

BTS OPTICIEN LUNETIER

OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE ET PHYSIQUE – U.42

SESSION 2024

Durée : 2 heures

Coefficient : 3

Matériel autorisé

L'usage de la calculatrice avec mode examen actif est autorisé.

L'usage de la calculatrice sans mémoire, « type collègue », est autorisé.

Tout autre matériel est interdit.

Document à rendre avec la copie

Document réponse (deux schémas) page 7/7

Dès que le sujet vous est remis, assurez-vous qu'il est complet.


Le sujet comporte 7 pages, numérotées de 1/7 à 7/7.

BTS OPTICIEN LUNETIER		Session 2024
OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE ET PHYSIQUE - U.42	Code : 24OLOGPH	Page : 1/7

TÉLÉ-LOUPE

Dans son cadre professionnel, une technicienne en horlogerie a besoin pour son travail de précision et pour la qualité de son ouvrage, d'une aide visuelle présentant différentes propriétés : grossissement et distance de travail adéquats, champ visuel confortable, résolution pour la reconnaissance de détails fins et éclairage conforme du plan de travail. Un système télé-loupe est particulièrement adapté à ces besoins. Il existe plusieurs types de télé-loupes, de grossissement et de distance de travail différents. La longueur du système varie de 51,5 mm à 62 mm selon le dispositif.

On se propose d'étudier l'un des systèmes télé-loupes (**Figure 1**) dont les caractéristiques techniques commerciales sont regroupées dans le tableau ci-dessous (**Figure 2**).

 <p>Télé-loupe KS - Catalogue Zeiss</p> <p>Figure 1</p>	<p><u>Caractéristiques techniques commerciales de la télé-loupe KS</u></p> <p>Grossissement : $G = 3,5$</p> <p>Distance de travail Œil-Objet : 400 mm</p> <p>Distance de travail utile : 330 mm</p> <p>Champ visuel (espace objet) : 86 mm</p> <p>Figure 2</p>
--	--

La télé-loupe est composée d'un objectif achromatique de distance focale image $f'_{ob} = 24,0 \text{ mm}$, d'un système prismatique redresseur de grandissement transversal $g_{yr} = -1$ et d'un oculaire de distance focale image $f'_{oc} = 9,00 \text{ mm}$. Les éléments baignent dans l'air.

L'objectif est modélisé par une lentille mince de centre O, de foyers objet F_{ob} et image F'_{ob} . Le redresseur (afocal) est représenté par le couple de plans conjugués anti-principaux ($g_{yr} = -1$) intervenant dans ce système. L'oculaire est représenté par ses points principaux objet H_{oc} et image H'_{oc} , ainsi que par ses foyers objet F_{oc} et image F'_{oc} .

Le sujet comporte cinq parties. Il est conseillé de les traiter dans l'ordre pour la cohérence, mais chaque partie est suffisamment indépendante des autres pour être traitée isolément.

Partie 1 – Fonction du système optique (6 points)

Partie 2 – Étude du champ du système (5 points)

Partie 3 – Limite de résolution (2,5 points)

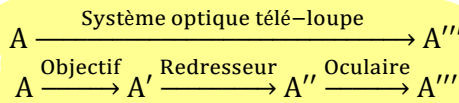
Partie 4 – Étude de l'éclairage (3 points)

Partie 5 – Optimisation de la transmission du système (3,5 points)

PARTIE 1 – FONCTION DU SYSTÈME OPTIQUE (6 points)

On considère que le plan objet réel $[A]$ se situe à 330 mm de l'objectif : $\overline{OA} = -330 \text{ mm}$. Le technicien utilisateur de la télé-loupe est **emmétrope et n'accommode pas**.

La chaîne des conjugués (sur l'axe optique) du système s'écrit :



1. Déterminer \overline{OA}' , par le calcul, puis montrer que le grandissement transversal g_{yob} correspondant est égal à $-7,8 \times 10^{-2}$ environ.
2. Préciser la position de A''' . En déduire la position de A'' en fonction de celles des points représentant l'oculaire.

Le système télé-loupe est représenté sur le **document réponse DR1**, sans souci d'échelle. Les objet et image conjugués $\overline{A'B'}$ et $\overline{A''B''}$ sont placés sur les plans anti-principaux du redresseur (soit $g_{yr} = -1$).

3. Compléter la construction du **document réponse DR1** en déterminant graphiquement la position de \overline{AB} , conjugué objet de $\overline{A'B'}$ par l'objectif, ainsi que la position de l'image de $\overline{A'''B'''}$ à travers l'oculaire.

On rappelle que la définition du grossissement G d'un système s'écrit $G = \left| \frac{\tan \alpha'}{\tan \alpha} \right|$. L'œil du technicien est repéré par le point S_{Oeil} . Les angles α et α' sont respectivement l'angle sous lequel est vu l'objet à l'œil nu et l'angle sous lequel est vue l'image par la télé-loupe.

4. Représenter α' sur le **document réponse DR1** et faire un autre schéma sur la copie (sans souci d'échelle), pour représenter α .
5. Montrer que $G = \left| g_{yr} \times g_{yob} \times \frac{S_{Oeil}A}{f_{Oc}} \right|$ où f_{Oc} est la distance focale objet de l'oculaire et $S_{Oeil}A$ la distance Œil-Objet.
6. Calculer G . Indiquer si la valeur obtenue est conforme aux caractéristiques techniques de la télé-loupe.

PARTIE 2 - ÉTUDE DU CHAMP DU SYSTÈME (5 points)

On se propose d'étudier, à présent, le champ de la télé-loupe. La monture de l'objectif correspond au **diaphragme d'ouverture**. Son diamètre est $2R_{Ob} = 13 \text{ mm}$. Entre le redresseur et le doublet oculaire se trouve un diaphragme D_{Oc} de diamètre $2R_{Oc} = 11 \text{ mm}$. On considère que le redresseur ne limite pas le champ de l'instrument.

Pour réaliser l'étude de champ, on se place dans l'espace optique intermédiaire à l'objectif et au redresseur. Dans cet espace interviennent la monture de l'objectif ainsi que le conjugué intermédiaire de D_{Oc} , appelé D. Sa position par rapport à l'objectif est : $\overline{OD} = 8,5 \text{ mm}$. Comme le redresseur afocal est caractérisé par un grandissement transversal égal à -1 , la dimension transversale de D est $2R = 11 \text{ mm}$. On considérera que le plan des champs intermédiaire à l'objectif et au redresseur se situe à **26 mm** de l'objectif.

1. Sur le **document réponse DR2**, représenter le rayon du champ de pleine lumière intermédiaire r_{pli} .

PARTIE 1 - FONCTION DU SYSTÈME OPTIQUE

1)

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

Descartes

On cherche $\overline{OA'}$:

$$\frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{f'_{\text{obj}}} + \frac{1}{\overline{OA}}$$

$$\frac{1}{\overline{OA'}} = \frac{1}{24} + \frac{1}{-330}$$

$$\overline{OA'} = \frac{1}{\frac{1}{24} + \frac{1}{-330}}$$

$$\overline{OA'} = 25,9 \text{ mm}$$

$$gy_{\text{ob}} = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$$

Descartes

On cherche gy_{ob} :

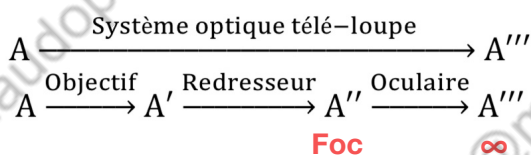
$$gy_{\text{ob}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$$

$$gy_{\text{ob}} = \frac{25,9}{-330}$$

$$gy_{\text{ob}} = -0,0784 = -7,84 \times 10^{-2}$$

Copyright © MaudOptical

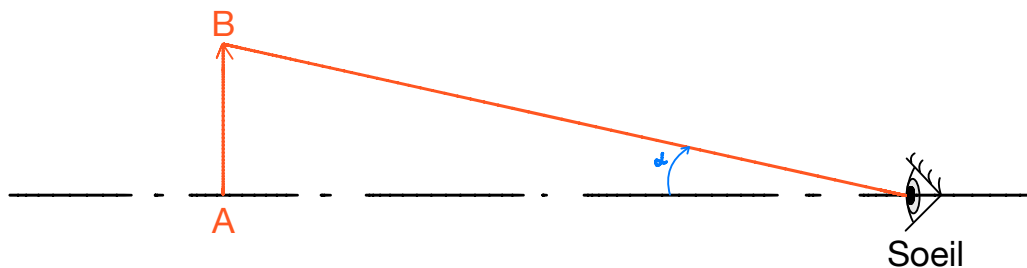
2)



A''' est situé à l'infini car l'observateur est emmétrope et n'accomode pas. Ce qui donne A'' sur Foc

4)

Représentation de α : angle sous lequel est vue l'objet à l'œil nu



5)

$$G = \left| \frac{\tan \alpha'}{\tan \alpha} \right| = \left| \frac{\tan \alpha'}{\overline{A''B''}} \times \frac{\overline{A''B''}}{\overline{A'B'}} \times \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} \times \frac{\overline{AB}}{\tan \alpha} \right| = \left| P_{\text{ioc}} \times gyr \times gy_{\text{ob}} \times \overline{SoeilA} \right|$$

$$G = \left| gyr \times gy_{\text{ob}} \times \frac{\overline{SoeilA}}{f_{\text{oc}}} \right|$$

$$\bullet \tan \alpha = \frac{\overline{AB}}{\overline{SoeilA}} \quad \text{donc } \overline{SoeilA} = \frac{\overline{AB}}{\tan \alpha}$$

$$\bullet \tan \alpha' = \frac{\overline{A'B'}}{H'_{\text{oc}} F'_{\text{oc}}}$$

Comme le système est afocal $\Rightarrow P_{\text{ioc}} = \frac{1}{f'_{\text{oc}}} = \frac{1}{-f_{\text{oc}}}$

Corrigé proposé par MaudOptical

$$6) \quad G = \left| \text{gyr} \times \text{gyob} \times \frac{\overline{\text{SoeilA}}}{\text{foc}} \right|$$

$$G = |-1 \times -7,84 \times 10^{-2} \times \frac{400}{-9}|$$

$$G = |3,48|$$

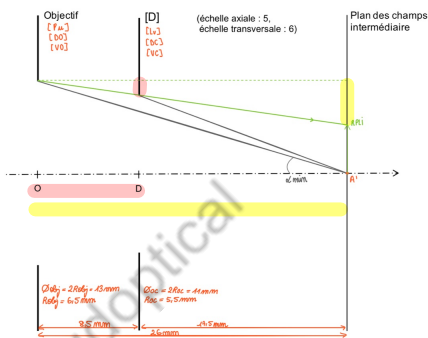
$$G \approx |3,5|$$

Copyright © MaudOptical

Cette valeur est conforme aux caractéristiques techniques de la télé-loupe KS qui a elle aussi la même valeur $G = 3,5$

PARTIE 2 - ÉTUDE DU CHAMP DU SYSTÈME

2)



THALÈS

$$\frac{\text{Robj} - \text{Rpli}}{\text{Robj} - \text{Roc}} = \frac{\overline{\text{OA}'}}{\overline{\text{OD}}}$$

$$\text{Robj} - \text{Rpli} = \frac{\overline{\text{OA}'}}{\overline{\text{OD}}} \times \text{Robj} - \text{Roc}$$

$$- \text{Rpli} = \frac{\overline{\text{OA}'}}{\overline{\text{OD}}} \times (\text{Robj} - \text{Roc}) - \text{Robj}$$

$$- \text{Rpli} = \frac{26}{8,5} \times (6,5 - 5,5) - 6,5$$

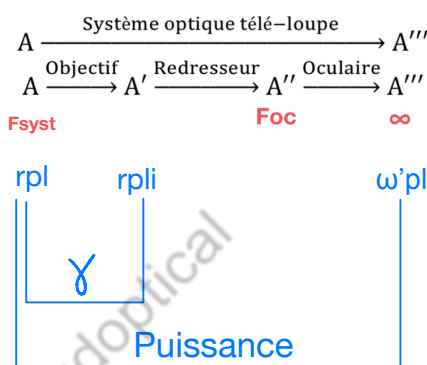
$$- \text{Rpli} = -3,44 \text{ mm}$$

$$\text{Rpli} = 3,44 \text{ mm}$$

3)

Ce diaphragme permet d'éliminer le champ de contour. Le diamètre de rpli vaut 6,88 (3,44x2), ce qui est légèrement supérieur à son diamètre qui est de 6,8mm. Pour pouvoir éliminer le champ de contour entièrement, son diamètre doit être égal au champ de pleine lumière à cet endroit. Les deux valeurs sont quand même très proches.

4)



$$\text{gyob} = \frac{2 \text{ rpl}}{2 \text{ rpl}}$$

$$2 \text{ rpl} = \frac{2 \text{ rpl}}{\text{gyob}} = \frac{6,8}{7,84 \times 10^{-2}} = 86,73 \text{ mm} \approx 86 \text{ mm}$$

(Bien conforme à la télé-loupe)

- Déterminer, par le calcul, le rayon r_{pli} .

Dans le plan des champs intermédiaire, il y a un diaphragme de diamètre 6,8 mm.

- Préciser le rôle de ce diaphragme et justifier le choix de sa dimension.
- Montrer que le champ de pleine lumière objet (largeur du champ visuel), noté $2r_{pl}$, est à peu près conforme aux caractéristiques techniques de la télé-loupe.

La puissance de la télé-loupe est $P = 8,75 \delta$.

- Calculer le champ de pleine lumière image (angle).

PARTIE 3 – LIMITE DE RÉOLUTION (2,5 points)

La fabrication horlogère est délicate à cause des dimensions minuscules des roues et des pignons et de la précision nécessaire des engrenages. La distance entre deux dents consécutives est de 7 à 8 centièmes de millimètre (Figure 3).

L'utilisateur de la télé-loupe doit s'assurer qu'il lui sera possible de distinguer les fins détails des pièces horlogères.

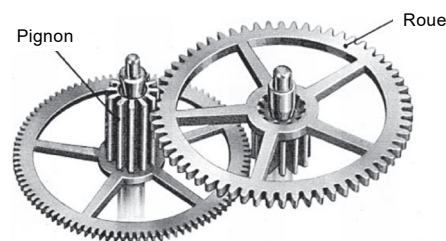


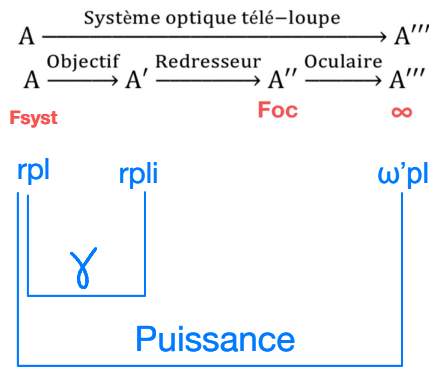
Figure 3

- Calculer la limite angulaire ε_{lim} de résolution imposée par la diffraction. On rappelle que $\varepsilon_{lim} = 1,22 \times \frac{\lambda}{2R_0}$ où $2R_0$ est la diamètre de la pupille d'entrée du système et λ la longueur d'onde du rayonnement. Pour le calcul, on prendra la longueur d'onde $\lambda = 555 \text{ nm}$ et $2R_0 = 13 \text{ mm}$.
- En déduire que la dimension transversale y_{lim} du plus petit détail discernable dans le plan objet est tel que $y_{lim} = 17 \mu\text{m}$.

On considère que la limite de résolution de l'œil est $\varepsilon_{oeil} = 3,0 \times 10^{-4} \text{ rad}$. La puissance de la télé-loupe est $P = 8,75 \delta$.

- Montrer que la dimension y_{oeil} du plus petit détail observable dans le plan objet est $y_{oeil} = 34 \mu\text{m}$.
- Préciser, en justifiant, si c'est la diffraction ou l'œil qui limite la résolution de l'ensemble (télé-loupe + œil).
- Préciser, en justifiant, si l'horloger peut distinguer deux dents consécutives du mécanisme horloger.

5)



Copyright © MaudOptical

$$P = \frac{\tan \omega'pl}{rpl}$$

Car : $P = \frac{\tan \alpha'}{\overline{AB}}$

$$\tan \omega'pl = P \times rpl$$

$$\tan \omega'pl = 8,75 \times 43 \times 10^{-3}$$

$$\omega'pl = 20,62^\circ$$

$$2\omega'pl = 41,24^\circ$$

PARTIE 3 - LIMITE DE RÉOLUTION

1) $\epsilon_{lim} = 1,22 \times \frac{\lambda}{2R0}$

$$\epsilon_{lim} = 1,22 \times \frac{555 \times 10^{-9}}{13 \times 10^{-3}}$$

$$\epsilon_{lim} = 5,21 \times 10^{-5} \text{ rad}$$

2) $y_{lim} = \epsilon_{lim} \times \text{distance}$

$$y_{lim} = 5,21 \times 10^{-5} \times 330 \times 10^{-3}$$

$$y_{lim} = 1,72 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$y_{lim} = 17,2 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$y_{lim} = 17,2 \text{ } \mu\text{m} \approx 17 \text{ } \mu\text{m}$$

3) $P = \frac{\tan \alpha'}{\overline{AB}}$ donc : $\overline{AB} = \frac{\tan \alpha'}{P}$

Ce qui donne $\rightarrow y_{oeil} = \frac{\tan \epsilon_{oeil}}{P}$

$$y_{oeil} = \frac{(3 \times 10^{-4})}{8,75}$$

$$y_{oeil} = 3,428 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$y_{oeil} = 34,28 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$y_{oeil} = 34,28 \text{ } \mu\text{m} \approx 34 \text{ } \mu\text{m}$$

4) $y_{oeil} = 34 \text{ } \mu\text{m} > y_{lim} = 17 \text{ } \mu\text{m}$: donc c'est l'oeil qui limite la résolution.

PARTIE 4 – ÉTUDE DE L'ÉCLAIRAGE (3 points)

Le technicien utilise la télé-loupe avec un éclairage dédié (**Figures 1 et 4**). Quelques-unes des caractéristiques de cet éclairage sont regroupées dans le tableau de la **Figure 5**.



Figure 4

Caractéristiques de l'éclairage

Source : DEL (diode électroluminescente)
puissante, mobile et légère
Alimentation : batterie lithium-polymère
(3 700 mAh, 3,7 V)
Compatible avec le produit KS

Température de couleur : 5 500 K
Éclairement : 20 000 lx à une distance de
250 mm

Temps d'utilisation pleine puissance : 4 h
Temps de charge : environ 4 h

Figure 5

La norme relative à l'éclairage des lieux de travail impose notamment un éclairement moyen E_{moy} à maintenir. Pour des tâches nécessitant la perception de détails, **il est préconisé un éclairement moyen de la zone de travail supérieur à 750 lx.**

Pour simplifier, on considère que la source éclaire le plan de travail sous incidence normale. Dans ce cas, la loi de Bouguer liant l'intensité lumineuse I (en candelas) à l'éclairement E (en lux) s'écrit $E = \frac{I}{d^2}$ où d est la distance (en mètres) entre la source et le plan éclairé (**Figure 6**).

1. Calculer l'intensité lumineuse I de la source.
2. Montrer qu'à la distance de travail utile (**Figure 2**), l'éclairement E_u est égal à 11 480 lx environ. Commenter.

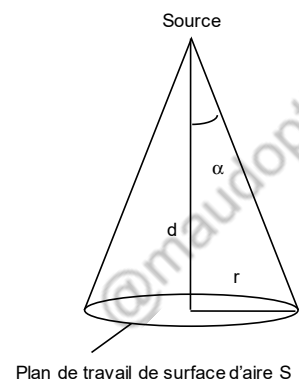


Figure 6

Le faisceau émis par la source est conique de demi-angle d'ouverture $\alpha = 20^\circ$ (**Figure 6**).

3. Montrer que l'aire S de la surface éclairée circulaire de rayon r est $S = 4,5 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ environ pour la distance de travail utile.
4. Calculer F sachant que l'éclairement E_u est le flux lumineux F (en lumens) émis par la source et reçu par unité de surface de travail utile.

Le développement des éclairages à DEL blanche s'est largement accentué depuis quelques années, notamment à cause de rendements lumineux élevés.

5. En considérant que le rendement η de la source est égal à $100 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$, calculer la puissance électrique P_e consommée (on rappelle que le rendement est le rapport du flux lumineux émis et de la puissance électrique consommée).
6. Commenter le résultat précédent sachant que pour un même flux, une lampe à filament de tungstène consomme 35 W.

5) « 7 à 8 centièmes de mm » revient à 0,07 mm à 0,08 mm soit à 70 μm à 80 μm .

yeil = 34 μm < 70 μm à 80 μm ; l'horloger peut donc discerner les deux dents consécutives du mécanisme.

PARTIE 4 - ÉTUDE DE L'ÉCLAIRAGE

1) $E = \frac{I}{d^2}$ **donc :** $I = E \times d^2$
 $I = 20\,000 \times 0,25^2$
 $I = 1250 \text{ cd}$

Copyright © MaudOptical

2) $E_u = \frac{I}{d^2} = \frac{1250}{0,33^2} = 11\,478 \approx 11\,480 \text{ lx}$

11 480 lx > 750 lx : donc ça sera très bien éclairé

3) $\tan \alpha = \frac{r}{d}$ **Selon la figure 6.**

donc : $r = \tan \alpha \times d = \tan(20) \times 0,33 = 0,12 \text{ m}$

$$\begin{aligned} \text{Aire d'un disque} &= \pi \times r^2 \\ &= \pi \times 0,12^2 \\ &= 0,0452 \text{ m}^2 \\ &\approx 4,5 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

4) $E_u = \frac{F}{S}$ Flux lumineux
 Éclairement \swarrow Aire d'un disque \nwarrow
Donc : $F = E_u \times S = 11\,480 \times 4,5 \times 10^{-2} = 516,6 \text{ lm}$

5) $n = \frac{F}{P_e}$ **Donc :** $n \times P_e = F$
 $P_e = \frac{F}{n} = \frac{516,6 \text{ lm}}{100 \text{ lm} \times \text{W}^{-1}} = 5,166 \text{ W}$

6) 5,166 W < 35 W : ça veut dire que l'éclairage LED consomme moins d'électricité.

PARTIE 5 – OPTIMISATION DE LA TRANSMISSION DU SYSTÈME (3,5 points)

L'objectif de la télé-loupe est un doublet achromatique ; l'oculaire est composé de trois lentilles et il y a quatre transmissions dans l'ensemble redresseur. Pour simplifier, on considère que tous les composants optiques de la télé-loupe sont taillés dans un même matériau et on néglige toute absorption dans le domaine spectral considéré.

1. Justifier que l'instrument est composé de $N = 14$ dioptries.

On précise que le coefficient de transmission en intensité d'un dioptre est $T_{\text{dioptre}} = 0,958$.

2. Calculer la transmission de la télé-loupe $T_{\text{télé-loupe}}$ dans ce cas sachant que la transmission d'un système à N dioptries est égale à $(T_{\text{dioptre}})^N$.

Cette transmission n'est pas suffisamment élevée pour ce type d'instrument. Le constructeur traite tous les dioptries soumis à transmission avec un traitement antireflet.

3. Expliquer le principe physique du traitement antireflet monocouche. L'explication devra être illustrée d'un schéma clair.

En fait, c'est un traitement multicouches qui est réalisé. La **Figure 7** présente les courbes de coefficient de réflexion en intensité R d'un dioptre en fonction de la longueur d'onde.

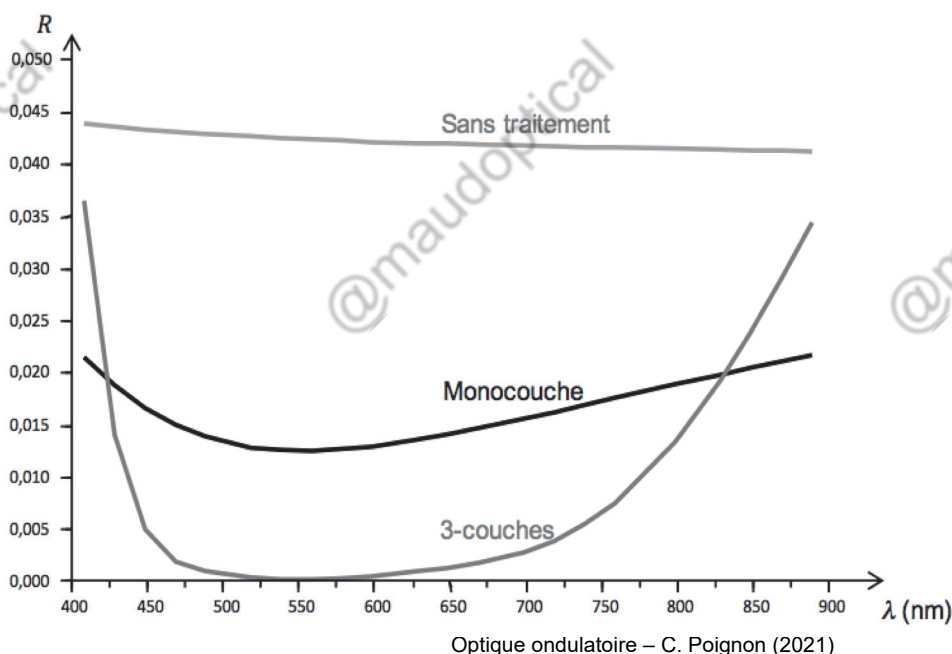


Figure 7

4. Justifier, en s'appuyant sur la **Figure 7** l'utilisation du traitement multicouches (3-couches) en termes de transmission.

On considère, dans le domaine spectral, la longueur d'onde $\lambda = 500$ nm.

5. Calculer la transmission de la télé-loupe dans le cas d'un traitement monocouche ($T'_{\text{télé-loupe}}$), puis dans le cas d'un traitement multicouche ($T''_{\text{télé-loupe}}$). Commenter.

PARTIE 5 - OPTIMISATION DE LA TRANSMISSION DU SYSTÈME

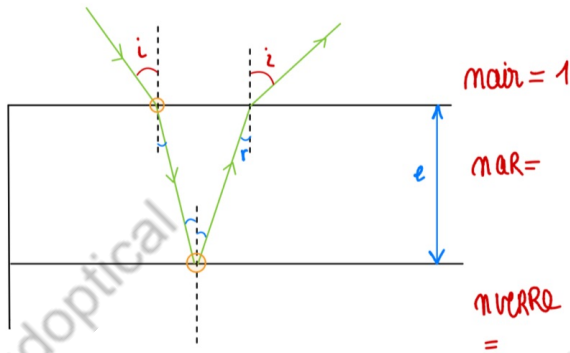
- 1)
- Doublet : 2 lentilles donc 4 dioptries
 - 3 Lentilles : donc 6 dioptries
 - 4 transmissions : donc 4 dioptries
- $N = 4 + 6 + 4 = 14$ dioptries

2)

$$T_{\text{télé-loupe}} = 0,958^{14} = 0,548 = 54,8\%$$

3) Schéma de Principe de l'antireflet :

Copyright © MaudOptical



$$\delta_{\text{geom}} = 2 n_{AR} e \cos r$$

$$\delta_{\text{geom}} = 2 n_{AR} e$$

$\cos r = 1$
 $\cos r$ petit

2 réflexions vitreuses : $\delta_{\text{supp}} = 0$

$$\delta = \delta_{\text{geom}} + \delta_{\text{supp}}$$

$$\delta = 2 n_{AR} e$$

- 4) Ils sont tous dans le domaine visible (400 à 800 nm). Le traitement multicouches a un coefficient de réflexion inférieur au traitement multicouches. C'est mieux d'avoir un coefficient de réflexion petit donc d'avoir un traitement multicouches pour augmenter la transmission.

5) Mono-couche :

$$R = 0,014$$

$$T' = (1 - 0,014)^{14}$$

$$T' = 0,8208$$

$$T' = 82\%$$

98% > 82% : multicouches + efficace

Multicouches :

$$R = 0,001$$

$$T' = (1 - 0,001)^{14}$$

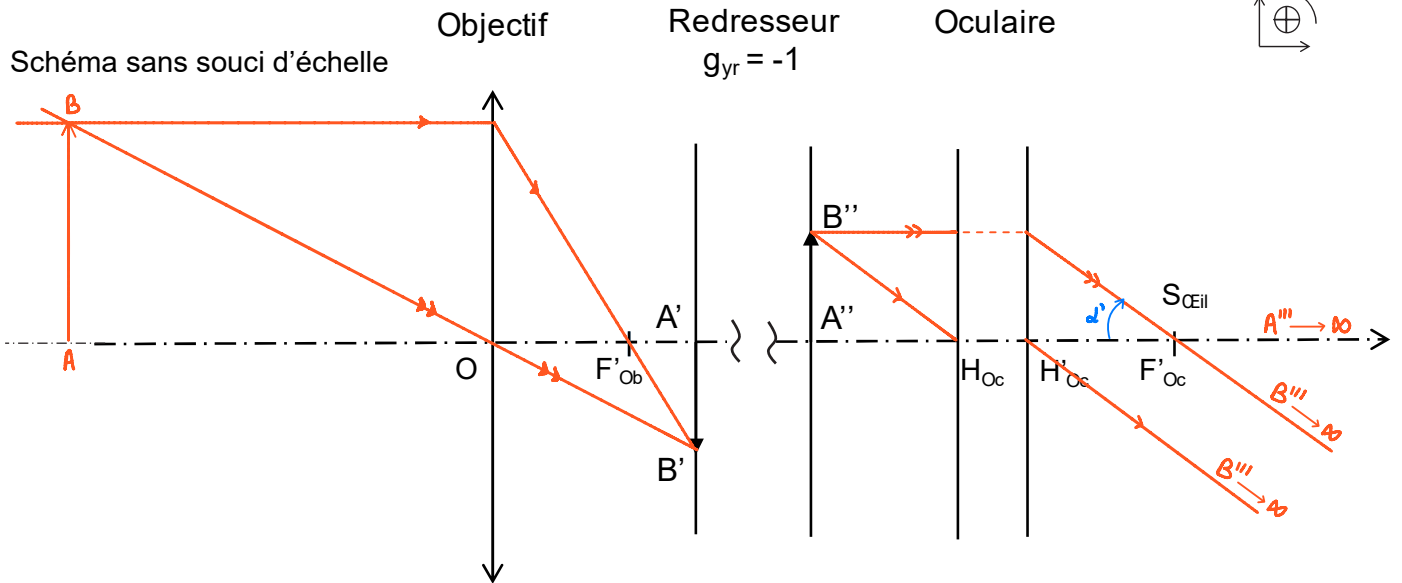
$$T' = 0,9860$$

$$T' = 98\%$$

DOCUMENT RÉPONSE

(à rendre avec la copie)

Document réponse DR1



Document réponse DR2

