\begin{cases} \alpha = 1 \\ \alpha = -\gamma \\ \beta = -\gamma \\ \delta = 3\alpha - \beta + \gamma \end{cases} \quad (1)$$

Ce qui donne la solution  $(\alpha, \beta, \gamma, \delta) = (1, 1, -1, 1)$ . Le nombre de Reynolds

s'écrit donc :  $\boxed{\frac{\rho v d}{\eta}}$ .

/1 Grandeur adimensionnée traduit par  $\dim(\text{grandeur}) = 1$   
 /1 dimension correcte des paramètres (uniquement  $\rho$  si les questions précédentes sont fausses).

/1 système d'équation et résolution.

/1 Expression correcte du nombre de Reynolds.

### 3 Détermination expérimentale d'un indice optique

Une plaque de polyuréthane d'épaisseur 8 mm est posée sur un plan gradué tous les 5 mm (figure 2). On constate une déformation des graduations lorsqu'on les observe à travers la plaque : on cherche ici à utiliser ce phénomène bien connu pour mesurer l'indice optique du milieu. La prise de vue de la figure 2 est faite avec un smartphone dont l'appareil photographique est situé à 25 cm au dessus du plan et à l'aplomb de la position 0 du plan (graduation 0 non visible sur la photographie).

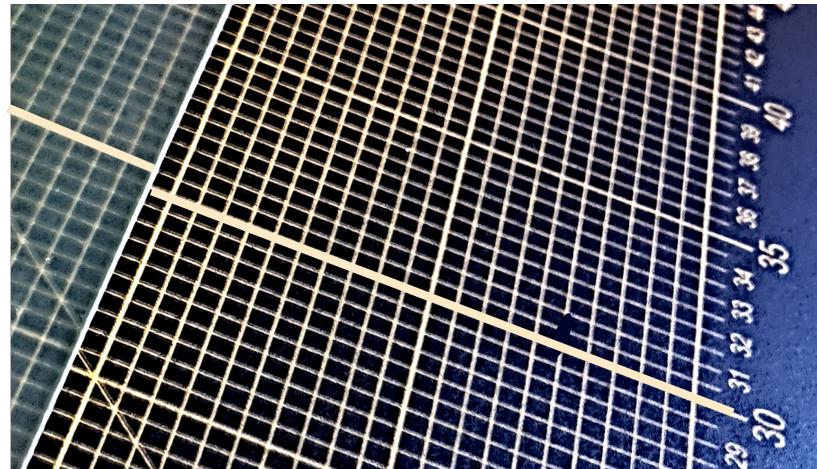
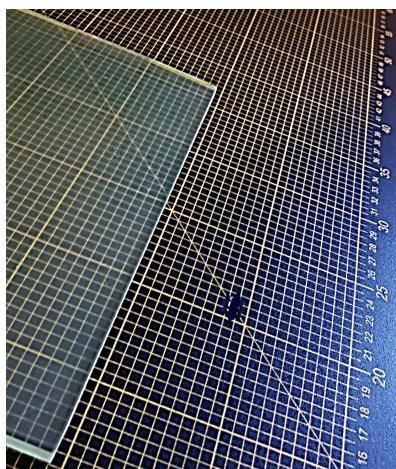
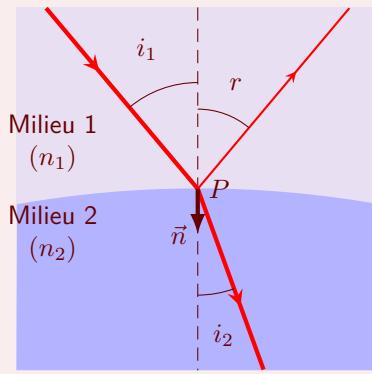


FIGURE 2 – Plaque de polyuréthane sur plan gradué. Chaque carré du plan fait 5 mm de côté. La photo est prise à 25 cm de hauteur et à l'aplomb de la position 0 du plan. L'image de droite correspond à un zoom de l'image de gauche. On observe un décalage des graduations.

17. Énoncer **la** loi permettant de rendre compte du phénomène de déviation de la lumière à la traversée d'un dioptrre. Un schéma sera nécessaire pour définir les différentes grandeurs.

Un rayon lumineux traversant un dioptrre est réfracté selon la loi de réfraction de Snell-Descartes. Pour le schéma ci-dessous :  $n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$ .

/1 Loi de réfraction de Snell-Descartes  
 /1 Schéma  
 /1 Formule  $n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$

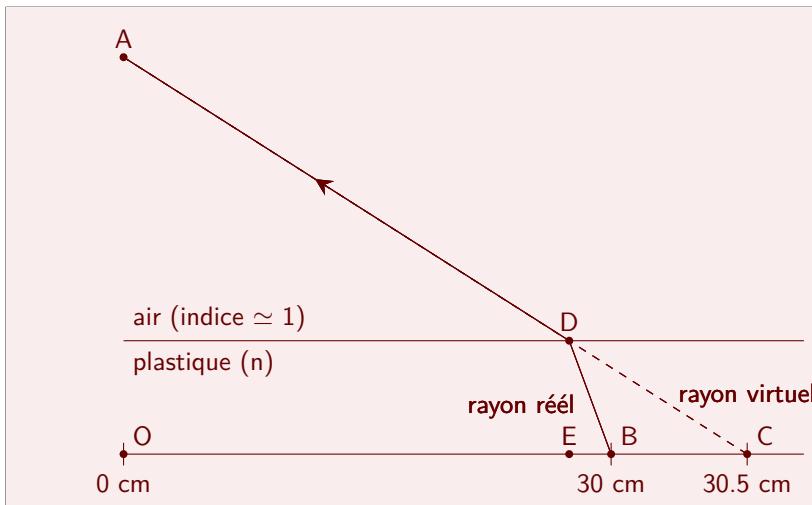


On observe que la graduation des 30 cm visible à travers la plaque est alignée avec celle des 30,5 cm du plan sans la plaque.

Nous pouvons en déduire que le rayon lumineux issu de la ligne des 30 cm à travers le plastique provient virtuellement de celle des 30,5 cm.

L'ébauche de schéma ci-contre, qui sera à compléter par la suite, va permettre de rendre compte de cette observation : la lumière provient (réellement ou virtuellement) des points B (30 cm) ou C (30,5 cm) avant d'être observée en A.

18. Tracer la marche du rayon lumineux issu de B et parvenant en A à travers le plastique. On notera D le point d'intersection entre ce rayon et le dioptrre, et E le projeté vertical de D sur le support.



/1 Le rayon virtuel est en ligne droite jusqu'à A.  
 /1 Le rayon réel est bien tracé à partir du rayon virtuel (il est confondu avec le rayon virtuel entre A et D puisque les lignes sont confondues expérimentalement.)  
 /1 Les points D et E sont bien placés.  
 /1 Les flèches sont précisées sur le RL

19. Exprimer la longueur EC à partir des longueurs AO, DE et OC.

L'appareil photographique étant à la verticale du point O et le point E étant le projeté vertical de D, les droites (OA) et (DE) sont parallèles. On utilise le

/1 Droites (OA) et (DE) parallèles.  
 /1 Formule.

théorème de Thalès :  $EC = OC \frac{DE}{AO}$ .

20. À partir de la question 17, déterminer une relation entre l'indice  $n$  du plastique et les angles  $\widehat{EDC}$  et  $\widehat{EDB}$ .

Par construction l'angle que fait le rayon réel réfracté dans l'air avec la normale au dioptre en D est identique à celui fait entre le rayon virtuel et la normale au dioptre en D. En appliquant la loi de réfraction de Snell-Descartes, il vient  $n \times \sin(\widehat{EDB}) = 1 \times \sin(\widehat{EDC})$ .

/1 Angle réfracté = angle  $\widehat{EDB}$ .  
/1 Formule.

21. Montrer que l'angle  $\widehat{EDB}$  vérifie la relation  $\tan(\widehat{EDB}) = \frac{OC}{AO} - \frac{BC}{DE}$ .

Par construction, EDB rectangle en E, on obtient :  $\tan(\widehat{EDB}) = \frac{EB}{ED} = \frac{EC - BC}{DE}$   
Or  $EC = OC \frac{DE}{AO}$  d'après q.19. On obtient la formule demandée.

/1 Expression de la tangente.  
/1 Utilisation de la relation issue de Thalès.

22. Déterminer, à partir des données de l'énoncé et de l'aide aux calculs, la valeur de l'indice optique  $n$  du plastique.

L'aide au calcul nous permet de calculer  $\widehat{EDB}$  en prenant  $DE = 8$  mm épaisseur de la plaque,  $AO = 250$  mm hauteur de l'appareil par rapport au plan,  $OC = 305$  mm et  $BC = 5$  mm :  $\widehat{EDB} = 0,54$  rad.

/1 Identification de DE à l'épaisseur de la plaque et AO à la hauteur de l'appareil dans les applications numériques (utilisation des données de l'énoncé).

question 19  
Par construction, EDC rectangle en E, on obtient :  $\widehat{EDC} = \arctan\left(\frac{EC}{DE}\right) = \arctan\left(\frac{OC}{AO}\right)$ . L'aide aux calculs donne  $\widehat{EDC} = 0,88$  rad.

/1 Calcul de  $\widehat{EDB}$   
/1 Calcul de  $\widehat{EDC}$   
/1 Calcul de  $n$

En utilisant la réponse à la question 20 et l'aide aux calculs,  $n = \sin(0,88) / \sin(0,54) = 1,5$

23. Sur la photographie de gauche de la figure 2, les lignes ne sont pas visibles à travers la tranche du plastique. Citer brièvement une cause probable de ce phénomène.

La réponse attendue : le phénomène de réflexion totale. Le cas est similaire à ce qu'il se passe pour une fibre optique à saut d'indice, l'appareil photographique pourrait se trouver dans le "coin d'acceptance" de la plaque. Réponse valable plus pratique : le plastique n'est pas poli sur les bords.

/1 Réflexion totale ou état de surface. Réponse non acceptée : résolution de la photographie, ou "mauvais angle de vue" si la réponse n'est pas reliée à la réflexion totale.

24. Une erreur de 1 mm sur la lecture de la graduation donne un écart sur la valeur de l'indice d'environ 0,2. Commenter. Décrire en quelques lignes une méthode pour exploiter pleinement cette photographie et réduire cette incertitude.

Il n'y a pas assez de points expérimentaux pour avoir une incertitude acceptable sur le résultat, il faut soit refaire plusieurs fois l'expérience ou mieux exploiter celle qui a été faite.

Il est possible d'utiliser les autres graduations du plan visibles à travers le plastique et de les repérer par rapport aux graduations qui ne sont pas sous le plastique. Trouver d'autres coïncidences (entre la ligne à 30 cm et celle à 30,5 cm) serait une solution.

Malheureusement, le quadrillage est fait tous les 5 mm et le cas de coïncidence traité dans l'exercice est le seul visible sur la photographie. Il faut donc pour chaque graduation réfracté, estimer sa position par rapport au quadrillage de référence par une méthode d'interpolation : autrement dit, "graduer" chaque carreau du quadrillage de référence (par exemple, un demi carreau = 2,5 mm). Les incertitudes de mesure dépendent alors de la méthode d'interpolation et de l'espacement local entre chaque graduation (nombre de pixel par carreau). Aucune incertitude n'est donnée par l'énoncé sur le quadrillage de référence en lui-même mais il y en a aussi forcément une à prendre en compte.

/1 Pas assez de points expérimentaux. Compté faux si une allusion est faite au nombre de chiffres significatifs insuffisants.

/1 Utiliser d'autres coïncidences (ou considérer une coïncidence à la moitié d'un carreau par exemple).

/1 Remarque valable sur le problème des coïncidences sur cette image.

## Aide aux calculs :

$$\frac{30,5 \times 8}{25} = 9,76 ; \quad \arctan(305/250) \simeq \arctan(30/25) \simeq 0,88 \text{ rad} ; \quad \sin(0,88 \text{ rad}) = 0,77 ; \quad \sin(0,54 \text{ rad}) = 0,51$$

$$\arctan(305/250 - 5/8) = 0,54 \text{ rad} ; \quad \arctan(305/250 - 6/8) = 0,43 \text{ rad} ; \quad \arctan(305/250 - 4/8) = 0,62 \text{ rad}$$

$$0,77/0,51 = 1,5 ; \quad 0,88/0,54 = 1,6$$

## Annexe

A le point objet, O le centre optique de la lentille de distance focale image  $f'$  et A' le point image.

— Relation de conjugaison de Descartes :

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

— Formule de grandissement transversal :

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