Ce document a été mis en ligne par l'organisme FormaV©

Toute reproduction, représentation ou diffusion, même partielle, sans autorisation préalable, est strictement interdite.

Pour en savoir plus sur nos formations disponibles, veuillez visiter :
www.formav.co/explorer

BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR

SYSTÈMES PHOTONIQUES

ÉPREUVE E4 : ÉTUDE D'UN SYSTÈME OPTIQUE

SOUS-ÉPREUVE E41 : PRÉ-ÉTUDE ET MODÉLISATION D'UN SYSTÈME OPTIQUE

Session 2019

Coefficient 2– Durée 2,5 heures

Aucun document autorisé

L'usage de tout modèle de calculatrice,
avec ou sans mode examen, est autorisé.

Constitution du sujet

- **Dossier Sujet** *(mise en situation et questions à traiter par le candidat)*
  - **Mise en situation**……..Pages 2 à 3
  - **PARTIE A** ..... Pages 3 à 4
  - **PARTIE B** ..... Pages 4 à 5
  - **PARTIE C** ..... Pages 5 à 6
  - **PARTIE D** ..... Pages 6 à 7
- **Annexes sur le support d'étude** ..... Page 8
- **Ressources scientifiques**……..Pages 8 à 9
- **Documents Réponse** ..... Pages 10 à 11

Les différentes parties du sujet sont indépendantes et peuvent être traitées dans un ordre indifférent.

Les documents réponse DR1 et DR2 (pages 10 et 11) seront à rendre agrafés avec vos copies.

Base Nationale des Sujets d'Examens de l'enseignement professionnel

Microscope interférentiel

Le microscope interférentiel est un instrument d'optique permettant de mesurer, sans contact, l'état de surface d'un objet d'étude. Plus précisément, il détermine un profil 3D de la surface de l'objet.

Le microscope interférentiel est principalement constitué :

- d'un microscope optique ;
- d'un interféromètre ;
- d'une source de lumière blanche qui éclaire l'objet d'étude ;
- d'une caméra CCD qui capte l'image issue du microscope.

Le schéma de principe du microscope interférentiel est donné sur la figure 2.



Figure 1 : Microscope interférentiel Wyko NT 1110

Le faisceau lumineux issu de la source de lumière blanche est mis en forme puis dirigé vers l'échantillon grâce à une lame semi-réfléchissante. Il traverse alors un interféromètre de Michelson dont un des miroirs est remplacé par l'objet d'étude (l'échantillon).

L'analyse des franges d'interférence formées permet d'accéder au profil 3D de l'échantillon.

L'objectif du microscope et l'oculaire constituent un microscope optique. L'image de l'échantillon et l'image des franges d'interférence se forment sur le capteur de la caméra CCD.

Les données techniques du microscope interférentiel et les ressources scientifiques nécessaires à la résolution de cette étude figurent en annexe 1 en fin de document.

Le sujet propose d'étudier la partie optique géométrique du microscope interférentiel et notamment son pouvoir de résolution (partie A).

Comme le microscope est composé d'un grand nombre de lentilles, il peut y avoir une forte atténuation de la lumière reçue par le capteur si les surfaces des lentilles n'ont pas subi un traitement antireflet. La partie B propose l'étude de ce traitement de surface et de son impact sur la transmission lumineuse du microscope.

Dans la partie C on évalue la puissance totale émise par la source de lumière modélisée par un corps noir.

Enfin, dans la partie D on étudie l'interféromètre de Michelson et son utilisation pour déterminer le profil 3D d'un échantillon.

Base Nationale des Sujets d'examens de l'enseignement professionnel

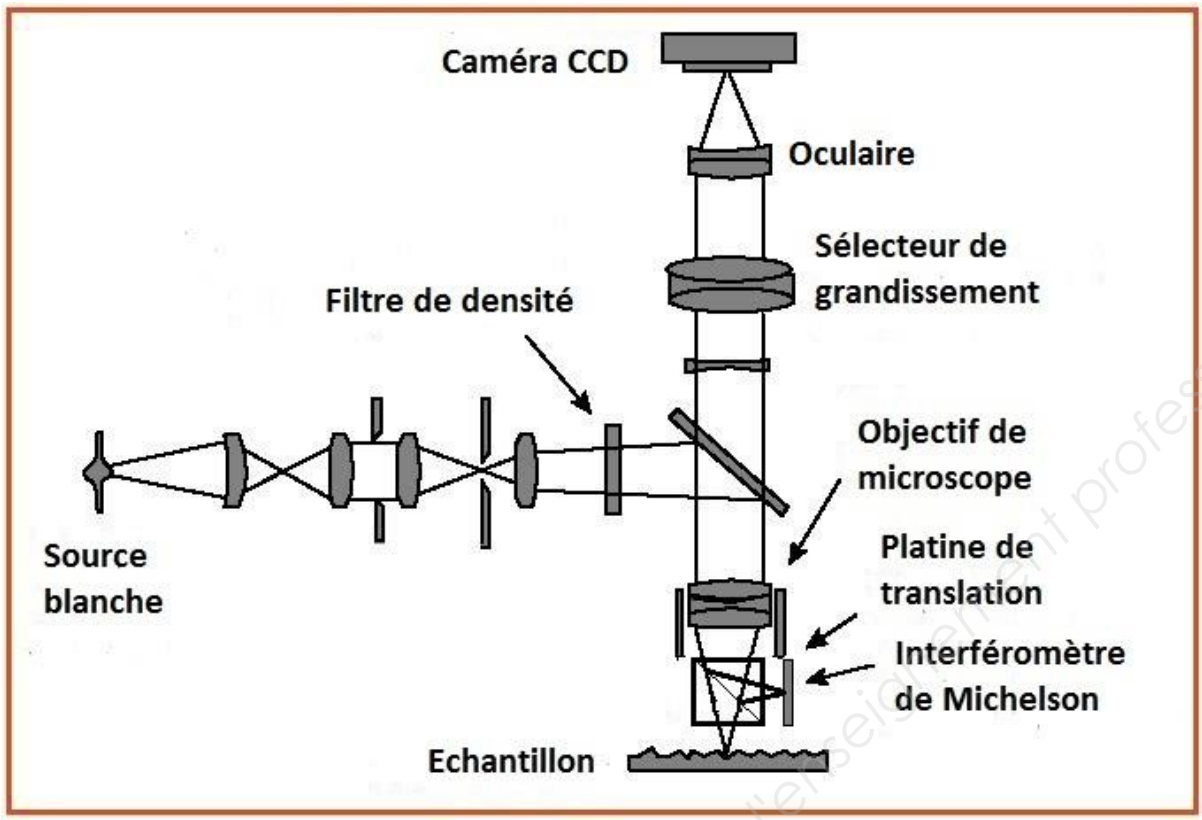


Figure 2 : schéma de principe du microscope interférentiel

PARTIE A (6 points)

Cette partie se propose d'élaborer les caractéristiques d'un modèle simple du microscope dont on suppose qu'il forme une image à l'infini de l'objet d'étude. L'objectif du microscope est modélisé par une lentille mince (L_1) et l'oculaire par un doublet de lentilles (L_2 et L_3).

L'intervalle optique Δ du microscope correspond à la distance entre le foyer image de l'objectif et le foyer objet de l'oculaire.

Des caractéristiques techniques du microscope sont données en annexe 1.

Sur le **document-réponse DR1, à rendre avec la copie**, on a représenté à l'échelle l'objectif de microscope, un objet AB et son image A_1B_1 par l'objectif.

A.1 Placer sur le schéma du document réponse DR1 le foyer objet de l'oculaire F_{oc}. Justifier votre réponse.

A.2. Par des tracés de rayons, déterminer la valeur numérique de la distance focale image, f'_1, de l'objectif.

A.3. Utiliser une caractéristique technique du microscope pour déterminer si le microscope fonctionne - ou ne fonctionne pas - dans les conditions de Gauss. En préciser une conséquence.

Base Nationale des Sujets d'examens de l'enseignement professionnel

A.4. Calculer numériquement la puissance intrinsèque (ou vergence) de l'oculaire P_{oc} et en déduire la valeur numérique de la distance focale image de l'oculaire.

A.5. L'oculaire est modélisé par un doublet constitué de deux lentilles minces, L_2 et L_3, de distances focales images respectives f'_2 et f'_3. Les centres optiques des lentilles sont distants de e. Les distances f'_2, f'_3 et e sont proportionnelles à un même paramètre a, homogène à une longueur, respectivement par des nombres entiers m, n et p représentant la signature du doublet.
On choisit pour le modèle $m = 3$, $n = 2$ et $p = 1$ *(doublet de Huyghens)*.
Déterminer les distances focales f'_2 et f'_3 des lentilles de ce doublet ainsi que son encombrement.

A.6. Montrer que la puissance P_m du microscope s'exprime en fonction du grandissement γ_1 de l'objectif et de la puissance P_{oc} de l'oculaire. Vérifier que P_m est égale à 200 δ en valeur absolue.

A.7. Calculer la valeur numérique du grossissement commercial G_{cm} du microscope.

A.8. Déterminer la valeur numérique de la limite de résolution du microscope pour une longueur d'onde λ de 550 nm. Que représente cette valeur ?

PARTIE B (6 points)

On souhaite améliorer le coefficient de transmission du microscope et diminuer la lumière parasite due aux réflexions. Pour cela, on dépose sur les lentilles du microscope des couches antireflets.
L'étude est effectuée pour les rayons lumineux en incidence normale ou quasi normale.

Afin de simplifier l'étude, on suppose que le traitement est un traitement monocouche d'indice n_c et d'épaisseur e. Les coefficients de réflexion en amplitude sur chacun des dioptres sont notés respectivement r_1 (dioptre air/antireflet) et r_2 (dioptre antireflet/verre).

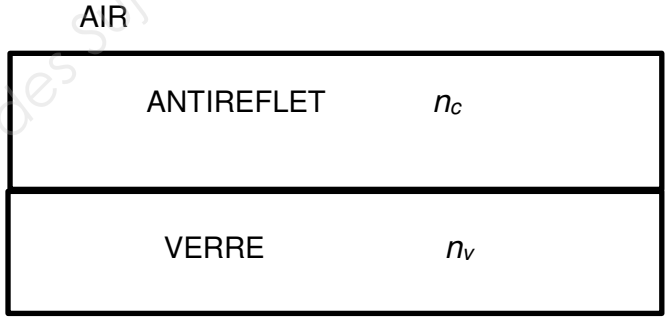


Figure 3: couche antireflet

B.1. Exprimer r_1 et r_2 en fonction de n_c et de l'indice n_v du verre dont sont constituées les lentilles.

Base Nationale des Sujets d'Examen de l'enseignement professionnel

B.2. En utilisant la condition $r_1 = r_2$, montrer que l'indice théorique n_c de la couche antireflet doit être égal à 1,23 dans le cas où l'indice du verre, n_v, vaut 1,52.

B.3. En pratique, on utilise de la cryolithe d'indice $n_c = 1,35$. Expliquer quelle en sera la conséquence.

B.4. Schématiser le trajet d'un rayon lumineux incident sur la couche antireflet. Représenter les rayons transmis et réfléchis par les dioptres air/couche antireflet et couche antireflet/verre et exprimer la différence de marche, δ, en fonction des chemins optiques.

B.5. En incidence normale, donner, en fonction de e et n_c, l'expression de la différence de chemin optique δ entre les deux ondes réfléchies respectivement par le dioptre air/antireflet et le dioptre antireflet/verre.

B.6. En justifiant la condition d'interférences pour laquelle la couche antireflet jouera son rôle, déterminer l'épaisseur minimale de la couche de cryolithe qu'il faut déposer sur le verre en supposant que la longueur d'onde de la lumière utilisée vaut 550 nm.

On suppose que les neuf lentilles du microscope ont été réalisées dans du verre d'indice $n_v = 1,52$. On réalise sur chaque face des neuf lentilles un traitement antireflet à l'aide de cryolithe d'indice $n_c = 1,35$.

B.7. Comparer pour des faisceaux en incidence normale, les valeurs respectives des coefficients de transmission T et T_m du microscope constitué des neuf lentilles lorsque les surfaces des lentilles sont non traitées et traitées.

On se place dans le cas d'une longueur d'onde telle que, sous incidence normale, la couche antireflet déposée joue pleinement son rôle.

PARTIE C (2 points)

On utilise comme source de lumière blanche une lampe à filament de tungstène. Ce filament se comporte comme un corps noir, dont le spectre est continu, allant de l'infrarouge à l'ultraviolet en passant par le visible. Il est porté à la température $T = 2700$ K.

C.1. Déterminer la valeur numérique de la longueur d'onde correspondant au maximum d'émission de la lampe à l'aide de la loi de Wien et indiquer à quel domaine spectral appartient cette longueur d'onde.

C.2. Déterminer, en expliquant la démarche suivie, la valeur numérique de la puissance totale rayonnée par la lampe.

On pourra faire appel à des constantes physiques et à des propriétés du rayonnement du corps noir données dans les ressources scientifiques en annexe 1.

Base Nationale des Sujets d'Examen de l'enseignement professionnel

Caractéristiques de la lampe à incandescence
- *Longueur du filament : L = 40,0 mm* - *Diamètre du filament : D = 0,050 mm* - *Volume d'un cylindre de diamètre D et de longueur L : $\pi D^2 L/4$* - *Surface d'un cylindre de diamètre D et de longueur L : πDL*

C.3. Expliquer, à partir de vos connaissances, pourquoi ces lampes ne sont progressivement plus utilisées.

PARTIE D (6 points)

Dans le microscope interférentiel, l'interféromètre de Michelson se trouve sous l'objectif du microscope. Il est composé d'un cube séparateur de faisceau et d'un miroir vertical de référence qu'on supposera parfaitement plan, situé à la distance fixe d_M du centre du cube séparateur, sur un axe perpendiculaire au rayon incident. Le rôle du deuxième miroir est joué par l'échantillon étudié (voir la figure 4).

Chaque point de la surface de l'objet a pour coordonnées (x , y) dans le plan horizontal, et sa coordonnée verticale est définie par la distance $d(x,y)$ de ce point à la diagonale du cube séparateur.

Le cube séparateur et le miroir de référence peuvent se déplacer en bloc, verticalement ; on fait alors varier la distance d(x,y), et la différence de marche δ.

L'interféromètre étant éclairé en lumière blanche et en incidence normale, la différence de marche entre les deux ondes qui interfèrent est $\delta = 2(d(x,y) - d_M)$.

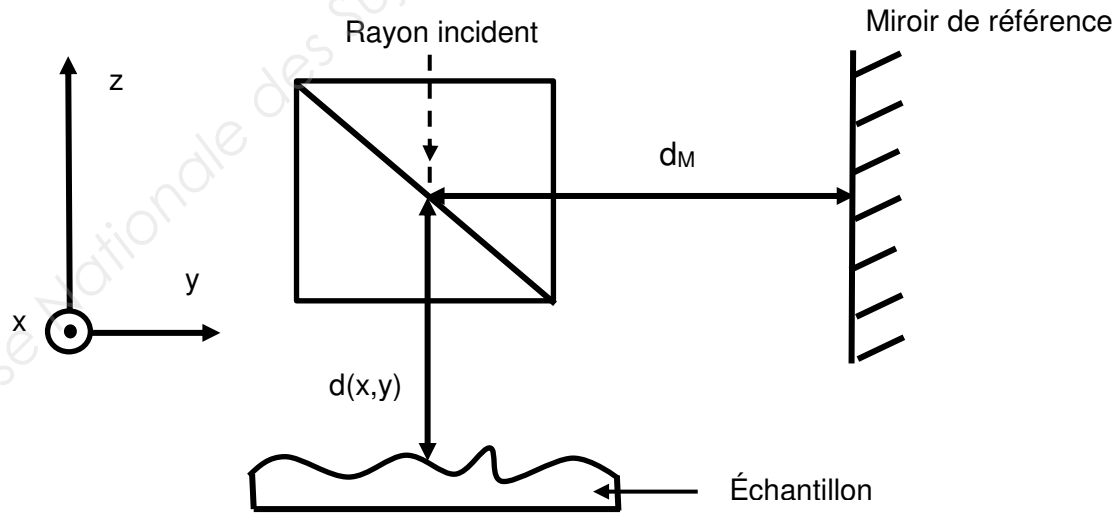


Figure 4 : l'interféromètre avec échantillon

Base Nationale des Sujets d'Examens de l'enseignement professionnel

D.1. On suppose dans un premier temps que l'objet est parfaitement plan, sans défaut de surface, et placé dans un plan horizontal. L'interféromètre fonctionne alors en lame d'air. Déterminer, dans ce cas, la valeur de la différence de marche δ si $d(x,y) = d_M$.

D.2. Justifier, pour cette valeur de δ, la nature des interférences (constructives ou destructives). Décrire l'image se formant alors sur le capteur.

D.3. Décrire l'évolution du contraste des images se formant sur le capteur lorsque la différence de marche δ augmente progressivement en partant de 0.

On se place maintenant dans le cas réel d'un objet rugueux. L'altitude de chaque point à la surface de l'objet varie en fonction de l'état de surface, sur une échelle de quelques micromètres. L'interféromètre réalise des franges d'égale épaisseur en lumière blanche, il fonctionne alors comme un coin d'air.

D.4. Préciser où sont localisées les franges. Les images de l'objet et des franges se forment-elles simultanément sur le capteur ? Justifier votre réponse.

Pour une position donnée de l'ensemble {cube séparateur, miroir de référence}, le microscope interférentiel réalise une image des franges. Un traitement informatique permet de déterminer sur cette image les points pour lesquels le contraste des franges est maximal.

D.5. Exprimer littéralement à quelle distance du cube séparateur se trouvent les points trouvés par le logiciel.

D.6. En laissant apparaître les traits de construction, tracer sur **le document réponse DR2, à rendre avec la copie**, l'ensemble des points de contraste maximal dans la position représentée sur le schéma.

D.7. On déplace ensuite verticalement l'ensemble {cube séparateur, miroir de référence}, d'une distance p connue avec précision. Déterminer la différence d'altitude entre, d'une part les points où les franges ont un contraste maximal dans cette nouvelle position et, d'autre part, ceux trouvés dans la position précédente. Justifier la réponse.

D.8. Au cours d'une mesure de profil, on effectue ainsi plusieurs déplacements de pas p. Expliquer en quelques lignes comment le repérage des points de contraste maximal pour chaque déplacement permet de reconstruire le profil 3D de la surface étudiée.

Base Nationale des Sujets d'examen de l'enseignement professionnel

ANNEXE 1

FICHE TECHNIQUE DU MICROSCOPE INTERFÉRENTIEL

Grandissement de l'objectif L_1	x 5
Ouverture numérique de l'objectif	n·sin(u) = 0,65
Grossissement commercial de l'oculaire	G_{cm} = 10,0
Intervalle optique du microscope	Δ = 180 mm

RESSOURCES SCIENTIFIQUES

Microscope

Puissance P d'un instrument d'optique en dioptries en fonction du diamètre apparent de l'image θ' et de la taille AB de l'objet : |P| = θ'/AB.

Grossissement commercial du microscope $G_{cm} = |P_m|d$ avec d = 0,25 m la distance minimale de vision nette et P_m la puissance du microscope.

Pouvoir de résolution : $x_{min} = 0{,}61\lambda/(n\cdot\sin(u))$

Doublet

Formule de Gullstrand donnant la distance focale *f'* d'un doublet de lentille en fonction des distances focales f'_1 et f'_2 des deux lentilles qui le composent et de l'écartement *e* des centres optiques : $\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{e}{f'_1 f'_2}$

Coefficients de réflexion et de transmission d'un dioptre

Coefficient de réflexion en amplitude, *r*, d'un dioptre séparant un milieu 1 d'indice n_1 d'un milieu 2 d'indice n_2, la lumière se propageant de 1 vers 2 : $r = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$

Coefficient de réflexion en intensité du même dioptre : $R = r^2$.

Coefficient de transmission en intensité du même dioptre : $T = 1 - R$.

Différence de marche entre deux ondes réfléchies consécutives par une lame à face parallèle d'épaisseur *e* et d'indice *n* : $\delta = 2\cdot n\cdot e\cdot\cos(r)$ où r est l'angle de réfraction dans la lame.

Constantes physiques

- *Constante de Planck* $h = 6{,}63.10^{-34} J\cdot s$
- *Constante de Boltzmann* $k = 1{,}38.10^{-23} J\cdot K^{-1}$

Base nationale des sujets d'examens de l'enseignement professionnel

- *Célérité de la lumière dans le vide : c = 3,00. 10^8 m.s.$^{-1}$*

Corps noir

- Loi de Wien reliant la longueur d'onde λ_m du maximum d'émission à la température T du corps noir : $\lambda_m T = 2{,}90 \cdot 10^{-3}$ K·m.

- Densité spectrale d'énergie rayonnée par un corps noir, par unité de volume, à la longueur d'onde λ:

$$u(\lambda) = \frac{8\pi c}{\lambda^5} \frac{h}{e^{hc/(kT\lambda)} - 1}$$

.

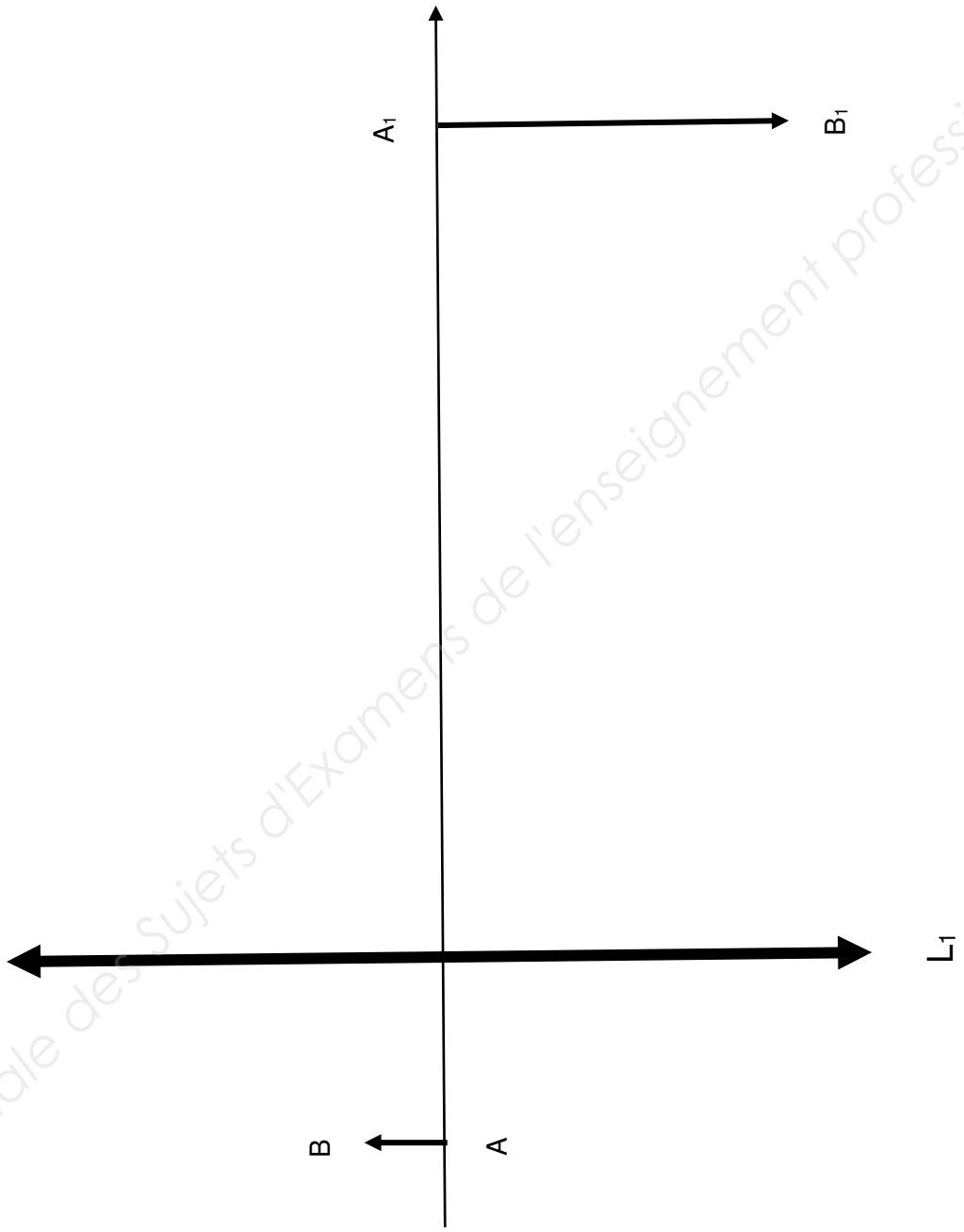
- Puissance lumineuse émise par unité de surface par un corps noir : $E = \sigma T^4$ avec $\sigma = 5{,}67.10^{-8}$ W·m^{-2}·K^{-4}

Base Nationale des Sujets d'Examens de l'enseignement professionnel

DOCUMENT RÉPONSE DR1 À RENDRE AVEC LA COPIE

PARTIE A

Réponses aux questions A.1, A.2.

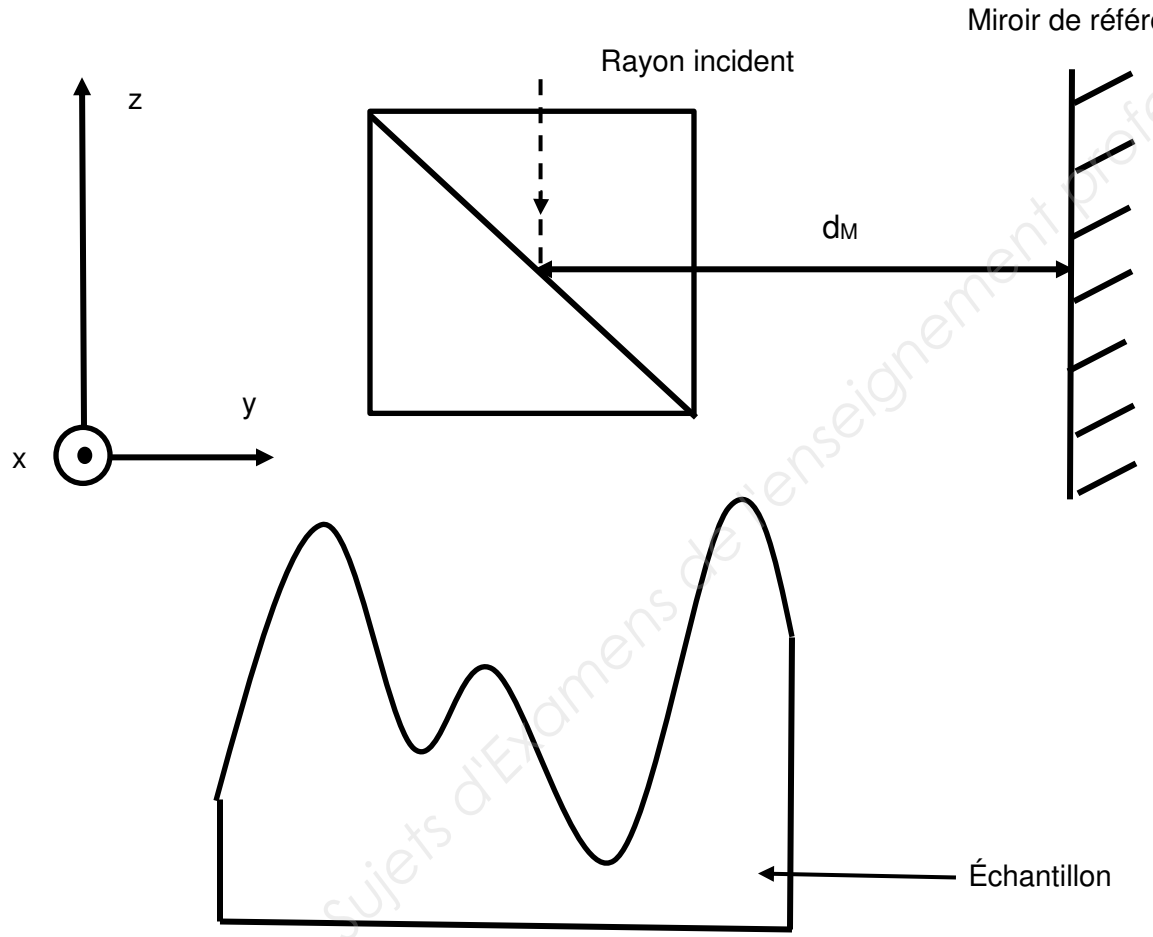


Base Nationale des Sujets d'Examens de l'enseignement professionnel

DOCUMENT RÉPONSE DR2 À RENDRE AVEC LA COPIE

PARTIE D

Réponse à la question D.6



Base Nationale des sujets d'Examens de l'enseignement professionnel

Copyright © 2026 FormaV. Tous droits réservés.

Ce document a été élaboré par FormaV© avec le plus grand soin afin d'accompagner chaque apprenant vers la réussite de ses examens. Son contenu (textes, graphiques, méthodologies, tableaux, exercices, concepts, mises en forme) constitue une œuvre protégée par le droit d'auteur.

Toute copie, partage, reproduction, diffusion ou mise à disposition, même partielle, gratuite ou payante, est strictement interdite sans accord préalable et écrit de FormaV©, conformément aux articles L.111-1 et suivants du Code de la propriété intellectuelle. Dans une logique anti-plagiat, FormaV© se réserve le droit de vérifier toute utilisation illicite, y compris sur les plateformes en ligne ou sites tiers.

En utilisant ce document, vous vous engagez à respecter ces règles et à préserver l'intégrité du travail fourni. La consultation de ce document est strictement personnelle.

Merci de respecter le travail accompli afin de permettre la création continue de ressources pédagogiques fiables et accessibles.

Copyright © 2026 FormaV. Tous droits réservés.

Ce document a été élaboré par FormaV© avec le plus grand soin afin d'accompagner chaque apprenant vers la réussite de ses examens. Son contenu (textes, graphiques, méthodologies, tableaux, exercices, concepts, mises en forme) constitue une œuvre protégée par le droit d'auteur.

Toute copie, partage, reproduction, diffusion ou mise à disposition, même partielle, gratuite ou payante, est strictement interdite sans accord préalable et écrit de FormaV©, conformément aux articles L.111-1 et suivants du Code de la propriété intellectuelle. Dans une logique anti-plagiat, FormaV© se réserve le droit de vérifier toute utilisation illicite, y compris sur les plateformes en ligne ou sites tiers.

En utilisant ce document, vous vous engagez à respecter ces règles et à préserver l'intégrité du travail fourni. La consultation de ce document est strictement personnelle.

Merci de respecter le travail accompli afin de permettre la création continue de ressources pédagogiques fiables et accessibles.